GOBERNACIÓN DE ANTIOQUIA

2013

# ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL ACTUALIZADO

## CONEXIÓN VIAL ABURRÁ - ORIENTE

CONCESIÓN TUNEL ABURRÁ-ORIENTE S.A.

### CAPÍTULO 3 – CARACTERIZACIÓN AMBIENTAL

### COMPONENTE FISICO

GOBERNACIÓN DE ANTIOQUIA

CONCESIÓN TUNEL ABURRÁ-ORIENTE S.A.

# ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL ACTUALIZADO

## CONSULTORES PARTICIPANTES:

INTEGRAL INGENIEROS CONSULTORES

CONSORCIO SIGA PLYMA COLOMBO - CHILENO

GEODATA

INTEINSA INGENIERÍA INTELIGENTE

GICA S.A.S. GESTIÓN EN INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL

L&D PROFESIONALES ASOCIADOS

FABIÁN HOYOS PATIÑO

ACCIÓN FLORA

GSA S.A.S. GESTIÓN Y SERVICIOS AMBIENTALES S.A.S.

plyma PLANES Y MANEJOS AMBIENTALES

CVG Servicios Ambientales

RAFAEL HERRERA FARFÁN
CONSULTOR AMBIENTAL

# TABLA DE CONTENIDO

**3 CARACTERIZACIÓN AMBIENTAL DEL ÁREA DE INFLUENCIA DEL PROYECTO ..... 3.1-20**

3.1 ÁREAS DE INFLUENCIA ..... 3.1-20
*3.1.1 Área de influencia directa (AID) ..... 3.1-20*
3.1.1.1 Área de influencia directa puntual ..... 3.1-20
3.1.1.2 Área de influencia directa local ..... 3.1-22
*3.1.2 Área de influencia indirecta (AII) ..... 3.1-27*
3.2 MEDIO ABIÓTICO ..... 3.2-28
*3.2.1 Geología ..... 3.2-28*
3.2.1.1 Geología Regional ..... 3.2-28
3.2.1.2 Geología detallada del Corredor ..... 3.2-29
3.2.1.2.1 Complejo Cajamarca ..... 3.2-30
3.2.1.2.2 Complejo Ofiolítico de Aburrá ..... 3.2-32
3.2.1.2.3 Zona de Cabalgamiento (Kmce) ..... 3.2-33
3.2.1.2.4 Intrusivos cretáceos ..... 3.2-34
3.2.1.2.5 Depósitos de Vertiente ..... 3.2-37
3.2.1.2.6 Depósitos Antrópicos – Llenos (Qll) ..... 3.2-38
3.2.1.3 Geología Estructural ..... 3.2-38
3.2.1.3.1 Estructuras de Cabalgamiento ..... 3.2-39
3.2.1.3.2 Fallas principales ..... 3.2-40
3.2.1.3.3 Diaclasas ..... 3.2-42
3.2.1.3.4 Foliación ..... 3.2-43
3.2.1.4 Geomorfología ..... 3.2-43
3.2.1.5 Sectorización Geológico – Geotécnica del Corredor ..... 3.2-44
3.2.1.5.1 Sector 1. Túnel El Seminario: (Km 5+050 - Km 5+900) ..... 3.2-44
3.2.1.5.2 Sector 2. Portal Norte Túnel El Seminario– Quebrada La Pastora. (Km 5+900 – Km 7+680) 3.2-46
3.2.1.5.3 Sector 3. Quebrada La Pastora – Quebrada La Espadera. Km 7+680 – Km 9+200 ..... 3.2-46
3.2.1.5.4 Sector 4. Quebrada La Espadera - Portal Occidental del Túnel De Santa Elena. Km 9+200 – Km 10+200 3.2-47
3.2.1.5.5 Sector 5. Portal Túnel de Santa Elena. (Km 10+200 – Km 11 + 400) ..... 3.2-48
3.2.1.5.6 Sector 6. Km 11+400 – Km 12+250 ..... 3.2-48
3.2.1.5.7 Sector 7. Km 12+250 – Km 14+800 ..... 3.2-48
3.2.1.5.8 Sector 8. Km 14+800 – Km 17+320 ..... 3.2-49
3.2.1.5.9 Sector 9. Km 17+320 – Km 18+520 ..... 3.2-49
3.2.1.5.10 Sector 10. Portal Oriental Túnel Santa Elena - Vía de Acceso Oriental A Sajonia. (Km 18+520 – Km 19+800) 3.2-50
*3.2.2 Geotecnia ..... 3.2-50*
3.2.2.1 Geotecnia del Túnel ..... 3.2-50
3.2.2.1.1 Exploraciones Geotécnicas y Ensayos ..... 3.2-50
3.2.2.1.2 Características del Macizo Rocoso ..... 3.2-59
3.2.2.2 Evaluación de laderas de las vías de acceso ..... 3.2-65
3.2.2.2.1 Exploraciones de campo ..... 3.2-66
3.2.2.2.2 Ensayos de laboratorio ..... 3.2-75
3.2.2.2.3 Análisis de resultados y estimación de parámetros ..... 3.2-79
3.2.2.2.4 Sectorización geotécnica del corredor vial ..... 3.2-80
*3.2.3 Suelos ..... 3.2-84*
3.2.3.1 Fisiografía ..... 3.2-84
3.2.3.1.1 Provincia fisiográfica ..... 3.2-84
3.2.3.1.2 Región climática ..... 3.2-84
3.2.3.1.3 Unidad climática ..... 3.2-84
3.2.3.1.4 Gran Paisaje ..... 3.2-84
3.2.3.1.5 Paisaje fisiográfico ..... 3.2-85

3.2.3.1.6 Asociaciones ..... 3.2-85
3.2.3.2 Área de Influencia Directa Puntual ..... 3.2-85
3.2.3.2.1 Asociación Rionegro (RN). ..... 3.2-86
3.2.3.2.2 Asociación Niquía (NQ). ..... 3.2-86
3.2.3.2.3 Asociación Tequendamita (TE). ..... 3.2-87
3.2.3.3 Áreas de influencia Directa Local ..... 3.2-87
3.2.3.4 Área de influencia Indirecta ..... 3.2-88
3.2.3.4.1 Asociación Guadua (GD). ..... 3.2-88
3.2.3.5 Usos del suelo y coberturas vegetales ..... 3.2-90
3.2.3.6 Uso potencial de suelo ..... 3.2-92
3.2.3.7 Vocación del uso del suelo ..... 3.2-94
3.2.3.8 Conflicto en el uso del suelo ..... 3.2-95
3.2.3.8.1 Sin conflicto (SC): ..... 3.2-95
3.2.3.8.2 Conflicto ligero (CL): ..... 3.2-95
3.2.3.8.3 Conflicto severo (CS): ..... 3.2-96
3.2.3.8.4 Conflicto muy severo (CMS): ..... 3.2-96
*3.2.4 Hidrología ..... 3.2-96*
3.2.4.1 Introducción ..... 3.2-96
3.2.4.2 Generalidades ..... 3.2-97
**3.2.4.2.1** Cuencas en el área de estudio ..... 3.2-97
3.2.4.2.2 Fuentes contaminantes ..... 3.2-100
3.2.4.3 Análisis Hidrológico ..... 3.2-101
3.2.4.3.1 Sistemas lenticos y lóticos ..... 3.2-101
3.2.4.3.2 Modelo digital del terreno y mapas de precipitación y evapotranspiración ..... 3.2-101
3.1.1.1.1 Parámetros morfométricos de las cuencas de estudio ..... 3.2-103
3.2.4.3.3 Caudales base para el estudio ..... 3.2-115
3.2.4.4 Evaluación hídrica ambiental ..... 3.2-122
3.2.4.4.1 Caudales medios y mínimos de las cuencas abastecedoras ..... 3.2-122
3.2.4.4.2 Índice de escasez ..... 3.2-126
3.2.4.4.3 Conflictos por uso del suelo ..... 3.2-129
3.2.4.5 Conclusiones ..... 3.2-137
*3.2.5 Calidad del agua ..... 3.2-138*
3.2.5.1 Descripción de estaciones de muestreo ..... 3.2-140
3.2.5.1.1 Cuenca Yerbabuena ..... 3.2-145
3.2.5.1.2 Santa Elena, sector de la vía cielo abierto occidental ..... 3.2-147
3.2.5.1.3 Subcuenca Santa Elena ..... 3.2-160
3.2.5.1.4 Subcuenca San Ignacio ..... 3.2-188
3.2.5.1.5 Subcuenca San Pedro ..... 3.2-194
3.2.5.1.6 Cuenca la cascada ..... 3.2-197
3.2.5.1.7 Cuenca del Rio Negro ..... 3.2-205
3.2.5.2 Calidad del agua Área de Influencia directa Puntual ..... 3.2-239
3.2.5.2.1 Cuenca Yerbabuena – Portal Sur Túnel Seminario ..... 3.2-239
3.2.5.2.2 Cuenca de la Quebrada Santa Elena en el tramo “Cielo Abierto” ..... 3.2-243
3.2.5.2.3 Cuenca de la Quebrada Santa Elena- Portal Occidental ..... 3.257
3.2.5.2.4 Cuenca Rionegro- Portal Oriental ..... 3.265
3.2.5.3 Calidad del agua Área de Influencia Directa Local ..... 3.272
3.2.5.3.1 Cuenca Santa Elena- Àrea de Influencia Local ..... 3.272
3.2.5.3.2 Subcuenca San Ignacio-Santa Elena ..... 3.290
3.2.5.3.3 Subcuenca San Pedro- Santa Elena ..... 3.300
3.2.5.3.4 Cuenca La Cascada Subcuenca La Cascada ..... 3.308
3.2.5.3.5 Subcuenca Honda ..... 3.316
3.2.5.3.6 Cuenca del Rio Negro ..... 3.323
*3.2.6 Usos del agua ..... 3.2-363*
3.2.6.1 Área de Influencia Directa ..... 3.2-363
3.2.6.2 Demanda actual del agua versus oferta hídrica ..... 3.2-363
3.2.6.3 Usos del Agua en el AID Puntual ..... 3.2-363
3.2.6.3.1 Análisis de resultados ..... 3.2-365

3.2.6.3.2 Usuarios del agua en el AID puntual diagnóstico actual ..... 3.2-366
3.2.6.3.3 Usuarios del agua del AID puntual proyecciones al período de análisis (20 años) ..... 3.2-370
3.2.6.4 Usos del agua en el AID Local ..... 3.2-374
3.2.6.4.1 Análisis de resultados ..... 3.2-388
3.2.6.4.2 Usuarios del agua en el AID local diagnóstico actual ..... 3.2-389
3.2.6.4.3 Usuarios del agua del AID local proyecciones al período de análisis (20 años) ..... 3.2-399
3.2.6.5 Usos del Agua AID ..... 3.2-406
3.2.6.5.1 Usuarios del agua del AID diagnóstico actual ..... 3.2-406
3.2.6.5.2 Usuarios del agua del AID proyecciones al período de análisis (20 años) ..... 3.2-410
3.2.6.6 Aguas intermitentes ..... 3.2-414
3.2.6.7 Aguas Continuas ..... 3.2-414
3.2.6.8 Humedales ..... 3.2-414
3.2.6.9 Nacimientos ..... 3.2-417
3.2.6.10 Dolinas ..... 3.2-418
3.2.6.11 Tanques de agua ..... 3.2-418
*3.2.7 Hidrogeología ..... 3.2-418*
3.2.7.1 Antecedentes Marco Hidrogeológico ..... 3.2-418
3.2.7.1.1 Estudio Hidrogeológico Año 2.000 ..... 3.2-418
3.2.7.1.2 Informe de diseño – hidrogeología (2009) ..... 3.2-423
3.2.7.1.3 Implementación del plan de monitoreo y seguimiento por parte del concesionario (noviembre 2012) 3.2-427
3.2.7.2 Modelo hidrogeológico conceptual ..... 3.2-431
**3.2.7.2.1** Propiedades hidráulicas de los complejos hidrogeológicos ..... 3.2-431
**3.2.7.2.2** Parâmetros hidráulicos de los complejos hidrogeológicos ..... 3.2-434
3.2.7.2.3 Descripción de los complejos hidrogeológicos ..... 3.2-437
3.2.7.2.4 Condiciones hidrogeológicas esperadas a lo largo de los túneles ..... 3.2-440
3.2.7.3 Balance Hidrogeológico y evaluación de la recarga ..... 3.2-444
3.2.7.3.1 Jerarquización de la red de drenaje superficial ..... 3.2-444
3.2.7.3.2 Balance hidrogeológico ..... 3.2-448
3.2.7.3.3 Conclusiones sobre el balance hidrogeológico ..... 3.2-449
3.2.7.4 Inventario de puntos de agua ..... 3.2-450
3.2.7.5 Comportamiento de la superficie piezométrica ..... 3.2-456
3.2.7.5.1 Niveles piezométrico medidos ..... 3.2-456
3.2.7.5.2 Mediciones en época de verano ..... 3.2-457
3.2.7.5.3 Mediciones en época de invierno ..... 3.2-458
3.2.7.5.4 Descripción de la superficie piezométrica ..... 3.2-462
3.2.7.6 Valoración de la presencia de agua en los túneles ..... 3.2-464
3.2.7.6.1 Agua drenada en el túnel seminario ..... 3.2-464
3.2.7.6.2 Agua drenada en el túnel santa elena ..... 3.2-469
3.2.7.7 Vulnerabilidad intrínseca del acuífero superficial (Método God) ..... 3.2-479
3.2.7.7.1 Cálculo de la vulnerabilidad con el Método God ..... 3.2-479
3.2.7.7.2 Escenario del riesgo de contaminación del acuífero superficial ..... 3.2-487
3.2.7.8 Probabilidad de afectación de los puntos de agua en superficie ..... 3.2-488
3.2.7.8.1 Método de cálculo ..... 3.2-489
3.2.7.8.2 Resultados ..... 3.2-497
*3.2.8 Atmósfera ..... 3.2-511*
3.2.8.1 Clima ..... 3.2-511
3.2.8.1.1 Vientos: ..... 3.2-513
3.2.8.1.2 Temperatura y Precipitación: ..... 3.2-513
3.2.8.1.3 Evapotranspiración ..... 3.2-517
3.2.8.1.4 Síntesis de los parámetros climáticos de referencia ..... 3.2-518
3.2.8.1.5 Humedad relativa: ..... 3.2-518
3.2.8.1.6 Brillo solar: ..... 3.2-519
3.2.8.2 Calidad del aire ..... 3.2-519
3.2.8.2.1 Concentración de material particulado PST ..... 3.2-519
3.2.8.2.2 Concentración de material particulado PM10 ..... 3.2-520
3.2.8.2.3 Concentración de óxidos de azufre ..... 3.2-521

3.2.8.2.4 Concentración de óxidos de nitrógeno ..... 3.2-522
3.2.8.2.5 Concentración de monóxido de carbono ..... 3.2-522
3.2.8.2.6 Rosa de vientos ..... 3.2-523
3.2.8.3 Ruido ..... 3.2-524
3.2.8.3.1 Punto 1: Portal Oriental Santa Elena ..... 3.2-525
3.2.8.3.2 Punto 2: Portal Occidental Santa Elena ..... 3.2-526
*3.2.9 Paisaje ..... 3.2-527*
3.2.9.1 Generalidades. ..... 3.2-527
3.2.9.2 Historia ..... 3.2-528
3.2.9.2.1 Túnel Baltimore ..... 3.2-528
3.2.9.2.2 Acceso Occidental ..... 3.2-529
3.2.9.2.3 Acceso Oriental ..... 3.2-529
3.2.9.3 Matriz ..... 3.2-529
3.2.9.3.1 Túnel Baltimore ..... 3.2-529
3.2.9.3.2 Acceso Occidental ..... 3.2-529
3.2.9.3.3 Acceso Oriental ..... 3.2-529
3.2.9.4 Parches ..... 3.2-530
3.2.9.4.1 Túnel Baltimore ..... 3.2-530
3.2.9.4.2 Acceso Occidental ..... 3.2-531
3.2.9.4.3 Acceso Oriental ..... 3.2-533
3.2.9.5 Corredores ..... 3.2-535
3.2.9.5.1 Acceso Occidental ..... 3.2-535
3.2.9.5.2 Acceso Oriental ..... 3.2-536
3.2.9.6 La dimensión perceptual del paisaje ..... 3.2-537
3.2.9.6.1 Túnel Baltimore y Acceso Occidental ..... 3.2-538
3.2.9.6.2 Túnel de Santa Elena ..... 3.2-539
3.2.9.6.3 Acceso Oriental ..... 3.2-540

# LISTADO DE TABLAS

Tabla 3-1 – Relación de las áreas de intervención puntual por el proyecto ..... 3.1-21
Tabla 3-2 – Relación de la remoción de vegetación por sitios de obra ..... 3.1-21
Tabla 3-3 – Fuentes susceptibles de afectación ..... 3.1-21
Tabla 3-4 - Veredas del Área de Influencia Directa Puntual componente socioeconómico ..... 3.1-22
Tabla 3-5 - Sistemas de acueducto en el área de Influencia Directa Puntual ..... 3.1-22
Tabla 3-6 - Fuentes Hídricas Permanentes Identificadas en el Área de Influencia Directa Local ..... 3.1-23
Tabla 3-7 - Fuentes intermitentes identificadas en el área de influencia directa local ..... 3.1-26
Tabla 3-8 - Veredas ubicadas en el área de influencia directa local componente socioeconómico ..... 3.1-26
Tabla 3-9 - Sistemas de acueducto en el Área de Influencia Directa Local ..... 3.1-26
Tabla 3-10 - Bienes de interés cultural en el Área de Influencia Directa Local ..... 3.1-27
Tabla 3-11 - Leyenda Geológica ..... 3.2-29
Tabla 3-12 - Perfil de meteorización de las Anfibolitas de Medellín ..... 3.2-30
Tabla 3-13 - Perfil de meteorización del Gneis de La Ceja ..... 3.2-32
Tabla 3-14 - Gneis Milonítico de Sajonia ..... 3.2-32
Tabla 3-15 - Perfil de meteorización de la Dunita de Medellín ..... 3.2-33
Tabla 3-16 - Perfil de meteorización de las rocas de Cabalgamiento ..... 3.2-34
Tabla 3-17 - Perfil de meteorización del Batolito Antioqueño ..... 3.2-34
Tabla 3-18 - Perfil de meteorización del Stock de Samarcanda ..... 3.2-35
Tabla 3-19 - Perfil de meteorización del Gabro de San Diego ..... 3.2-36
Tabla 3-20- Sectorización Geológica de los Túneles ..... 3.2-53
Tabla 3-21 - Resultados de Ensayos de Laboratorio del Portal Oriental ..... 3.2-56
Tabla 3-22 - Ensayos de Carga Puntual sobre Núcleos de Roca del Túnel ..... 3.2-56
Tabla 3-23 - Ensayos de Compresión sobre Núcleos de Roca del Túnel ..... 3.2-56
Tabla 3-24 - - Resumen de ensayos de laboratorio – Exploración túneles 2009 ..... 3.2-57
Tabla 3-25 - Resumen de ensayos de laboratorio – Exploración túneles 2009 (continuación) ..... 3.2-58
Tabla 3-26 - Levantamiento Estructural de Discontinuidades ..... 3.2-60
Tabla 3-27 - Sectorización Geotécnica del Túnel El Seminario ..... 3.2-62
Tabla 3-28 - Sectorización Geotécnica del Sistema Túnel de Santa Elena ..... 3.2-63
Tabla 3-29 - Evaluación de Laderas y Taludes ..... 3.2-66
Tabla 3-30 Corrección del SPT y estimativo de E y de □ a partir del Nspt para la penetración SPT-1A .. 3.2-68
Tabla 3-31 Corrección del SPT y estimativo de E y de □ a partir del Nspt para la penetración SPT-1B .. 3.2-68
Tabla 3-32 Corrección del SPT y estimativo de E y de □ a partir del Nspt para la penetración SPT-2 .... 3.2-68
Tabla 3-33 Corrección del SPT y estimativo de E y de ϕ a partir del Nspt para la penetración SPT-3 .... 3.2-69
Tabla 3-34- Corrección del SPT y estimativo de E y de □ a partir del Nspt para la penetración SPT-4 ..... 3.2-69
Tabla 3-35 - Corrección del SPT y estimativo de E y de □ a partir del Nspt para la penetración SPT-5 ..... 3.2-70
Tabla 3-36 - Corrección del SPT y estimativo de E y de □ a partir del Nspt para la penetración SPT-6 ..... 3.2-70
Tabla 3-37 - Corrección del SPT y estimativo de E y de □ a partir del Nspt para la penetración SPT-7 ..... 3.2-71
Tabla 3-38 - Corrección del SPT y estimativo de E y de □ a partir del Nspt para la penetración SPT-8 ..... 3.2-71
Tabla 3-39 - Resultados de los Ensayos de Laboratorio Realizados en este Estudio ..... 3.2-76
Tabla 3-40 - Resultados de los Ensayos de Laboratorio Realizados por Integral en el estudio del 2000 tramo acceso occidental ..... 3.2-77
Tabla 3-41 Inclinaciones recomendadas para los terraplenes ..... 3.2-83
Tabla 3-42 - Categorías fisiográficas del área de estudio ..... 3.2-85
Tabla 3-43 - Unidades de suelos en el área de influencia directa puntual ..... 3.2-85
Tabla 3-44 - Unidades de suelos en el área de influencia directa local ..... 3.2-87
Tabla 3-45 - Unidades de suelos en el área de influencia indirecta ..... 3.2-88
Tabla 3-46- Uso del suelo y coberturas vegetales en el área de estudio ..... 3.2-90

Tabla 3-47- Usos potenciales por clase agrológica ..... 3.2-92
Tabla 3-48 - Afluentes de la quebrada Santa Elena y caudal promedio aforado ..... 3.2-98
Tabla 3-49 - Permisos de vertimientos otorgados y vigentes por CORNARE ..... 3.2-101
Tabla 3-50 - Parámetros morfométricos de las cuencas de estudio ..... 3.2-105
Tabla 3-51 - Propiedades lineales de la red de drenaje de las cuencas de estudio ..... 3.2-107
Tabla 3-52 - Propiedades de Relieve, áreas de las cuencas estudiadas ..... 3.2-108
Tabla 3-53 - Estaciones utilizadas para construir del mapa de precipitación de la zona de estudio ..... 3.2-109
Tabla 3-54 - Ciclo anual de caudales adimensionales de la estación Piedras Blancas ..... 3.2-116
Tabla 3-55 - Caudales medios para las cuencas Principales de la zona de estudio ..... 3.2-118
Tabla 3-56 - Caudales mínimos para las cuencas principales, calculado por el Método I y el Método III de la revista hidrometeorológica de EPM. ..... 3.2-120
Tabla 3-57 - Caudales máximos de las cuencas principales, calculados con las ecuaciones de regionalización de los Balances hidrológicos y atlas digital de Antioquia ..... 3.2-120
Tabla 3-58 - Caudales máximos de las cuencas principales, calculados con las ecuaciones de regionalización de la cartilla hidrológica de Antioquia para la zona de embalses ..... 3.2-121
Tabla 3-59 - Caudales Ecológicos de las cuencas principales de la zona de estudio ..... 3.2-122
Tabla 3-60 - Caudales medios estimados para las captaciones de los acueductos de la zona ..... 3.2-123
Tabla 3-61 - Caudales medios mensuales multianuales para las cuencas principales (m3/s) ..... 3.2-124
Tabla 3-62 - Caudales medios mensuales multianuales para las cuencas abastecedoras de los acueductos (l/s) ..... 3.2-125
Tabla 3-63 - Caudales Ecológicos de las captaciones de los acueductos dentro del área de influencia del túnel ..... 3.2-125
Tabla 3-64 - Índice de escases para las cuencas principales de la zona de estudio ..... 3.2-127
Tabla 3-65 - Índice de escasez ..... 3.2-127
Tabla 3-66 - Índice de escases para las captaciones de los acueductos dentro de la zona de influencia del túnel ..... 3.2-128
Tabla 3-67 - Conflictos de usos del suelo en el área de influencia de los acueductos veredales ..... 3.2-135
Tabla 3-68 - Valores típicos en aguas crudas superficiales ..... 3.2-139
Tabla 3-69 - Valores de Índice de Calidad del Agua ICAfa ..... 3.2-140
Tabla 3-70- Estaciones muestreadas dentro del Área de Influencia Directa Puntual ..... 3.2-141
Tabla 3-71 - Fuentes Intermitentes dentro del Área de Influencia Puntual ..... 3.2-141
Tabla 3-72 - Fuentes de agua analizadas dentro del área de Influencia Directa Local ..... 3.2-142
Tabla 3-73 - Fuentes de agua Intermitentes dentro del Área de Influencia Local ..... 3.2-143
Tabla 3-74- Ubicación de las estaciones de muestreo sobre la cuenca La Cascada, en el municipio de Guarne ..... 3.2-198
Tabla 3-75 - Análisis fisicoquímicos in situ y ex situ en las estaciones de la Cuenca Yerbabuena ..... 3.2-239
Tabla 3-76 - Calidad del agua en las estaciones de la Cuenca Yerbabuena ..... 3.2-243
Tabla 3-77 - Análisis fisicoquímicos in situ y ex situ en las estaciones del área de las quebradas del tramo “Cielo abierto”, cuenca media de la Q. Santa Elena ..... 3.245
Tabla 3-78 - Calidad del agua en las estaciones de la Quebrada Santa Elena y parte alta de algunos de sus afluentes ..... 3.256
Tabla 3-79 - Resultados de los análisis fisicoquímicos in situ y ex situ en las estaciones del área de influencia del túnel, subcuenca de la Quebrada Santa Elena ..... 3.257
Tabla 3-80 - Calidad de Agua para las estaciones de la Cuenca Santa Elena Portal Oriental. ..... 3.264
Tabla 3-81 - Resultados de las variables fisicoquímicas de las estaciones de la Q. La Salazar pertenecientes al área de influencia puntual. ..... 3.265
Tabla 3-82 - Calidad de Agua para las estaciones de la Cuenca Rionegro Portal Oriental. ..... 3.272
Tabla 3-83 - Resultados de los análisis fisicoquímicos in situ y ex situ en las estaciones del área de influencia directa local del túnel, subcuenca de la Quebrada Santa Elena. ..... 3.273
Tabla 3-84 - Resultados de los análisis fisicoquímicos in situ y ex situ en las estaciones del área de influencia directa local del túnel, subcuenca de la Quebrada Santa Elena. ..... 3.275

Tabla 3-85 - Calidad del agua en las estaciones de la Quebrada Santa Elena, parte alta. ..... 3.288
Tabla 3-86 - Resultados de los análisis fisicoquímicos in situ y ex situ en la subcuenca de la Quebrada San Ignacio..... 3.290
Tabla 3-87 - Calidad del agua en las estaciones de la Q. San Ignacio, afluente de la Q. Santa Elena..... 3.298
Tabla 3-88 - Análisis fisicoquímicos in situ y ex situ en las estaciones del área de influencia del túnel, subcuenca de la Quebrada San Pedro. ..... 3.300
Tabla 3-89 - Calidad del agua en las estaciones de la Q. San Ignacio, afluente de la Q. Santa Elena..... 3.308
Tabla 3-90 - Resultados de los análisis fisicoquímicos in situ y ex situ en las estaciones del área de influencia del túnel, subcuenca de las Quebrada La Cascada ..... 3.308
Tabla 3-91 - Sólidos totales, suspendidos, disueltos y sedimentarios en las estaciones de la Q. La Cascada y sus afluentes. ..... 3.310
Tabla 3-92 - Conductividad y turbiedad en las estaciones de la Q. La Cascada y sus afluentes. ..... 3.311
Tabla 3-93 - Calidad del agua en las estaciones de la Q. La Cascada, afluente de La Honda, cuenca La Cascada. ..... 3.316
Tabla 3-94 - Calidad del agua en las estaciones de la Q.La Honda, afluente de La Cascada. ..... 3.323
Tabla 3-95 - Resultados de los análisis fisicoquímicos in situ y ex situ en las estaciones del área de influencia del túnel, subcuenca de la Q. La Hondina..... 3.324
Tabla 3-96 - Calidad del agua en las estaciones de la Q.La Hondina y sus afluentes. ..... 3.333
Tabla 3-97 - Resultados de los análisis fisicoquímicos in situ y ex situ en las estaciones del área de influencia del túnel, subcuenca de la Q. La Flloresta. ..... 3.334
Tabla 3-98 - Calidad del agua en las estaciones de la Q.La Floresta, afluente de la Q. Yarumal.. ..... 3.342
Tabla 3-99 - Resultados de los análisis fisicoquímicos in situ y ex situ en las estaciones de la Q. Yarumal. 3.342
Tabla 3-100 - Calidad del agua en las estaciones de la Q. Yarumal ..... 3.352
Tabla 3-101 - Variables fisicoquímicas de las estaciones de la Q. La Salazar. ..... 3.353
Tabla 3-102 -Calidad del agua en las estaciones de la Q. La Salazar, afluente de la Q. Yarumal.. ..... 3.362
Tabla 3-103 - Fuentes susceptibles de afectación. ..... 3.2-363
Tabla 3-104 - Grupo de usuarios del AID puntual. ..... 3.2-364
Tabla 3-105 - Grupo de usuarios del AID local. ..... 3.2-374
Tabla 3-106 - Unidades principales para la definición del modelo geológico ..... 3.2-425
Tabla 3-107 - Caudales de las corrientes superficiales identificadas en el techo del túnel ..... 3.2-427
Tabla 3-108- Valores de permeabilidad tomados de los estudios previos al presente estudio complementario. Se incluyen pruebas tipo lugeon y pruebas tipo Lefranc ..... 3.2-432
Tabla 3-109 - Resultados Pruebas hidráulicas Ejecutadas por Geodata..... 3.2-433
Tabla 3-110 - Parámetros hidráulicos de los diferentes unidades o complejos hidrogeológicos que se prevé serán interceptados por los túneles Seminario y Santa Elena..... 3.2-434
Tabla 3-111 - Leyenda Hidrogeológica ..... 3.2-438
Tabla 3-112 - Descripción de la permeabilidad de acuerdo a la norma AFTES ..... 3.2-438
Tabla 3-113 - Jerarquización de la red hidrográfica relacionada con los túneles Seminario y Santa Elena ... 3.2-446
Tabla 3-114 - Jerarquización de 64 puntos localizados sobre cursos de agua superficiales que se monitorean ..... 3.2-447
Tabla 3-115 - Valores mínimos, medios y máximos del balance hidrogeológico en las cuencas Santa Elena y La Aguadita ..... 3.2-448
Tabla 3-116 - Valores mínimos, medios y máximos del balance hidrogeológico en las cuencas El Yarumo, La Cascada, La Honda y Salazar..... 3.2-449
Tabla 3-117 - Valores mínimos, medios y máxmos del balance hidrogeológico en la cuanca interceptada por el Túnel Seminario ..... 3.2-449
Tabla 3-118 - Valores de los litotipos considerados..... 3.2-454
Tabla 3-119 - Red de monitoreo piezométrico en periodos de verano e invierno a lo largo del túnel Santa Elena ..... 3.2-457
Tabla 3-120. Red de monitoreo piezométrico en periodos de invierno a lo largo del túnel Seminario... 3.2-457

Tabla 3-121 - Caudal estabilizado tramo por tramo en el túnel Seminario considerando la construcción de un sólo tubo con y sin tratamientos de impermeabilización a través de pre-inyecciones ..... 3.2-466
Tabla 3-122 - Caudal estabilizado tramo por tramo en el túnel Seminario considerando la construcción de dos tubos con y sin tratamientos de impermeabilización a través de pre-inyecciones ..... 3.2-468
Tabla 3-123 - Caudal estabilizado esperado tramo por tramo en el túnel Santa Elena con y sin pre-inyecciones y considerando la presencia de uno sólo tubo ..... 3.2-472
Tabla 3-124 - Caudal estabilizado tramo por tramo drenado por el túnel Santa Elena con y sin pre-inyecciones y considerando la presencia de dos tubos ..... 3.2-476
Tabla 3-125 - Lista de los tres parámetros considerados en el método G.O.D. para la valoración de la vulnerabilidad del agua subterránea. Para cada uno de los tres parámetros se indican las clases consideradas y su respectiva puntuación ..... 3.2-480
Tabla 3-126. Valor de parámetro G para depósitos cuaternarios ..... 3.2-481
Tabla 3-127. Valor del parámetro G para macizos alterados ..... 3.2-482
Tabla 3-128 - Descripción de las ocho (8) variables del sistema acuífero-túnel y definición de los índices correspondientes ..... 3.2-496
Tabla 3-129. Grado de probabilidad de afectación de los manantiales ..... 3.2-497
Tabla 3-130 - Probabilidad de impacto de los puntos de agua en el sector del Túnel Santa Elena ..... 3.2-499
Tabla 3-131 - Lista y caudal de los puntos de agua subterránea con probabilidad de impacto bajo a medio-alto para el Túnel Santa Elena. Para la época de invierno se ha tomado la medición de mayor valor. 3.2-499
Tabla 3-132 - Impacto sobre los puntos críticos del retículo hidrográfico presente en la zona de influencia del túnel Santa Elena en ausencia de pre-inyecciones ..... 3.2-501
Tabla 3-133 - Caudales de los cursos de agua en los puntos críticos con clases de DHI 2 y 3 y caudales previstos en el túnel. Escenario considerado: un tubo sin pre-inyecciones ..... 3.2-502
Tabla 3-134 - Caudales de los cursos de agua en los puntos críticos con clases de DHI 2 y 3 y caudales previstos en el túnel. Escenario considerado: dos tubos sin pre-inyecciones ..... 3.2-503
Tabla 3-135 - Cálculo del balance realizado en las cuencas en las cuales se localizan los puntos críticos en donde no se realizó una medida directa del caudal ..... 3.2-504
Tabla 3-136 - Cantidad de agua que permanecería en los cursos de agua superficial en el caso que ocurra el drenaje a través del túnel previsto en la Tabla 3-133 (un tubo sin pre-inyecciones) ..... 3.2-505
Tabla 3-137 - Cantidad de agua que permanecería en los cursos de agua superficial en el caso que ocurra el drenaje a través del túnel previsto en la Tabla 3-134 (2 tubos con y sin pre-inyecciones) ..... 3.2-506
Tabla 3-138 - Impacto sobre los puntos de aguas subterráneas en el sector del Túnel Seminario ..... 3.2-507
Tabla 3-139 - Ubicación y tipo de punto de agua con valor de DHI bajo a medio-alto para el Túnel Seminario ..... 3.2-508
Tabla 3-140 - Estimación del tiempo de intercepción de las fallas conexas con los puntos de agua con índice DHI iguales a 2 y 3 durante la excavación del Túnel Santa Elena desde el portal Occidental, de las PK 10+330 hasta la PK14+423 ..... 3.2-509
Tabla 3-141 - . Estimación del tiempo de intercepción de las fallas conexas con los puntos de agua con índice DHI iguales a 2 y 3 durante la excavación del Túnel Santa Elena desde el portal oriental, de las PK 18+517 hasta la PK 14+424 ..... 3.2-510
Tabla 3-142 - Estaciones termo-pluviométricas tomadas como referencia para el área de estudio ..... 3.2-512
Tabla 3-143 - Valores de precipitación y temperatura registrados en las estaciones meteorológicas de referencia ..... 3.2-513
Tabla 3-144 - Comparación de la precipitación media medida durante veinte años en las estaciones de referencia y la media obtenida entre mayo/2012 y abril/2013 para las tres estaciones instaladas por el Concesionario ..... 3.2-516
Tabla 3-145 - Evapotranspiración media anual en las estaciones de referencia ..... 3.2-518
Tabla 3-146. Precipitación y evapotranspiración real media anual ..... 3.2-518
Tabla 3-147 - Concentración de material particulado PST. ..... 3.2-520
Tabla 3-148 - Concentración de material particulado PM10. ..... 3.2-520

Tabla 3-149 - Concentración de óxidos de azufre. ..... 3.2-521
Tabla 3-150 - Concentración de óxidos de nitrógeno. ..... 3.2-522
Tabla 3-151 - Concentración de monóxido de carbono. ..... 3.2-522
Tabla 3-152 - Estándares máximos permisibles de niveles de ruido ambiental, expresados en decibeles DB(A). ..... 3.2-524
Tabla 3-153 - Puntos de muestreo que sobrepasan los niveles máximos permisibles para sector D en el Portal Oriental Santa Elena. ..... 3.2-526
Tabla 3-154 - Puntos de muestreo que sobrepasan los niveles máximos permisibles para sector D en el Portal Occidental Santa Elena. ..... 3.2-526
Tabla 3-155 - Puntos de muestreo que sobrepasan los niveles máximos permisibles para sector C en el Portal Occidental Santa Elena. ..... 3.2-527
Tabla 3-156 Coberturas vegetales Túnel Baltimore. ..... 3.2-528
Tabla 3-157 Coberturas vegetales Acceso occidental ..... 3.2-528
Tabla 3-158 Coberturas vegetales Acceso oriental ..... 3.2-528
Tabla 3-159 Parche en Pasto ..... 3.2-530
Tabla 3-160 Parche en Bosque plantado ..... 3.2-530
Tabla 3-161 - Parche en Bosque natural fragmentado ..... 3.2-530
Tabla 3-162 - Parche en Mosaico pastos y espacios naturales ..... 3.2-531
Tabla 3-163 - Parche en Pastos limpios ..... 3.2-531
Tabla 3-164 Parche en Tejido urbano continuo ..... 3.2-532
Tabla 3-165 Parche en Mosaico cultivo, pasto y espacios naturales ..... 3.2-533
Tabla 3-166 Parche en Bosque natural fragmentado ..... 3.2-533
Tabla 3-167 Parche en Pasto enmalezado ..... 3.2-533
Tabla 3-168 Parche en Mosaico cultivos, pasto y espacios naturales ..... 3.2-534
Tabla 3-169 Parche en Zonas verdes artificializadas no agrícolas ..... 3.2-534
Tabla 3-170 Parche en Bosque plantado ..... 3.2-534
Tabla 3-171 Parche en Tierras desnudas o degradadas ..... 3.2-535
Tabla 3-172 Cauces Sector Occidental ..... 3.2-536
Tabla 3-173 Vías principales sector Oriental ..... 3.2-537
Tabla 3-174 Cauces Sector Oriental ..... 3.2-537

# LISTADO DE FIGURAS

Figura 3-1 - Zonas posibles de falla en el trazado del túnel Seminario ..... 3.2-40
Figura 3-2 - Litoteca del proyecto..... 3.2-51
Figura 3-3 - Perforaciones sobre el alineamiento de los Túneles del Seminario..... 3.2-52
Figura 3-4 - Perforaciones sobre los ejes de los túneles Santa Elena..... 3.2-53
Figura 3-5 - Análisis estereográfico de las discontinuidades en Km12+000 del Túnel Santa Elena ..... 3.2-61
Figura 3-6 - Representación gráfica de las posibles cuñas en el túnel Santa Elena en el Km12+000..... 3.2-62
Figura 3-7 Mapa de unidades o asociaciones de suelos en el área de estudio ..... 3.2-90
Figura 3-8 - Usos del Suelo ..... 3.2-92
Figura 3-9 Clases agrológicas de los Suelos, Anexo 16. Mapas temáticos clases agrológicas ..... 3.2-94
Figura 3-10 - Potencial de suelos..... 3.2-95
Figura 3-11 - Localización de cuencas en el área de influencia del proyecto (Anexo 3-16 Localización_cuencas)..... 3.2-100
Figura 3-12 - Modelo Digital de Elevación (MDE)..... 3.2-103
Figura 3-13 - Mapa de Pendientes. ..... 3.2-108
Figura 3-14 - Mapa de precipitación de la zona de estudio. ..... 3.2-111
Figura 3-15 - Variación mensual multianual de precipitación estación La Selva (2308504). ..... 3.2-112
Figura 3-16 - Variación mensual multianual de precipitación Santa Elena (2701810). ..... 3.2-112
Figura 3-17 - Variación mensual multianual estación Apto Olaya Herrera (2701507). ..... 3.2-113
Figura 3-18 - Variación mensual multianual estación Apto José María Córdova (2308520). ..... 3.2-113
Figura 3-19 - Campos de Temperatura y Evapotranspiración ..... 3.2-114
Figura 3-20 - Variación interanual de los caudales medios, máximos y mínimos estación Piedras Blancas.. 3.2-115
Figura 3-21 - Variación interanual de los caudales medios, máximos y mínimos estación Piedras Blancas.. 3.2-116
Figura 3-22 - Comportamiento adimensional esperado en las cuencas de estudio..... 3.2-117
Figura 3-23 - Esquema del balance hidrológico sobre una cuenca (tomado de UNAL, 2005)..... 3.2-118
Figura 3-24 - Ubicación de los sitios de captación de los acueductos..... 3.2-123
Figura 3-25 - 3 Mapa Conflictos por uso del suelo acueducto YARUMAGUAS ..... 3.2-130
Figura 3-26 - Mapa Conflictos por uso del suelo acueducto ARSA..... 3.2-130
Figura 3-27 - Mapa Conflictos por uso del suelo acueducto CONHYDRA..... 3.2-131
Figura 3-28 - Mapa Conflictos por uso del suelo acueducto Aguas del Mirador..... 3.2-131
Figura 3-29 - Mapa Conflictos por uso del suelo acueducto Corporación Acueducto San Pedro ..... 3.2-132
Figura 3-30 - Mapa Conflictos por uso del suelo acueducto ASUASI (La Mina). ..... 3.2-132
Figura 3-31 - 3 Mapa Conflictos por uso del suelo acueducto ASUASI (La Negra 2)..... 3.2-133
Figura 3-32 - Mapa Conflictos por uso del suelo acueducto ASUASI (La Negra 1). ..... 3.2-133
Figura 3-33 - Mapa Conflictos por uso del suelo acueducto Media Luna. ..... 3.2-134
Figura 3-34 - Mapa Conflictos por uso del suelo acueducto Las Flores..... 3.2-134
Figura 3-35 - Mapa Conflictos por uso del suelo acueducto Multiveredal Santa Elena ..... 3.2-135
Figura 3-36 - Mapa Conflictos por uso del suelo acueducto La Palma/8 de Marzo/Juan Pablo II/ Barrios de Jesús..... 3.2-135
Figura 3-37 - Estaciones de muestreo Cuenca La Cascada (Anexo 16 Muestreo_La_Cascada) ..... 3.2-144
Figura 3-38 - Estaciones de muestreo Cuenca La Yarumal (Anexo 16 Muestreo_La_Yarumal) ..... 3.2-145
Figura 3-39 Estaciones de muestreo Cuenca Santa Elena (Anexo 16 Muestreo_Santa_Elena) ..... 3.2-145
Figura 3-40 - Estaciones de muestreo Cuenca Yerbabuena (Anexo 16 Muestreo_Yerbabuena)..... 3.2-145
Figura 3-41 - Estación Ye1 Quebrada La Grilla Esquema del sitio de muestreo de acuerdo con el protocolo de Ausrivas para cuerpos de agua de alto gradiente..... 3.2-146

Figura 3-42 - Estación Ye2 Quebrada La Loma 2 aguas arriba del eje. Esquema del sitio de muestreo de acuerdo con el protocolo de Ausrivas para cuerpos de agua de alto gradiente ..... 3.2-147
Figura 3-43 - Estación CA1 Quebrada La Espadera aguas arriba del eje. Esquema del sitio de muestreo de acuerdo con el protocolo de Ausrivas para cuerpos de agua de alto gradiente ..... 3.2-149
Figura 3-44 - Estación CA2 Quebrada La Espadera aguas abajo del eje Esquema del sitio de muestreo de acuerdo con el protocolo de Ausrivas para cuerpos de agua de alto gradiente ..... 3.2-150
Figura 3-45 - Estación CA3 Quebrada el Chupadero aguas arriba. Esquema del sitio de muestreo de acuerdo con el protocolo de Ausrivas para cuerpos de agua de alto gradiente ..... 3.2-151
Figura 3-46 - Estación CA4 Quebrada Cañada negra. Esquema del sitio de muestreo de acuerdo con el protocolo de Ausrivas para cuerpos de agua de alto gradiente ..... 3.2-152
Figura 3-47 - Estación CA5 Quebrada la Pastora aguas abajo. Esquema del sitio de muestreo de acuerdo con el protocolo de Ausrivas para cuerpos de agua de alto gradiente ..... 3.2-153
Figura 3-48 - Estación CA6 Quebrada Marquetalia. Esquema del sitio de muestreo de acuerdo con el protocolo de Ausrivas para cuerpos de agua de alto gradiente ..... 3.2-154
Figura 3-49 - Estación CA7 Quebrada Caunces aguas arriba. Esquema del sitio de muestreo de acuerdo con el protocolo de Ausrivas para cuerpos de agua de alto gradiente. ..... 3.2-155
Figura 3-50 - Estación CA8 Quebrada Caunces Aguas Abajo. Esquema del sitio de muestreo de acuerdo con el protocolo de Ausrivas para cuerpos de agua de alto gradiente ..... 3.2-156
Figura 3-51 - Estación CA9 Quebrada la India aguas arriba. Esquema del sitio de muestreo de acuerdo con el protocolo de Ausrivas para cuerpos de agua de alto gradiente ..... 3.2-157
Figura 3-52 - Estación CA10 Quebrada la India aguas abajo. Esquema del sitio de muestreo de acuerdo con el protocolo de Ausrivas para cuerpos de agua de alto gradiente ..... 3.2-158
Figura 3-53 - Estación CA11 Quebrada La Cangreja. Esquema del sitio de muestreo de acuerdo con el protocolo de Ausrivas para cuerpos de agua de alto gradiente ..... 3.2-159
Figura 3-54 - Estación CA12 Quebrada la Cangreja aguas abajo. Esquema del sitio de muestreo de acuerdo con el protocolo de Ausrivas para cuerpos de agua de alto gradiente ..... 3.2-160
Figura 3-55 - Estación SE1-Quebrada Cerro Verde. Esquema del sitio de muestreo de acuerdo con el protocolo de Ausrivas para cuerpos de agua de alto gradiente ..... 3.2-162
Figura 3-56 Estación SE2-“Afloramiento Quebrada Santa Elena”. Esquema del sitio de muestreo de acuerdo con el protocolo de Ausrivas para cuerpos de agua de alto gradiente ..... 3.2-163
Figura 3-57 - Quebrada El Cedro. Esquema del sitio de muestreo de acuerdo con el protocolo de Ausrivas para cuerpos de agua de alto gradiente ..... 3.2-164
Figura 3-58 - Estación El Cedro I Esquema del sitio de muestreo de acuerdo con el protocolo de Ausrivas para cuerpos de agua de alto gradiente ..... 3.2-165
Figura 3-59 - Estación SE5. Quebrada Santa Elena- Finca Bella Alejandra Esquema del sitio de muestreo de acuerdo con el protocolo de Ausrivas para cuerpos de agua de alto gradiente ..... 3.2-166
Figura 3-60 - Estación SE6 Quebrada La Escorrentía Esquema del sitio de muestreo de acuerdo con el protocolo de Ausrivas para cuerpos de agua de alto gradiente ..... 3.2-167
Figura 3-61 - Confluencia San Ignacio- Santa Elena Esquema del sitio de muestreo de acuerdo con el protocolo de Ausrivas para cuerpos de agua de alto gradiente ..... 3.2-168
Figura 3-62 - Estación SE8 Quebrada La Avícola Esquema del sitio de muestreo de acuerdo con el protocolo de Ausrivas para cuerpos de agua de alto gradiente..... 3.2-169
Figura 3-63 - Estación SE9: Quebrada Santa Teresa, Esquema del sitio de muestreo de acuerdo con el protocolo de Ausrivas para cuerpos de agua de alto gradiente ..... 3.2-170
Figura 3-64 - Estación SE10 Quebrada Paysandú 1 Esquema del sitio de muestreo de acuerdo con el protocolo de Ausrivas para cuerpos de agua de alto gradiente ..... 3.2-171
Figura 3-65 - Estación SE11Quebrada Paysandú Esquema del sitio de muestreo de acuerdo con el protocolo de Ausrivas para cuerpos de agua de alto gradiente..... 3.2-172
Figura 3-66 - Estación SE12 Quebrada La Torre Esquema del sitio de muestreo de acuerdo con el protocolo de Ausrivas para cuerpos de agua de alto gradiente..... 3.2-173

Figura 3-67 - Estación SE13 Quebrada Santa Lucia Esquema del sitio de muestreo de acuerdo con el protocolo de Ausrivas para cuerpos de agua de alto gradiente ..... 3.2-174
Figura 3-68 - Estación SE14 Quebrada Santa Elena 2 Esquema del sitio de muestreo de acuerdo con el protocolo de Ausrivas para cuerpos de agua de alto gradiente ..... 3.2-175
Figura 3-69 - Estación SE15 Quebrada el Yarumo Esquema del sitio de muestreo de acuerdo con el protocolo de Ausrivas para cuerpos de agua de alto gradiente..... 3.2-176
Figura 3-70 - Confluencia El Yarumo y Las Antenas Esquema del sitio de muestreo de acuerdo con el protocolo de “Ausrivas para cuerpos de agua de alto gradiente” ..... 3.2-177
Figura 3-71 - Quebrada El Placer parte alta Esquema del sitio de muestreo de acuerdo con el protocolo de Ausrivas para cuerpos de agua de alto gradiente..... 3.2-178
Figura 3-72 - Quebrada El Placer aguas abajo Esquema del sitio de muestreo de acuerdo con el protocolo de “Ausrivas para cuerpos de agua de alto gradiente ..... 3.2-179
Figura 3-73 - Quebrada Santa Elena 3 Esquema del sitio de muestreo de acuerdo con el protocolo de Ausrivas para cuerpos de agua de alto gradiente..... 3.2-180
Figura 3-74 - Estación SE20 Quebrada Santa Bárbara Parte Alta Esquema del sitio de muestreo de acuerdo con el protocolo de “Ausrivas para cuerpos de agua de alto gradiente..... 3.2-181
Figura 3-75 - Estación SE21: Quebrada La Espadera ..... 3.2-182
Figura 3-76 - Estación SE22 Quebrada la Bisarra Esquema del sitio de muestreo de acuerdo con el protocolo de Ausrivas para cuerpos de agua de alto gradiente..... 3.2-183
Figura 3-77 - Quebrada La Aguadita- Portal Occidental Esquema del sitio de muestreo de acuerdo con el protocolo de Ausrivas para cuerpos de agua de alto gradiente ..... 3.2-184
Figura 3-78 - Quebrada la Bonanza Esquema del sitio de muestreo de acuerdo con el protocolo de Ausrivas para cuerpos de agua de alto gradiente ..... 3.2-185
Figura 3-79 - Quebrada Chiqueros Esquema del sitio de muestreo de acuerdo con el protocolo de Ausrivas para cuerpos de agua de alto gradiente ..... 3.2-186
Figura 3-80 - Confluencia La Bocana – Santa Elena. Esquema del sitio de muestreo de acuerdo con el protocolo de Ausrivas para cuerpos de agua de alto gradiente ..... 3.2-188
Figura 3-81 - Estación SI1- Quebrada San Ignacio. Esquema del sitio de muestreo de acuerdo con el protocolo de Ausrivas para cuerpos de agua de alto gradiente ..... 3.2-189
Figura 3-82 - Estación SI2- Quebrada “La Matilda” (afluente San Ignacio). Esquema del sitio de muestreo de acuerdo con el protocolo de Ausrivas para cuerpos de agua de alto gradiente ..... 3.2-190
Figura 3-83 - Estación SI3- Quebrada Afloramiento (Lago). Esquema del sitio de muestreo de acuerdo con el protocolo de Ausrivas para cuerpos de agua de alto gradiente ..... 3.2-191
Figura 3-84 - Estación SI4- Quebrada Los Chorlitos. Esquema del sitio de muestreo de acuerdo con el protocolo de Ausrivas para cuerpos de agua de alto gradiente ..... 3.2-192
Figura 3-85 - Estación SI5 - Quebrada “Los Chorlitos en la batea”. Esquema del sitio de muestreo de acuerdo con el protocolo de Ausrivas para cuerpos de agua de alto gradiente ..... 3.2-193
Figura 3-86 - Estación SI6 - Quebrada “Amagamiento frio”. Esquema del sitio de muestreo de acuerdo con el protocolo de Ausrivas para cuerpos de agua de alto gradiente. ..... 3.2-194
Figura 3-87 - Estación SPI - Quebrada San Pedro parte alta. Esquema del sitio de muestreo de acuerdo con el protocolo de Ausrivas para cuerpos de agua de alto gradiente ..... 3.2-195
Figura 3-88 - Estación SP2 - Quebrada San Pedro (acueducto). Esquema del sitio de muestreo de acuerdo con el protocolo de Ausrivas para cuerpos de agua de alto gradiente ..... 3.2-196
Figura 3-89 - Estación SP3 - Quebrada San Pedro (Aguas abajo del acueducto). Esquema del sitio de muestreo de acuerdo con el protocolo de Ausrivas para cuerpos de agua de alto gradiente ... 3.2-197
Figura 3-90 - Estación C1: Quebrada Doña Clara. Esquema del sitio de muestreo de acuerdo con el protocolo de Ausrivas para cuerpos de agua de alto gradiente..... 3.2-199
Figura 3-91 - Estación C2: Quebrada Dos Captaciones. Esquema del sitio de muestreo de acuerdo con el protocolo de Ausrivas para cuerpos de agua de alto gradiente ..... 3.2-200

Figura 3-92 - Estación C3 Quebrada Adonaí. Esquema del sitio de muestreo de acuerdo con el protocolo de Ausrivas para cuerpos de agua de alto gradiente ..... 3.2-201
Figura 3-93 - Estación C4: Quebrada la. Cascada Esquema del sitio de muestreo de acuerdo con el protocolo de Ausrivas para cuerpos de agua de alto gradiente ..... 3.2-202
Figura 3-94- Estación Ho1 Quebrada Manguruma. Esquema del sitio de muestreo de acuerdo con el protocolo de Ausrivas para cuerpos de agua de alto gradiente ..... 3.2-203
Figura 3-95 - Estación Ho2 Quebrada Villanueva. Esquema del sitio de muestreo de acuerdo con el protocolo de Ausrivas para cuerpos de agua de alto gradiente ..... 3.2-204
Figura 3-96 - Estación H1: Quebrada Cerro Verde Esquema del sitio de muestreo de acuerdo con el protocolo de Ausrivas para cuerpos de agua de alto gradiente ..... 3.2-206
Figura 3-97 - Estación H2: Quebrada Cerro Verde aguas abajo acueducto los Atehortua. Esquema del sitio de muestreo de acuerdo con el protocolo de Ausrivas para cuerpos de agua de alto gradiente ... 3.2-207
Figura 3-98 - Estación H3 Aguas arriba del acueducto de los Parra. Esquema del sitio de muestreo de acuerdo con el protocolo de Ausrivas para cuerpos de agua de alto gradiente ..... 3.2-208
Figura 3-99 - Estación H4: Aguas abajo acueducto los Parra. Esquema del sitio de muestreo de acuerdo con el protocolo de Ausrivas para cuerpos de agua de alto gradiente ..... 3.2-209
Figura 3-100 - Estación H5 Quebrada Hondina 2. Esquema del sitio de muestreo de acuerdo con el protocolo de Ausrivas para cuerpos de agua de alto gradiente ..... 3.2-210
Figura 3-101 - Estación H6 Quebrada la Hondina 1 Esquema del sitio de muestreo de acuerdo con el protocolo de Ausrivas para cuerpos de agua de alto gradiente ..... 3.2-211
Figura 3-102 - Estación F1 Quebrada La Floresta Parte Alta Esquema del sitio de muestreo de acuerdo con el protocolo de Ausrivas para cuerpos de agua de alto gradiente ..... 3.2-213
Figura 3-103 - Estación F2 Quebrada La Floresta 1. Esquema del sitio de muestreo de acuerdo con el protocolo de Ausrivas para cuerpos de agua de alto gradiente ..... 3.2-214
Figura 3-104 - Estación F3 Quebrada La Floresta 2. Esquema del sitio de muestreo de acuerdo con el protocolo de Ausrivas para cuerpos de agua de alto gradiente ..... 3.2-215
Figura 3-105 - Estación Y1. Quebrada La Yarumal 1. Esquema del sitio de muestreo de acuerdo con el protocolo de Ausrivas para cuerpos de agua de alto gradiente ..... 3.2-216
Figura 3-106 - Estación Y2. Afluente 1 a la Yarumal. Esquema del sitio de muestreo de acuerdo con el protocolo de Ausrivas para cuerpos de agua de alto gradiente ..... 3.2-217
Figura 3-107 - Estación Y3 Afluente 2 a la Yarumal. Esquema del sitio de muestreo de acuerdo con el protocolo de Ausrivas para cuerpos de agua de alto gradiente ..... 3.2-218
Figura 3-108 - Estación Y4. Afluente 3 a la Yarumal. Esquema del sitio de muestreo de acuerdo con el protocolo de Ausrivas para cuerpos de agua de alto gradiente ..... 3.2-219
Figura 3-109 - Estación Y5 (E46) Quebrada la Yarumal 2 Esquema del sitio de muestreo de acuerdo con el protocolo de Ausrivas para cuerpos de agua de alto gradiente ..... 3.2-220
Figura 3-110 - Estación Y6 (E47) Afluente 4 Yarumal Esquema del sitio de muestreo de acuerdo con el protocolo de Ausrivas para cuerpos de agua de alto gradiente ..... 3.2-221
Figura 3-111 - Estación Y7: Afluente 5 Yarumal Esquema del sitio de muestreo de acuerdo con el protocolo de Ausrivas para cuerpos de agua de alto gradiente ..... 3.2-223
Figura 3-112 - Estación Y8 Quebrada la Yarumal 3 Esquema del sitio de muestreo de acuerdo con el protocolo de Ausrivas para cuerpos de agua de alto gradiente ..... 3.2-224
Figura 3-113 - Estación Y9: Confluencia Yarumal-Hondina. Esquema del sitio de muestreo de acuerdo con el protocolo de Ausrivas para cuerpos de agua de alto gradiente ..... 3.2-225
Figura 3-114 - Estación Y10 (E5) Quebrada Yarumal 4. Esquema del sitio de muestreo de acuerdo con el protocolo de Ausrivas para cuerpos de agua de alto gradiente ..... 3.2-226
Figura 3-115 - Estación Y11 Quebrada La Yarumal 5. Esquema del sitio de muestreo de acuerdo con el protocolo de Ausrivas para cuerpos de agua de alto gradiente ..... 3.2-227
Figura 3-116 - Estación S1: Quebrada Betania 1. Esquema del sitio de muestreo de acuerdo con el protocolo de Ausrivas para cuerpos de agua de alto gradiente ..... 3.2-228

Figura 3-117 - Estación S9 (E41): Quebrada Betania 2. Esquema del sitio de muestreo de acuerdo con el protocolo de Ausrivas para cuerpos de agua de alto gradiente ..... 3.2-230
Figura 3-118 - Estación S3: Afluente 1 a la Salazar, parte media. Esquema del sitio de muestreo de acuerdo con el protocolo de Ausrivas para cuerpos de agua de alto gradiente ..... 3.2-231
Figura 3-119 - Estación S4: Afluente 2 a la Salazar. Esquema del sitio de muestreo de acuerdo con el protocolo de Ausrivas para cuerpos de agua de alto gradiente ..... 3.2-232
Figura 3-120 - Estación S5: Quebrada la Escondida. Esquema del sitio de muestreo de acuerdo con el protocolo de Ausrivas para cuerpos de agua de alto gradiente ..... 3.2-233
Figura 3-121 - Estación S6: Nombre: Quebrada La Salazar Aguas arriba. Esquema del sitio de muestreo de acuerdo con el protocolo de Ausrivas para cuerpos de agua de alto gradiente ..... 3.2-234
Figura 3-122 - Estación S7: Quebrada las Faldas. Esquema del sitio de muestreo de acuerdo con el protocolo de Ausrivas para cuerpos de agua de alto gradiente..... 3.2-235
Figura 3-123 - Estación S8-Quebrada Salazar- Portal Oriental. Esquema del sitio de muestreo de acuerdo con el protocolo de Ausrivas para cuerpos de agua de alto gradiente ..... 3.2-236
Figura 3-124 - Estación S9-Afluente 1 Yarumal. Esquema del sitio de muestreo de acuerdo con el protocolo de Ausrivas para cuerpos de agua de alto gradiente..... 3.2-238
Figura 3-125 - Estación S10 Confluencia Yarumal Salazar. Esquema del sitio de muestreo de acuerdo con el protocolo de Ausrivas para cuerpos de agua de alto gradiente ..... 3.2-239
Figura 3-126 - Temperatura, pH, oxígeno y saturación de oxígeno en la Cuenca Yerbabuena..... 3.2-240
Figura 3-127 - Concentración de Solidos, Conductividad, Turbiedad y Dureza Cuenca Yerbabuena..... 3.2-241
Figura 3-128 - Fosforo total, Detergentes y Nitrógeno (NH4+, NO2- y NO3-) Cuenca Yerbabuena..... 3.2-242
Figura 3-129 - Iones disueltos Cuenca Yerbabuena. ..... 3.2-242
Figura 3-130 - DBO5, DQO y Coliformes totales y fecales Cuenca Yerbabuena ..... 3.2-243
Figura 3-131 - Temperatura, pH, oxígeno y saturación de oxígeno en las estaciones de las quebradas del tramo “Cielo abierto”, cuenca media de la Q. Santa Elena ..... 3.2-244
Figura 3-132 - Sólidos totales, suspendidos, disueltos y sedimentarios en las estaciones de las quebradas del tramo “Cielo abierto”, cuenca media de la Q. Santa Elena ..... 3.2.247
Figura 3-133 - Conductividad en las estaciones de las quebradas del tramo “Cielo abierto”, cuenca media de la Q. Santa Elena ..... 3.2.247
Figura 3-134 - Turbiedad en las estaciones de las quebradas del tramo “Cielo abierto”, cuenca media de la Q. Santa Elena ..... 3.2.247
Figura 3-135 - Dureza cálcica y magnésica en las estaciones de las quebradas del tramo “Cielo abierto”, cuenca media de la Q. Santa Elena ..... 3.2.248
Figura 3-136 - Alcalinidad Total y Acidez Total en las estaciones de las quebradas del tramo “Cielo abierto”, cuenca media de la Q. Santa Elena. ..... 3.2.249
Figura 3-137- Detergentes y fósforo total en las estaciones de las quebradas del tramo “Cielo abierto”, cuenca media de la Q. Santa Elena. ..... 3.2.250
Figura 3-138 - Nitrógeno (Nitratos, nitritos y N-amoniacal) en las estaciones de las quebradas del tramo “Cielo abierto”, cuenca media de la Q. Santa Elena. ..... 3.2.250
Figura 3-139 - Iones disueltos en el agua Potasio (mg K+/L) Hierro Total (mg Fe/L) Sulfatos (mg SO4 -2 /L) Cloruros (mg Cl-/L) en las estaciones de las quebradas del tramo “Cielo abierto”, cuenca media de la Q. Santa Elena. ..... 3.2.251
Figura 3-140 - Fenoles y Zinc (mg Zn/L) disueltos en el agua en las estaciones de las quebradas del tramo “Cielo abierto”, cuenca media de la Q. Santa Elena. ..... 3.2.252
Figura 3-141 - Grasas y/o Aceites en las estaciones de las quebradas del tramo “Cielo abierto”, cuenca media de la Q. Santa Elena. ..... 3.2.252
Figura 3-142 - Contaminación orgánica, medida como demanda de oxígeno, DBO (mg/L) y DQO (mg O2/L) en las estaciones de las quebradas del tramo “Cielo abierto”, cuenca media de la Q. Santa Elena. ..... 3.2.253
Figura 3-143 - Contaminación fecal en las estaciones de las quebradas del tramo “Cielo abierto”.. ..... 3.2.254

Figura 3-144 - Oxígeno, pH, Temperatura y saturación de oxígeno en las estaciones de la Q. Santa Elena y sus afluentes. ..... 3.258
Figura 3-145 - Concentraciones de Solidos y Turbiedad en las estaciones del Portal Occidental. ..... 3.259
Figura 3-146 - Conductividad y Dureza en las estaciones de la Q. Santa Elena Portal occidental. ..... 3.260
Figura 3-147 - Alcalinidad Total y Acidez Total en las estaciones de la Q. Santa Elena Portal Occidental. . 3.261
Figura 3-148 - Detergentes, Fósforo total y Nitrógeno (Nitratos, nitritos y N-amoniacal) en las estaciones de la Q. Santa Elena Portal Occidental. ..... 3.262
Figura 3-149 - Iones disueltos en el agua Potasio (mg K+/L) Hierro Total (mg Fe/L) Sulfatos (mg SO4 -2 /L) Cloruros (mg Cl-/L) en las estaciones de la Q. Santa Elena Portal Occidental.. ..... 3.263
Figura 3-150 - Fenoles, Zinc y Contaminación orgánica, Q. Santa Elena – Portal Occidental. ..... 3.263
Figura 3-151 - Grasas y Contaminación fecal - Q. Santa Elena Portal Occidental. ..... 3.264
Figura 3-152 - Temperatura, pH, oxígeno y saturación de oxígeno – Subcuenca Salazar Portal Oriental. . 3.266
Figura 3-153 - Concentración de Sólidos en las estaciones de la Q. La Salazar – Portal Oriental. . ..... 3.267
Figura 3-154 - Conductividad y turbiedad en las estaciones de la Q. La Salazar y sus afluentes.. ..... 3.268
Figura 3-155 - Dureza Cálcica y Magnésica y Alcalinidad en las estaciones de la Q. La Salazar – Portal Oriental. ..... 3.269
Figura 3-156 - Detergentes, Fósforo total y Nitrogeno en las estaciones de la Q. La Salazar Portal Oriental. ..... 3.270
Figura 3-157 - Iones disueltos de la Q. La Salazar Portal Oriental. ..... 3.270
Figura 3-158 - Contaminación orgánica, DBO (mg/L) y DQO (mg O2/L) Q. La Salazar –Portal Oriental..... 3.271
Figura 3-159 - Contaminación fecal Q. La Salazar Portal Oriental. ..... 3.272
Figura 3-160 - Oxígeno, pH, Temperatura y saturación de oxígeno en las estaciones de la Q. Santa Elena y sus afluentes. ..... 3.278
Figura 3-161 - Concentración de Sólidos en las estaciones de la Q. Santa Elena y sus afluentes. . ..... 3.278
Figura 3-162 - Turbiedad y Conductividad en las estaciones de la Q. Santa Elena y sus afluentes. ..... 3.279
Figura 3-163 - Dureza cálcica y magnésica en las estaciones de la Q. Santa Elena y sus afluentes. ..... 3.280
Figura 3-164 - Alcalinidad Total y Acidez Total en las estaciones de la Q. Santa Elena y sus afluentes. ..... 3.281
Figura 3-165 - Detergentes y fósforo total en las estaciones de la Q. Santa Elena y sus afluentes. . ..... 3.282
Figura 3-166 - Nitrógeno en las estaciones de la Q. Santa Elena y sus afluentes. ..... 3.282
Figura 3-167 - Iones disueltos en el agua en las estaciones de la Q. Santa Elena y sus afluentes. ..... 3.283
Figura 3-168 - Fenoles (mg C6H6/L) y Zinc (mg Zn/L) disueltos en el agua en las estaciones de la Q. Santa Elena y sus afluentes..... 3.284
Figura 3-169 - Contaminación orgánica, medida como demanda de oxígeno, DBO (mg/L) y DQO (mg O2/L) en las estaciones de la Q. Santa Elena y sus afluentes. ..... 3.285
Figura 3-170 - Grasas y/o Aceites en las estaciones de la Q. Santa Elena y sus afluentes. Grasas y/o Aceites en las estaciones de la Q. Santa Elena y sus afluentes. ..... 3.285
Figura 3-171 - Grasas y/o Aceites en las estaciones de la Q. Santa Elena y sus afluentes. Grasas y/o Aceites en las estaciones de la Q. Santa Elena y sus afluentes.Contaminación fecal en las estaciones de la Q. Santa Elena y sus afluentes..... 3.286
Figura 3-172 - Temperatura, pH, Disponibilidad de oxígeno en las estaciones de la Q. San Ignacio y sus afluentes.. ..... 3.291
Figura 3-173 - Sólidos totales, suspendidos, disueltos y sedimentarios en las estaciones de la Q. San Ignacio y sus afluentes. . ..... 3.292
Figura 3-174 - Conductividad y turbiedad en las estaciones de la Q. San Ignacio y sus afluentes.. ..... 3.293
Figura 3-175 - Dureza Cálcica y Magnésica y Alcalinidad Total y Acidez Total en las estaciones de la Q. San Ignacio y sus afluentes..... 3.293
Figura 3-176 - Fósforo Total y Detergentes en las estaciones de la Q. San Ignacio y sus afluentes. ..... 3.294
Figura 3-177 - Nitrógeno (Nitratos, nitritos y N-amoniacal) en las estaciones de la Q. San Ignacio y sus afluentes. ..... 3.295
Figura 3-178 - Iones disueltos en el agua Potasio (mg K+/L) Hierro Total (mg Fe/L) Sulfatos (mg SO4 -2 /L) Cloruros (mg Cl-/L) en las estaciones de la Q. San Ignacio y sus afluentes. ..... 3.295

Figura 3-179 - Fenoles (mg C6H6/L) Grasas y/o Aceites - Q. San Ignacio y sus afluentes.. ..... 3.296
Figura 3-180 - Contaminación orgánica, medida como demanda de oxígeno, DBO (mg/L) y DQO (mg O2/L) en las estaciones de la Q. San Ignacio y sus afluentes. ..... 3.297
Figura 3-181 - Contaminación fecal en las estaciones de la Q. San Ignacio y sus afluentes ..... 3.297
Figura 3-182 - Temperatura, pH, oxígeno y saturación de oxígeno en las estaciones de la Q. San Pedro y sus afluentes. ..... 3.301
Figura 3-183 - Sólidos totales, suspendidos, disueltos y sedimentarios en las estaciones de la Q. San Pedro y sus afluentes. ..... 3.302
Figura 3-184 - Conductividad y turbiedad en las estaciones de la Q. San Pedro y sus afluentes.. ..... 3.302
Figura 3-185 - Dureza cálcica y magnésica en las estaciones de la Q. San Pedro y sus afluentes. ..... 3.303
Figura 3-186 - Alcalinidad Total y Acidez Total en las estaciones de la Q. San Pedro y sus afluentes ..... 3.303
Figura 3-187 - Detergentes y fósforo total en las estaciones de la Q. San Pedro y sus afluentes. . ..... 3.304
Figura 3-188 - Nitrógeno (Nitratos, nitritos y N-amoniacal) en las estaciones de la Q. San Pedro y sus afluentes. ..... 3.304
Figura 3-189 - Iones disueltos Q. San Pedro y sus afluentes. ..... 3.305
Figura 3-190 - Fenoles (mg C6H6/L) Q. San Pedro y sus afluentes. ..... 3.306
Figura 3-191 - Contaminación orgánica, medida como demanda de oxígeno, DBO (mg/L) y DQO (mg O2/L) en las estaciones de la Q. San Pedro y sus afluentes. ..... 3.306
Figura 3-192 - Contaminación fecal en las estaciones de la Q. San Ignacio y sus afluentes ..... 3.307
Figura 3-193 - Temperatura, pH, oxígeno y saturación de oxígeno en las estaciones de la Q. La Cascada y sus afluentes. ..... 3.310
Figura 3-194 - Dureza cálcica y magnésica, Alcalinidad Total y Acidez Total en las estaciones de la Q. La Cascada y sus afluentes. ..... 3.312
Figura 3-195 - Detergentes y fósforo total en las estaciones de la Q. La Cascada y sus afluentes. ..... 3.313
Figura 3-196 - Nitrógeno en las estaciones de la Q. La Cascada y sus afluentes. ..... 3.313
Figura 3-197 - Iones disueltos en el agua Potasio (mg K+/L) Hierro Total (mg Fe/L) Sulfatos (mg SO4 -2/L) Cloruros (mg Cl-/L) en las estaciones de la Q. La Cascada y sus afluentes. ..... 3.314
Figura 3-198 - Contaminación orgánica, DBO (mg/L) y DQO (mg O2/L) en las estaciones de la Q. La Cascada y sus afluentes. ..... 3.315
Figura 3-199 - Contaminación fecal en las estaciones de la Q. La Cascada y sus afluentes . ..... 3.315
Figura 3-200 - Resultados de los análisis fisicoquímicos in situ y ex situ en las estaciones del área de influencia del túnel, subcuenca de las Quebrada La Honda. ..... 3.316
Figura 3-201 - Temperatura, pH, oxígeno y saturación de oxígeno en las estaciones de la Q. La Honda y sus afluentes. ..... 3.318
Figura 3-202 - Sólidos totales, suspendidos, disueltos y sedimentarios en las estaciones de la Q. La Honda y sus afluentes. . ..... 3.318
Figura 3-203 - Conductividad y turbiedad en las estaciones de la Q. La Honda y sus afluentes.. ..... 3.319
Figura 3-204 - Dureza cálcica y magnésica, Alcalinidad Total y Acidez Total en las estaciones de la Q. La Honda ..... 3.319
Figura 3-205 - Detergentes y fósforo total en las estaciones de la Q. La Honda y sus afluentes. . ..... 3.320
Figura 3-206 - Nitrógeno en las estaciones de la Q. La Honda y sus afluentes. ..... 3.320
Figura 3-207 - Iones disueltos en las estaciones de la Q. La Honda y sus afluentes. ..... 3.321
Figura 3-208 - Grasas y/o Aceites en las estaciones de la Q. La Honda y sus afluentes. ..... 3.322
Figura 3-209 - Contaminación orgánica, medida como demanda de oxígeno, DBO (mg/L) y DQO (mg O2/L) en las estaciones de la Q. La Honda y sus afluentes. ..... 3.322
Figura 3-210 - Contaminación fecal en las estaciones de la Q. La Honda y sus afluentes. ..... 3.323
Figura 3-211 - Temperatura, pH, oxígeno y saturación de oxígeno en las estaciones de la Q. La Hondina y sus afluentes. ..... 3.325
Figura 3-212 - Sólidos totales, suspendidos, disueltos y sedimentarios en las estaciones de la Q. La Hondina y sus afluentes. . ..... 3.326
Figura 3-213 - Conductividad y turbiedad en las estaciones de la Q. La Hondina y sus afluentes. ..... 3.327

Figura 3-214 - Dureza Cálcica y Magnésica en Q. La Hondina y sus afluentes. ..... 3.327
Figura 3-215 - Alcalinidad Total y Acidez Total en las estaciones de la Q. La Hondina y sus afluentes. ..... 3.328
Figura 3-216 - Detergentes y fósforo total en las estaciones de la Q. La Hondina y sus afluentes. . ..... 3.329
Figura 3-217 - Nitrógeno (Nitratos, nitritos y N-amoniacal) en las estaciones de la Q. La Hondina y sus afluentes- ..... 3.329
Figura 3-218 - Iones disueltos de la Q. La Hondina y sus afluentes. ..... 3.330
Figura 3-219 - Fenoles (mg C6H6/L) de la Q. La Hondina y sus afluentes. ..... 3.330
Figura 3-220 - Contaminación orgánica, DBO (mg/L) y DQO (mg O2/L) de la Q. La Hondina y sus afluentes. ..... 3.331
Figura 3-221 - Contaminación fecal en las estaciones de la Q. La Hondina y sus afluentes ..... 3.332
Figura 3-222 - Temperatura, pH, oxígeno y saturación de oxígeno en las estaciones de la Q. La Floresta y sus afluentes.. ..... 3.335
Figura 3-223 - Sólidos de la Q. La Floresta y sus afluentes. . ..... 3.336
Figura 3-224 Conductividad y turbiedad en las estaciones de la Q. La Floresta y sus afluentes. ..... 3.337
Figura 3-225 - Dureza cálcica y magnésica de la Q. La Floresta y sus afluentes. ..... 3.337
Figura 3-226 - Alcalinidad Total y Acidez Total en las estaciones de la Q. La Floresta y sus afluentes. ..... 3.338
Figura 3-227 - Detergentes y fósforo total en las estaciones de la Q. La Floresta y sus afluentes. ..... 3.338
Figura 3-228 - Nitrógeno (Nitratos, nitritos y N-amoniacal) en las estaciones de la Q. y sus afluentes ..... 3.339
Figura 3-229 - Fenoles (mg C6H6/L) disueltos en el agua en las estaciones de la Q. La Floresta y sus afluentes.. ..... 3.340
Figura 3-230 - Contaminación orgánica, medida como demanda de oxígeno, DBO (mg/L) y DQO (mg O2/L) en las estaciones de la Q. La Floresta y sus afluentes ..... 3.341
Figura 3-231 - Contaminación fecal en las estaciones de la Q. La Floresta y sus afluentes. ..... 3.341
Figura 3-232 - Temperatura, pH, oxígeno y saturación de oxígeno en las estaciones de la Q. Yarumal y sus afluentes. ..... 3.344
Figura 3-233 - Sólidos totales, suspendidos, disueltos y sedimentarios en las estaciones de la Q. Yarumal y sus afluentes. ..... 3.345
Figura 3-234 - Conductividad y turbiedad en las estaciones de la Q. Yarumal y sus afluentes.. ..... 3.346
Figura 3-235 - Dureza cálcica y magnésica en las estaciones de la Q. Yarumal y sus afluentes. ..... 3.346
Figura 3-236 - Alcalinidad Total y Acidez Total en las estaciones de la Q. Yarumal y sus afluentes. ..... 3.347
Figura 3-237 - Detergentes y fósforo total en las estaciones de la Q. Yarumal y sus afluentes.. ..... 3.347
Figura 3-238 - Nitrógeno (Nitratos, nitritos y N-amoniacal) en las estaciones de la Q. Yarumal y sus afluentes. ..... 3.348
Figura 3-239 - Iones disueltos en el agua Potasio (mg K+/L) Hierro Total (mg Fe/L) Sulfatos (mg SO4 -2 /L) Cloruros (mg Cl-/L) en las estaciones de la Q. Yarumal y sus afluentes. ..... 3.349
Figura 3-240 - Contaminación orgánica, DBO (mg/L) y DQO (mg O2/L) en las estaciones de la Q. Yarumal y sus afluentes. ..... 3.350
Figura 3-241 - Contaminación fecal en las estaciones de la Q. Yarumal y sus afluentes. ..... 3.351
Figura 3-242 - Temperatura, pH, oxígeno y saturación de oxígeno en las estaciones de la Q. La Salazar y sus afluentes. ..... 3.354
Figura 3-243 - Sólidos de la Q. La Salazar y sus afluentes. ..... 3.355
Figura 3-244 - Conductividad y turbiedad en las estaciones de la Q. La Salazar y sus afluentes.. ..... 3.356
Figura 3-245 - Dureza Cálcica y Magnésica y Alcalinidad de la Q. La Salazar y sus afluentes. ..... 3.357
Figura 3-246 - Detergentes y fósforo total en las estaciones de la Q. La Salazar y sus afluentes. ..... 3.357
Figura 3-247 - Nitrógeno (Nitratos, nitritos y N-amoniacal) en las estaciones de la Q. La Salazar y sus afluentes. ..... 3.358
Figura 3-248 - Iones disueltos en el agua Q. La Salazar y sus afluentes. ..... 3.359
Figura 3-249 - Contaminación orgánica, medida como demanda de oxígeno, DBO (mg/L) y DQO (mg O2/L) en las estaciones de la Q. La Salazar y sus. ..... 3.360
Figura 3-250 - Contaminación fecal en las estaciones de la Q. La Salazar y sus afluentes. ..... 3.360

Figura 3-251 - Ubicación de estructuras de captación de los sistemas de acueducto Juan Pablo II, 8 de Marzo y La Palma sobre la quebrada La Espadera. 3.2-371
Figura 3-252 - Ubicación de estructuras de captación de los sistemas de acueducto 8 de Marzo y La Palma sobre la quebrada La Espadera. 3.2-372
Figura 3-253 - Descarga de excesos 250 m aguas abajo del punto de captación Acueducto Media Luna. 3.2-392
Figura 3-254 - Influencia del espaciamiento y de la apertura de las discontinuidades en la conductividad hidráulica de un macizo rocoso 3.2-419
Figura 3-255 - Carta piezométrica del nivel freático 3.2-420
Figura 3-256 - Comparación entre las medidas de caudal (azul: valores máximos después de lluvias intensas; rojo: valores mínimos después de un periodo de tiempo seco). 3.2-420
Figura 3-257 - Gráfico del caudal del agua superficial en función del tiempo (año 2010). Escala logarítmica 3.2-430
Figura 3-258 - Gráfico del caudal de agua superficial en función del tiempo (año 2011). 3.2-430
Figura 3-259 - Gráfico del caudal de agua superficial en función del tiempo (año 2012). 3.2-431
Figura 3-260- Ejemplo de jerarquización de una red hidrográfica según el criterio de Strahler (1952, 1957). 3.2-445
Figura 3-261 - erarquización de la red hidrográfica de las cuencas interceptadas por los túneles Seminario y Santa Elena 3.2-446
Figura 3-262 - Gráfico de comparación entre el caudal medio medido y el orden de jerarquización del curso de agua correspondiente. 3.2-447
Figura 3-263 - Gráfico que representa los diferentes tipos de puntos de agua censados 3.2-452
Figura 3-264 - Gráfico que representa los caudales medidos 3.2-453
Figura 3-265 - Box-plot de la conductividad eléctrica (µS/cm a 25°C) en relación con los correspondientes litotipos. Es evidente el percentil 5°, 50° y 95° 3.2-454
Figura 3-266 - Gráfico de correlación entre ORP y pH de los puntos de agua censados en verano e invierno respectivamente. El círculo verde indica el agua con valores de OPR negativos 3.2-456
Figura 3-267 - Gráfico de correlación entre las lluvias registradas en el sector del portal occidental y los niveles piezométricos (año 2012 - mayo 2013). 3.2-459
Figura 3-268 - Gráfico de correlación entre las lluvias registradas en el sector del portal oriental y los niveles piezométricos (año 2012/mayo 2013). 3.2-461
Figura 3-244 - Pasos operativos para el cálculo de los tres parámetros empleados por el método G.O.D. para el cálculo del índice de vulnerabilidad del acuífero. 3.2-480
Figura 3-270 - Valores calculados para el parámetro (O') para los sectores del área de influencia de los túneles. La línea azul indica el trazado de los túneles Seminario y Santa Elena 3.2-483
Figura 3-271 - Líneas piezométricas 3.2-485
Figura 3-272 - Valores calculados para el parámetro D para los sectores localizados en el área de influencia de los túneles. La línea azul oscuro indica la traza de los túneles 3.2-485
Figura 3-273 - Cálculo de los valores del índice de vulnerabilidad del acuífero superficial (I) para los sectores dentro del área de influencia aledaños a los túneles. La línea de color azul indica el trazado de los túneles Seminario y Santa Elena. 3.2-486
Figura 3-274 - Esquema de la relación geométrica entre la posición del punto de agua considerado y el tramo de túnel de referencia 3.2-490
Figura 3-275 - Ejemplo conceptual de la matriz del sistema Acuifero-túnel 3.2-491
Figura 3-276 - Esquema de la influencia que la cobertura tiene sobre la amplitud de la zona plástica que se forma entorno de una excavación subterránea (A) y, a la escala del macizo, sobre la apertura media de las fracturas (B). 3.2-492
Figura 3-277 - Relación entre el radio del túnel y caudal drenado (aplicando la fórmula de GOODMAN et al., 1965) 3.2-493
Figura 3-278 - Esquema conceptual del efecto topográfico (ET). En la tabla de la izquierda se muestran los valores que asume ET para manantiales y cursos de agua superficiales. 3.2-494

Figura 3-279 - Ejemplo conceptual de la relación entre cursos de agua superficiales y acuíferos. En la tabla de la izquierda se muestran los valores que asume ET para manantiales y cursos de agua. 3.2-495
Figura 3-280 - Localización de las estaciones climáticas consideradas para el balance hidrogeológico, las cuales forman parte de la red del IDEAM y EPM ..... 3.2-512
Figura 3-281 - En la siguiente tabla se relaciona el tipo de vertimiento, el caudal estimado, las coordenadas de la fuente receptora y si se cuenta con permiso de vertimientos anteriormente otorgado-. 3.2-514
Figura 3-282 - Precipitación media mensual multianual en la estación Vasconia (Periodo 1993-2012).. 3.2-514
Figura 3-283. Precipitación media mensual multianual en la estación Santa Elena (Periodo 1993-2012). ... 3.2-515
Figura 3-284 - Cota y precipitación media anual en las tres estaciones de referencia. ..... 3.2-515
Figura 3-285. Temperatura media mensual multianual en la estación A.J.M. Córdova (Periodo 1993-2012). ..... 3.2-516
Figura 3-286 - Comparación entre los datos pluviométricos de las estaciones del IDEAM y EPM 1993-2012 (color azul) versus los datos obtenidos de los pluviómetros instalados por el Concesionario desde mayo/2012 a abril/2013 (color rojo). ..... 3.2-517
Figura 3-287 - Rosas de viento. A-Portal Oriental Túnel Santa Elena - Finca Cístico y B-Portal Occidental Túnel Santa Elena - Finca San Jorge. ..... 3.2-524

# 3 CARACTERIZACIÓN AMBIENTAL DEL ÁREA DE INFLUENCIA DEL PROYECTO

## 3.1 Áreas de influencia

Para la redelimitación del área de influencia del proyecto Conexión Vial Aburrá-Oriente y sus vías complementarias realizada a partir de la solicitud de la Resolución 456 de 2.012 expedida por la ANLA, se partió de un análisis del territorio donde se concibió la cuenca como una unidad físico-geográfica delimitada por sistemas topográficos y geológicos que permiten definir espacialmente un área de drenaje común, en donde interactúan en un proceso permanente y dinámico, los subsistemas: físico, biótico y socioeconómico.

En este sentido, el proyecto se encuentra ubicado en la Cordillera Central de los Andes Colombianos. Por un lado, abarca las zonas del Valle de Aburrá perteneciente a la Cuenca del Río Cauca, que comprende las cuencas de la Quebrada Yerbabuena y Santa Elena ubicadas en el municipio de Medellín, en la vertiente occidental de la Cordillera Central. Por otro lado, el Valle de San Nicolás perteneciente a la Cuenca del Río Magdalena, que comprende las cuencas de la Quebrada la Cascada en el Municipio de Guarne y Las Quebradas Salazar y Yarumal en el Municipio de Rionegro. Ambas ubicadas en la vertiente oriental de la Cordillera Central. Adicionalmente, las zonas de vida que se encuentran en el área de estudio corresponden a Bosque Húmedo Premontano (bh-PM) y Bosque muy húmedo Montano Bajo (bmh-MB).

De acuerdo con lo establecido en la resolución 1289 del 30 de junio de 2006, por la cual se acogen los términos de referencia para la elaboración de Estudios de Impacto Ambiental para la construcción de túneles y sus accesos (VI-TER-1-02); se requiere: “delimitar y definir las áreas de influencia del proyecto con base en una identificación de los impactos que puedan generarse durante la construcción y operación del proyecto. Para los medios abióticos y bióticos, se tendrán en cuenta unidades fisiográficas naturales y ecosistémicas; y para los aspectos sociales, las entidades territoriales y las áreas étnicas de uso social, económico y cultural entre otros, asociadas a las comunidades asentadas en dichos territorios”.

### 3.1.1 Área de influencia directa (AID)

Siguiendo los lineamientos de la citada resolución se toma de referencia la definición de Área de Influencia Directa como: “*aquella donde se manifiestan los impactos generados por las actividades de construcción y operación; está relacionada con el sitio del proyecto y su infraestructura asociada esta área puede variar según el tipo de impacto y el elemento del ambiente que se esté afectando; por tal razón, se debe delimitar las áreas de influencia de tipo abiótico, biótico y socioeconómico*”.

#### 3.1.1.1 Área de influencia directa puntual

Se define el área de influencia puntual como los sitios de obra donde se desarrollarán las actividades constructivas y que tienen un impacto directo sobre los componentes físico, biótico y socioeconómico.

En los medios físico y biótico, el área de influencia puntual comprende los predios que serán intervenidos parcial o totalmente por las actividades de construcción en los portales norte y sur del túnel del Seminario, la vía a cielo abierto (oriental y occidental), portal occidental y oriental del

túnel de Santa Elena y zona de los depósitos El Seminario y la Querencia. Todos estos sitios son necesarios para el desarrollo del proyecto. (Véase Anexo 3-25)

Tabla 3-1 – Relación de las áreas de intervención puntual por el proyecto

| Obra/actividad | Área de afectación/m$^2$ |
|---|---|
| Portal Norte Túnel Seminario | 1.834 |
| Portal Sur Túnel Seminario | 4.064 |
| Portal Occidental Túnel Santa Elena | 3.812 |
| Portal Oriental Túnel Santa Elena | 7.712 |
| Vía a cielo abierto occidental | 356.111 |
| Vía a cielo abierto oriental | 48.462 |
| Depósito la Querencia | 33.805 |
| Total área de afectación | 455.799 |

Fuente: Consorcio Siga-Plyma

Tabla 3-2 – Relación de la remoción de vegetación por sitios de obra

| Sitio | Subtotal Plantaciones | | Subtotal Vegetación Nativa | | Área (m$^2$) | Total | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Volumen (m$^3$) | Número de Árboles | Volumen (m$^3$) | Numero de Arboles | | Volumen (m$^3$) | Número de Árboles |
| Portal Norte | 54,38 | 132,00 | 15,81 | 174,00 | 1.833,70 | 70,19 | 306,00 |
| Portal occidental | 420,09 | 738,00 | 141,16 | 509,00 | 3.811,70 | 561,25 | 1.247,00 |
| Portal Oriental (Incluye Vía 800m) | 49,13 | 217,00 | 41,98 | 221,00 | 7.711,80 | 91,11 | 438,00 |
| Portal Sur | 352,42 | 817,00 | 4,91 | 51,00 | 4.063,58 | 357,33 | 868,00 |
| Vía cielo abierto | 2.464,03 | 9.304,00 | 375,82 | 4.276,00 | 368.000 | 2.839,85 | 13.580,00 |
| Depósito Seminario | 8.085,70 | 20.720,00 | | | 160.000 | 8.085,70 | 20.720,00 |
| Total | 11.425,75 | 31.928,00 | 579,68 | 5.231,00 | 545.420,78 | 12.005,43 | 37.159,00 |
| % | 95 | | 5 | | | 100 | |

Fuente: Consorcio Siga-Plyma

Para el componente de ecosistemas acuáticos se incluyen las fuentes de agua susceptibles de afectación por concesiones de agua, vertimientos, ocupación de cauce y/o por posibles abatimientos de agua. En la siguiente tabla se relacionan estas fuentes:

Tabla 3-3 – Fuentes susceptibles de afectación

| Fuente | Obra y/o actividad |
|---|---|
| Quebrada Sajonia | Concesión de agua y vertimiento |
| La Aguadita | Concesión de agua y vertimiento |
| La loma | Concesión deagua - Vertimiento |
| Quebrada Yarumal | Techo del túnel de Santa Elena |
| La Pulgarina | Vía a Cielo Abierto |
| Chupadero 1 | Vía a Cielo Abierto - Vertimiento |
| Chupadero 2 | Vía a Cielo Abierto |
| La India | Vía a Cielo Abierto |
| La Espadera | Concesión - Vertimiento |
| Mediagua | Vía a Cielo Abierto - Vertimiento |
| La Bocaná | Vía a Cielo Abierto – Vertimiento |
| La Cangreja | Vía a Cielo Abierto –Vertimiento |
| Caunces | Vía a Cielo Abierto |
| Yerbabuena | Vía a Cielo Abierto |

| Fuente | Obra y/o actividad |
|---|---|
| La Salada | Vía a Cielo Abierto |

Fuente: Consorcio Siga-Plyma

En el componente socioeconómico, el área de influencia directa puntual (AIDP), comprende las veredas donde se ubican los predios de afectación por las obras del proyecto, que además de compartir la misma área definida para los componentes físico y biótico, se amplía a las veredas como se indica en la Tabla 3-4.

Tabla 3-4 - Veredas del Área de Influencia Directa Puntual componente socioeconómico

| Tipo de intervención | Barrio/Vereda | Municipio |
|---|---|---|
| Intercambio Baltimore | Barrio La Asomadera 3 | Medellín |
| Portal Sur | Las Palmas | Medellín |
| Portal Norte | Las Palmas | Medellín |
| Vía a cielo abierto occidental | Las Palmas y Media Luna | Medellín |
| Vía a cielo abierto oriental | Yarumal, la Convención | Rionegro |
| Portal Occidental | Media Luna | Medellín |
| Portal Oriental | Yarumal | Rionegro |
| Zona depósito Seminario | Las Palmas | Medellín |
| Zona depósito la Querencia | Rancheria | Rionegro |

Fuente: Consorcio Siga-Plyma

Tabla 3-5 - Sistemas de acueducto en el área de Influencia Directa Puntual

| Captaciones Acueducto | Fuente | Vereda | Municipio |
|---|---|---|---|
| 8 de Marzo | Quebrada La Espadera | Límite entre Media Luna y Las Palmas | Medellín |
| Juan Pablo II | Quebrada La Espadera | Límite entre Media Luna y Las Palmas | Medellín |
| Barrios de Jesús | Quebrada La Espadera | Límite entre Media Luna y Las Palmas | Medellín |
| La Palma | Quebrada La Espadera | Límite entre Media Luna y Las Palmas | Medellín |

Fuente: Consorcio Siga-Plyma

En el componente cultural, el área de influencia directa puntual (AIDP) está conformada por El Seminario Conciliar de Medellín y el camino antiguo Bocaná, establecidos como bienes municipales de interés cultural y patrimonial según el POT de Medellín.

### 3.1.1.2 Área de influencia directa local

El presente estudio define el Área de Influencia Local como aquella zona que cartográficamente está superpuesta con las obras del proyecto y a diferencia de la puntual por ser obras subterráneas, posiblemente no se presente ninguna intervención del medio por el proyecto.

Como área de influencia local en el medio físico y biótico se tienen los techos de los túneles Seminario y Santa Elena, considerando las fuentes hídricas localizadas sobre la superficie del alineamiento de los túneles, zonas de vida y fauna asociada. En esta área se encontraron 80 fuentes hídricas, de las cuales 67 son permanentes y 13 son intermitentes, las cuales se relacionan en las Tabla 3-6 y Tabla 3-7.

Tabla 3-6 - Fuentes Hídricas Permanentes Identificadas en el Área de Influencia Directa Local

| Cuenca | Subcuenca | Código final | Nombre de la quebrada | Referencia | Coordenadas | | | Caudales (l/s) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | X | Y | Z | |
| Santa Elena | Santa Elena | SE1 | Q. Cerro Verde | Antes de la confluencia con Sta Elena | 843718 | 1176903 | 2605 | 6 |
| Santa Elena | Santa Elena | SE2 | "Afloramiento Q. Santa Elena" | Vereda El Cerro | 843495 | 1176942 | 2478 | 31,8 |
| Santa Elena | Santa Elena | SE3 | El cedro | Vereda El Cerro | 843466 | 1177265 | 2608 | 2,7 |
| Santa Elena | Santa Elena | SE4 | El cedro I | Vereda El Cerro | 843610 | 1177534 | 2608 | 2,5 |
| Santa Elena | Santa Elena | SE5 | Q. Santa Elena | Finca Villa Alejandra | 843121 | 1177785 | 2561 | 54,3 |
| Santa Elena | Santa Elena | SE6 | Q. La escorrentía. | Rancho Carrieles | 843515 | 1177962 | 2588 | 1,1 |
| Santa Elena | Santa Elena | SE7 | Confluencia San Ignacio-Santa Elena | Confluencia San Ignacio y Santa Elena (Acueducto Santa Elena) | 842964 | 1178440 | 2557 | 121,7 |
| Santa Elena | Santa Elena | SE8 | Q. "La Avicola" | Parque Santa Elena | 842830 | 1178548 | 2549 | 4,4 |
| Santa Elena | Santa Elena | SE9 | Q. "Santa Teresa" | Parcelación (Santa Teresa) | 842722 | 1179076 | 2577 | 0,3 |
| Santa Elena | Santa Elena | SE10 | Q. "Paysandú 1" | El recreo | 842082 | 1178648 | 2553 | 1,9 |
| Santa Elena | Santa Elena | SE11 | Q. "Paysandú" | El recreo | 842314 | 1178919 | 2580 | 5,5 |
| Santa Elena | Santa Elena | SE12 | Q. La torre | La Montañita | 842532 | 1179238 | 2572 | 0,4 |
| Santa Elena | Santa Elena | SE13 | Quebrada Santa Lucia | Predio los Roldán | 842141 | 1179230 | 2548 | 1,5 |
| Santa Elena | Santa Elena | SE14 | Q. Santa Elena 2 | Restaurante La Rosita. | 842215 | 1179505 | 2540 | 869,4 |
| Santa Elena | Santa Elena | SE15 | Q. El Yarumo | Finca los Arayanes | 842956 | 1179416 | 2610 | 1,4 |
| Santa Elena | Santa Elena | SE16 | Confluencia El Yarumo - Las Antenas | Tunel Viejo | 842416 | 1179621 | 2550 | 24,1 |
| Santa Elena | Santa Elena | SE17 | Q. El Placer Parte Alta | Hacia el Parque Arví (El Silletero) | 843008 | 1179917 | 2594 | 0,5 |
| Santa Elena | Santa Elena | SE18 | Quebrada el placer (aguas abajo) | predio el Silletero de los Grajales | 842386 | 1179956 | 2544 | 58,6 |
| Santa Elena | Santa Elena | SE19 | Q. Santa Elena 3 | La Antigua Huesera | 842131 | 1179931 | 2439 | 702,6 |
| Santa Elena | Santa Elena | SE20 | Q. Santa Barbara Parte Alta | Parcelación Mirador de Santa Elena | 842363 | 1180568 | 2533 | 80,3 |
| Santa Elena | Santa Elena | SE21 | Q. La Espadera | Vda el Plan sector Chisperos | 840253 | 1178294 | 2640 | 12,3 |
| Santa Elena | Santa Elena | SE22 | Q. La Bisarrra | Vereda el Plan | 840516 | 1178609 | 2627 | 2,8 |
| Santa Elena | Santa Elena | SE25 | Q. Chiqueros | Acueducto las Flores | 842519 | 1181361 | 2574 | 3,9 |
| Santa Elena | Santa Elena | SE26 | La Cascada | La cascada de Santa Elena | 841251 | 1180556 | 2111 | 709,12 |
| Santa Elena | Santa Elena | SE27 | Confluencia Bocana - Santa Elena | Confluecia de la Bocana y Santa Elena (Finca la Granja) | 840641 | 1180755 | 1937 | 710,9 |
| Santa Elena | San Ignacio | SI1 | Q. Sn Ignacio | Aguas arriba Asuasi. | 843906 | 1178359 | 2596 | 2,3 |
| Santa Elena | San Ignacio | SI2 | Q. "La Matilda" (afluente San Ignacio) | Casa de los Caballos | 843717 | 1178333 | 2577 | 0,04 |
| Santa Elena | San Ignacio | SI3 | Afloramiento (lago) | Montevivo | 843758 | 1178666 | 2585 | 1,5 |
| Santa Elena | San Ignacio | SI4 | Q. Los Chorlitos | Montevivo | 843525 | 1178581 | 2564 | 2,5 |
| Santa Elena | San Ignacio | SI5 | Q. " Los Chorlitos en la Batea" | Montevivo | 843413 | 1178489 | 2569 | 13,1 |
| Santa Elena | San Ignacio | SI6 | Q. Amagamiento frio | Montevivo | 843292 | 1178524 | 2576 | 2,2 |

| Cuenca | Subcuenca | Código final | Nombre de la quebrada | Referencia | Coordenadas | | | Caudales (l/s) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | X | Y | Z | |
| Santa Elena | San Pedro | SP1 | Q. San Pedro Parte alta | cultivo de claveles | 842808 | 1177782 | 2570 | 6 |
| Santa Elena | San Pedro | SP2 | Q. San Pedro acued. | Acueducto San Pedro. | 842815 | 1178104 | 2566 | 28,6 |
| Santa Elena | San Pedro | SP3 | Q. San Pedro aguas abajo acued. | Descarga en Santa Elena | 842798 | 1178479 | 2543 | 28,6 |
| La Cascada | La Cascada | C1 | Q." Dña Clara" | Predio Dna Clara (Finca Airecitos) | 844805 | 1177623 | 2593 | sin agua |
| La Cascada | La Cascada | C2 | Q. "Dos captaciones" | sobre la vía | 844583 | 1177823 | 2612 | 0,9 |
| La Cascada | La Cascada | C3 | Q. "Adonay" | Fundacion Adonay | 844427 | 1177796 | 2639 | No hubo acceso |
| La Cascada | La Cascada | C4 | Q. La Cascada | La cascada 5mt | 844895 | 1178109 | 2467 | 11,2 |
| La Cascada | La Honda | Ho2 | Q. "Villanueva" | Vereda El Progreso | 845017 | 1177229 | 2540 | 27,8 |
| La Cascada | La Honda | Ho1 | Q "Manguruma" | Confluecia de 2 afluentes de la mosca | 845463 | 1177490 | 2500 | 1,3 |
| Yarumal | Hondina | H1 | Q. El Cerro | Finca bella vista (acued. Atehortua) | 844634 | 1176997 | 2610 | 1,8 |
| Yarumal | Hondina | H2 | Q. El Cerro Aguas Abajo acued. | Aguas abajo acueducto atehortua | 844784 | 1176883 | 2481 | 3,1 |
| Yarumal | Hondina | H3 | Q. Los Parra aguas arriba acued. | Acueducto aguas arriba | 844565 | 1176583 | 2597 | 2,9 |
| Yarumal | Hondina | H4 | Q. Los Parra Aguas Abajo Acued. | Acueducto los Parra | 844624 | 1176534 | 2570 | 1 |
| Yarumal | Hondina | H5 | Q. La Hondina 2 | Plantación de tomate de arbol | 845382 | 1176105 | 2352 | 91,8 |
| Yarumal | Hondina | H6 | Q. La Hondina 1 | Aguas abajo plantacion tomate arbol | 845759 | 1175770 | 2317 | 173,8 |
| Yarumal | La Floresta | F1 | Q. La Floresta Parte alta | Acued. Yarumaguas Aguas Arriba | 844926 | 1175084 | 2378 | 78,7 |
| Yarumal | La Floresta | F2 | Q. La Floresta 1 | Acueducto Yarumaguas | 845162 | 1175095 | 2423 | 37,5 |
| Yarumal | La Floresta | F3 | Q. La Floresta.2 | Aguas debajo de arenera | 846251 | 1175048 | 2239 | 51,9 |
| Yarumal | Yarumal | Y1 | Q. Yarumal 1 | Sanmarcanda | 845528 | 1176899 | 2462 | 3,7 |
| Yarumal | Yarumal | Y2 | Afluente 1 Yarumal | Sanmarcanda | 845396 | 1176856 | 2446 | 2,1 |
| Yarumal | Yarumal | Y3 | Afluente 2 Yarumal | Sanmarcanda | 845659 | 1176863 | 2447 | 1,6 |
| Yarumal | Yarumal | Y4 | Afluente 3- Yarumal | camino de piedra | 845980 | 1176586 | 2392 | 27,9 |
| Yarumal | Yarumal | Y5 | Q. Yarumal 2 | Casa "Don Martin Forero" (Pastores Alemanes) | 846085 | 1176545 | 2382 | 43,8 |
| Yarumal | Yarumal | Y6 | Afluente 4 Yarumal | Aguas Arriba Truchas | 846044 | 1176219 | 2335 | 3,1 |
| Yarumal | Yarumal | Y7 | Afluente 5 Yarumal | La Araucaria (Truchas) | 846107 | 1176171 | 2335 | 1,2 |
| Yarumal | Yarumal | Y8 | Q- Yarumal 3 | Piezometro | 846102 | 1175913 | 2306 | 57,6 |
| Yarumal | Yarumal | Y9 | Confluencia Yarumal-Hondina | (Confluencia con Hondina) Finca Doña Nazaret | 846088 | 1175620 | 2281 | 171,6 |
| Yarumal | Yarumal | Y10 | Q. Yarumal 4 | Aguas arriba de mineria | 847012 | 1174712 | 2225 | 121,1 |
| Yarumal | Yarumal | Y11 | Q. Yarumal 5 | Aguas debajo de mineria | 847231 | 1174667 | 2195 | 273,9 |
| Yarumal | Salazar | S1 | Q. Betania1 | Finca Betania | 846716 | 1176298 | 2378 | 6,3 |
| Yarumal | Salazar | S2 | Q. Betania 2 | Finca Betania | 846767 | 1176342 | 2351 | 5,4 |
| Yarumal | Salazar | S3 | Afluente 1 Salazar | Parte media | 847447 | 1176372 | 2280 | 22,9 |
| Yarumal | Salazar | S4 | Afluente 2 a la salazar | Sobre la via ver. Yarumal | 847459 | 1175774 | 2255 | 2,9 |
| Yarumal | Salazar | S5 | "Q. Escondida" | Afluente de la Salazar | 847340 | 1175662 | 2286 | 1,8 |

| Cuenca | Subcuenca | Código final | Nombre de la quebrada | Referencia | Coordenadas | | | Caudales (l/s) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | X | Y | Z | |
| Yarumal | Salazar | S6 | Q. La Salazar | Aguas arriba | 847666 | 1175699 | 2239 | 118,3 |
| Yarumal | Salazar | S7 | Q. "Las Faldas" | finca las faldas (Aguacates) | 847279 | 1175357 | 2324 | 1,3 |

Fuente: Consorcio Siga-Plyma

Tabla 3-7 - Fuentes intermitentes identificadas en el área de influencia directa local

| Cuenca | Subcuenca | Código final | Nombre de la quebrada | Referencia | Coordenadas | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | X | Y | Z |
| Rionegro | Hondina | R1 | Acueducto los Parra | Acueducto los Parra | 844581 | 1176580 | 2592 |
| | Yarumal | R2 | Afluente 5 Yarumal | Aguas abajo truchas | 846182 | 1176079 | 2340 |
| | | R3 | Q. Yarumal | Afloramiento (sanmarcanda) | 845250 | 1177046 | 2489 |
| | Salazar | R4 | Afluente a la Salazar | (Glorieta Sajonia) | 848223 | 1175079 | 2190 |
| La Cascada | La Cascada | R5 | Q. Gónima | Sin Información | 844273 | 1177887 | 2634 |
| | La Honda | R5 | Manguruma nº2 | Afloramiento (Predio adm. Alexander.) | 845249 | 1177241 | 2490 |
| Santa Elena | Santa Elena | R6 | Q. "La Cerca" | Parque Santa Elena | 842979 | 1178833 | 2584 |
| | | R7 | Q. "La Juliana" | Parcelación (Santa Teresa) | 842823 | 1179002 | 2591 |
| | | R8 | Q. Santa Barbara Parte Baja | Despues de la vía hacia Media Luna | 842144 | 1180568 | 2467 |
| | | R9 | Q. Bocaná Parte alta | Predio Corantioquia (La Aguada) | 841743 | 1179280 | 2530 |
| | San Ignacio | R10 | Q. Sn Ignacio (La Duquesa) | Finca La Duquesa | 843590 | 1178385 | 2591 |
| | | R11 | Q. "Casepalo" | Montevivo | 843748 | 1178606 | 2594 |
| | | R12 | Q. " La Asequia" | Montevivo | 843640 | 1179000 | 2520 |
| | | R13 | Q " La Maloca" | Montevivo | 843626 | 1178567 | 2584 |

Fuente: Consorcio Siga-Plyma

En el componente socioeconómico, el área de influencia directa local (AIDL) comprende las unidades territoriales que podrían verse afectada por las obras subterráneas y que están por fuera de las obras puntuales, como se indica en la siguiente tabla.

Tabla 3-8 - Veredas ubicadas en el área de influencia directa local componente socioeconómico

| Tipo de intervención | Veredas | Municipio |
|---|---|---|
| Túnel Seminario | Las Palmas | Medellín |
| Túnel Santa Elena | Media Luna, El Placer, Santa Elena Central, El Llano, El Cerro y El Plan | Medellín |
| | San Ignacio | Guarne |
| | La Quiebra y Yarumal | Rionegro |

Fuente: Consorcio Siga-Plyma

Tabla 3-9 - Sistemas de acueducto en el Área de Influencia Directa Local

| Captaciones Acueducto | Vereda | Fuente | Municipio |
|---|---|---|---|
| La Sierra | Media Luna | Santa Elena | Medellín |
| Media Luna | Media Luna | Santa Bárbara | Medellín |
| Las Flores | Piedra Gorda | La Chiqueros | Medellín |
| El Multiveredal | Santa Elena | Santa Elena | Medellín |
| San Pedro | El Llano | San Pedro | Medellín |
| ASUASI | Santa Elena | San Ignacio | Medellín |
| El Progreso | La Quiebra | Los Atehortúa | Rionegro |
| Aguas del Mirador | La Quiebra | Los Parra | Rionegro |
| Yarumaguas | Yarumal | La Floresta | Rionegro |
| Arsa | Yarumal | Yarumal | Rionegro |
| Conhydra | Yarumal | Yarumal | Rionegro |

Fuente: Consorcio Siga-Plyma

El área puntual en el componente cultural, incluye los bienes de interés cultural y patrimonial de ámbito municipal establecidos en el POT del municipio de Medellín en el Acuerdo 46 de 2006 y los referenciados por el Plan Especial de Protección del Patrimonio Cultural Inmueble -PEEP- (Acuerdo 023 de 2009) de Medellín. Estos bienes son los siguientes:

- Iglesia de Santa Elena Central
- Sector Santa Elena Central, delimitado en el Artículo 44o, e incluye "todos los predios de la centralidad desde la quebrada Santa Elena, al sur, hasta el cementerio y el liceo, al norte, y desde los predios que bordean el parque principal, al occidente, hasta la quebrada que bordea el liceo, la zona deportiva y la casa de la cultura, y que cae a la Santa Elena, al oriente". El camino antiguo Caunce.

Tabla 3-10 - Bienes de interés cultural en el Área de Influencia Directa Local

| Componente | Bien inmueble |
|---|---|
| Edificaciones de valor patrimonial | Iglesia de Santa Elena Central (BIC) |
| Sectores de valor patrimonial | Sector ubicado en Santa Elena Central (Sector de preservación urbanística) |
| Espacio público construido | Parque Central de Santa Elena (Área cívica y representativa de valor patrimonial)<br>Cementerio de Santa Elena (Equipamiento de interés patrimonial en el espacio público)<br>Camino de Caunce (Corredor construido articulador) (Patrimonio arqueológico) |

Fuente: Acuerdo 023 de 2009 y la Ley 1185 de 2008.

### 3.1.2 Área de influencia indirecta (AII)

La misma resolución define el AII como: "el área donde los impactos trascienden el espacio físico del proyecto y su infraestructura asociada; es decir, la zona externa al área de influencia directa y se extiende hasta donde se manifiestan tales impactos".

Para el caso del componente físico-biótico, el área de influencia indirecta está delimitada por las tres grandes cuencas: La Santa Elena con 3.019 hectáreas, Rionegro 615,1 hectáreas y la Mosca con 223,61 hectáreas, para un área indirecta físico, biótica de 3.857, 62 hectáreas.

En el caso del componente social, se divide en área de influencia indirecta local y puntual.

Como AII local se toma la definida en el Ajuste del Estudio de Impacto Ambiental de 2009: "esta área corresponde al territorio en el que los impactos trascienden el espacio físico del proyecto y su infraestructura asociada. Para los aspectos sociales, está referido a los Valles de Aburrá y San Nicolás, dado que la construcción del túnel tiene como objeto la integración de estos dos valles con el valle de Occidente, consolidando así el concepto de ciudad región".

Como AII puntual se encuentran los municipios de Medellín, Guarne y Rionegro.

## 3.2 Medio abiótico

### 3.2.1 Geología

Sobre el corredor vial del proyecto Conexión vial Aburrá – Oriente se determinaron las características geológicas detalladas y geotécnicas conceptuales, a partir de la recopilación de información geológica y cartográfica previa, análisis de fotografías aéreas, reconocimientos de campo y exploraciones directas e indirectas del subsuelo (tanto a nivel de perforaciones como ensayos de refracción sísmica y geoeléctrica).

Los terrenos que corresponden a este corredor vial se encuentran localizados hacia el centro de la Cordillera Central, inicialmente en la unidad fisiográfica denominada Valle de Aburrá y rematando sobre el altiplano de Rionegro o San Nicolás. Son terrenos en general de vertientes largas con pendientes desde moderadas a escarpadas, que se suavizan hacia su tramo final, en el sector de Sajonia. Allí se tienen colinas suaves de pendientes moderadas a bajas.

Geológicamente en el área de estudio afloran variadas unidades litológicas que incluyen rocas de diferente edad, origen y composición. En relación con las edades, estas van desde el Triásico hasta los depósitos cuaternarios. En cuanto a su origen y composición se tienen rocas metamórficas como anfibolitas, migmatitas, esquistos y gneises; rocas ígneas como granodioritas, dioritas, dunitas, gabros así como depósitos de origen aluvial y de vertiente, cobertura de cenizas volcánicas, además de llenos de origen antrópico (ver Planos AO-VI-GO-002 y AO-VI-GO-003). Tanto las unidades rocosas mencionadas como algunos de los depósitos de vertiente presentan perfiles de meteorización, con desarrollo de suelos residuales de variado espesor y características propias, las cuales han sido estudiadas mediante ensayos de laboratorio ejecutados sobre las muestras recuperadas en la exploraciones realizadas, en un total de 862,65 m para los túneles y 144,35 m en las vías de acceso sumando un total de 1.007,00 m explorados. En los planos geológicos se puede observar la ubicación de las exploraciones (AO-VI-GO-002 y AO-VI-GO-003).

#### 3.2.1.1 Geología Regional

Las unidades litodémicas que afloran en el área de estudio y sus alrededores corresponden a rocas metamórficas del Complejo Cajamarca, definidas dentro del Grupo El Retiro, que incluyen las Migmatitas de Puente Peláez (TRmPP) a modo de techos colgantes en el sector de El Poblado, el Gneis de La Ceja (TRgLC) que aflora localmente en el altiplano de San Nicolás y las Anfibolitas de Medellín (TRaM), las cuales son las más abundantes del trazado aflorando tanto hacia la vertiente del Valle de Aburrá como en el sector del altiplano. Continuando la serie de rocas metamórficas aparece el Gneis Milonítico de Sajonia (JKgmS) hacia la zona del altiplano, relacionada en su origen con un proceso de obducción ocurrido durante el Jurásico-Cretácico del Complejo Ofiolítico de Aburrá. Este complejo ofiolítico, correspondiente a un fragmento desmembrado de corteza oceánica, está constituido por rocas del tipo metagabro representadas en las Metabasitas del Picacho (JKmbP) además de las Dunitas de Medellín (JKuM) que se localizan en el borde oriental del Valle de Aburrá (parte alta de la vertiente) además de una pequeña escama aislada en el sector del altiplano de San Nicolás, un poco al norte del portal oriental del túnel de Santa Elena. La fuerte deformación mecánica generada durante el cabalgamiento del fragmento de corteza oceánica sobre el basamento metamórfico de la cordillera Central desarrolló varias franjas de rocas con características mecánicas y texturales particulares, identificadas en este estudio como zona de cabalgamiento (Kmce) que se localiza a media ladera en la vertiente drenante hacia el

Valle de Aburrá, margen izquierda de la quebrada Santa Elena y los gneises migmatíticos de Sajonia (JKgmS) en el tercio inicial del túnel de Santa Elena. Posteriormente a estos procesos de metamorfismo regional y obducción, durante el Cretáceo, se suceden una serie de eventos magmáticos, variados en su composición. Es por ello que en el corredor del proyecto vial aparecen cuerpos intrusivos de gabros, dioritas y cuarzodioritas; siendo el Batolito Antioqueño (KcdA) el de mayor relevancia, aunque solo aflora en el sector del altiplano. Adicionalmente e interpretados como apófisis del batolito se cartografiaron otros cuerpos plutónicos como el Stock de Las Estancias (KcdE), localizado en la margen derecha de la quebrada Santa Elena; el Gabro de San Diego (KgSD) hacia el sector del seminario Mayor, entre El Poblado y Buenos Aires, además del Stock de Samarcanda (KcdS) en la parte media del trazado del túnel de Santa Elena (sobre el altiplano). Finalmente y como resultado de la morfodinámica del paisaje (quebradas, deslizamientos y otros fenómenos de vertiente) se tienen los depósitos recientes, con edades desde el Terciario Tardío hasta hoy, representados por depósitos de talus (Qt), depósitos de deslizamientos (Qd), flujos de lodos y/o escombros (Qf), depósitos aluviales (Qal) y aluviotorrenciales (Qat). Finalmente, por la escala detallada del trabajo cartográfico fue factible identificar llenos de origen antrópico (Qll). En los Planos AO-VI-GO-002 y AO-VI-GO-003 se observa la geología del corredor.

Tectónicamente se presentan varios sistemas de fallas que tienen incidencia directa en estos terrenos; entre las que se destacan el sistema La Honda, la falla Santa Elena y otras estructuras que en la literatura se denominan La Aguadita y Sajonia entre otras. También se identificaron otras estructuras de menor jerarquía relacionadas con discontinuidades del tipo diaclasas y fracturas en algunos macizos rocosos, además de foliación y esquistosidad en las rocas metamórficas (predominantes en el corredor).

### 3.2.1.2 Geología detallada del Corredor

Teniendo en cuenta el marco regional anteriormente descrito, se presenta a continuación una descripción geológica detallada de las unidades litológicas considerando solamente las rocas aflorantes a lo largo del corredor, desde la más antigua hasta los depósitos recientes. En la siguiente tabla se muestran las diversas unidades litológicas y corresponde a los planos AO-VI-GO-002 y AO-VI-GO-003. Adicionalmente y para cada uno de los túneles se presenta un plano de planta y perfil geológico con mayor detalle en los planos AO-VI-GO-004 para El Seminario y AO-VI-GO-005 para Santa Elena.

Tabla 3-11 - Leyenda Geológica

| Unidad Litodémica | Sigla | Nombre |
|---|---|---|
| Depósitos Antrópicos | Qll | Llenos Antrópicos |
| Depósitos de vertiente | Qt | Depósitos de Talus |
| | Qd | Depósitos de Deslizamiento |
| | Qf | Depósitos de flujos de escombros y/o lodos |
| | Kmce | Zona de Cabalgamiento |
| Intrusivos Cretáceos | KcdA | Batolito Antioqueño |
| | KcdS | Stock de Samarcanda |
| | KgSD | Gabro de San Diego |
| Complejo Ofiolítico de Aburra | JKuM | Dunitas de Medellín |
| | JKgmS | Gneis Milonítico de Sajonia |
| Complejo Cajamarca | TRaM | Anfibolitas de Medellín |

| Unidad Litodémica | Sigla | Nombre |
|---|---|---|
| Grupo El Retiro | TRgLC | Gneis de La Ceja |

Fuente: Estudio de Impacto Ambiental - Integral 2.000

#### 3.2.1.2.1 Complejo Cajamarca

Regionalmente, la mayor parte de la cordillera Central está constituida por rocas metamórficas con evidencias de haber sufrido varios eventos metamórficos que se reflejan en los rasgos texturales y en las edades isotópicas de las mismas. Dentro de esta unidad litodémica se incluyen las rocas que hacen parte del Grupo El Retiro y que son las que representan este Complejo dentro de la zona estudiada. El Complejo Cajamarca es análogo al denominado Complejo Polimetamórfico de la Cordillera Central, en el sentido de Restrepo y Toussaint (1984), sin embargo el Complejo El Retiro agrupa las rocas de alto grado de metamorfismo y fue definido por Ingeominas 2005 (plancha 147) incluyendo gneises, migmatitas y anfibolitas.

**Anfibolitas de Medellín (TRaM).** Aparecen como cuerpos de anfibolitas, paragneises, migmatitas y localmente esquistos grafíticos y moscovíticos. Son cuerpos de dirección preferencial NNW, las cuales afloran a nivel regional desde el municipio de La Ceja al sur, hasta el municipio de Belmira al norte (Correa y Martens, 2000). Son rocas constituidas esencialmente por hornblenda y plagioclasa, de textura por lo general isotrópica a bandeada, en ocasiones difícil de diferenciar de un gabro, estas rocas han sufrido un metamorfismo de medio a alto grado. Generalmente, las geoformas de estas rocas destacan cerros y vertientes tanto largas como cortas, con pendientes fuertes a moderadas y las rocas presentan un avanzado estado de meteorización. La roca fresca se observa en la parte alta de las vertientes montañosas escarpadas. Según comunicación verbal con Restrepo (en prensa) la sección tipo de estas anfibolitas estarían en cercanías de la quebrada Santa Elena y deberían por tanto retomar este nombre, o sea “Anfibolitas de Santa Elena”.

Particularmente para la zona del proyecto, las Anfibolitas de Medellín afloran desde la zona del portal occidental del túnel de Santa Elena, sector de la quebrada La Aguadita (km 10+200), en una longitud de túnel cercana a los 1,5 km hasta antes de la quebrada Santa Elena donde aflora el Gneis Migmatítico de Sajonia (km 11+550), para aparecer nuevamente unos 800 m después (km 12+480) y conformar así los terrenos del altiplano, interrumpido por el Stock de Samarcanda entre las abscisas km 15+250 a km 16+400, desde donde reaparecen las anfibolitas hasta el portal oriental del túnel en inmediaciones del cual se presenta en contacto fallado con el Gneis de La Ceja.

Como ya se mencionó, estas rocas presentan un avanzado estado de meteorización con escasos afloramientos relativamente frescos, entre ellos ambos portales del túnel de Santa Elena. En la siguiente tabla se muestra el perfil de meteorización típico para esta unidad, derivado de las muestras recuperadas en la perforación AO-TS-P-01, localizada en el parque corregimiento de Santa Elena y la AO-TS-P-02 en la vía principal, cerca de la cantera, en el alto.

Tabla 3-12 - Perfil de meteorización de las Anfibolitas de Medellín

| Perfil | Descripción |
|---|---|
| Suelo residual IB-IC<br>0 – 9 m | Limo pardo amarillento moteado de blanco y rojo en su parte más profunda, presenta una incipiente textura de la roca parental, plasticidad media a alta, humedad media, consistencia baja, también puede aparecer como un limo de color rojizo violeta moteado de blanco y negro muy homogéneo, posee una humedad media, consistencia baja y plasticidad de media a alta |

| Perfil | Descripción |
|---|---|
| Saprolito IC<br>9 – 20 m | Limo verde grisáceo amarillento con fracciones de arena gris, tiene una consistencia media, plasticidad de baja a media, humedad media alta, material de aspecto más homogéneo, presenta la textura de la roca y algunas estructuras heredadas (diaclasas). Comienzan aparecer fragmentos rocosos frescos, en proporciones inferiores al 15%. |
| Transición Suelo-Roca (IC-IIA)<br>20 – 35 m | Bloques rocosos de hasta 0,15 m de diámetro, meteorizado en los bordes, en medio de una matriz saprolítica, de color gris verdosas, limo arenosa, blanda y húmeda.<br>Recobro = 20%<br>R.Q.D = 0% |
| Roca IIA<br>35 m en adelante | Finalmente, se tiene una anfibolita de grano medio a fino, compuesta por anfíbol y feldespato, foliada y microplegada; dicha roca presenta un color gris verdoso con las discontinuidades oxidadas. Se presentan tramos de pequeñas venas intrusivas que logran borrar en ciertas partes la textura original de la roca. Dentro de esta roca son frecuentes diques básicos fracturados en contacto intrusivo con la anfibolita. |

Fuente: Estudio de Impacto Ambiental – Integral 2009

Las relaciones geológicas que presenta esta unidad con las adyacentes, dunitas, rocas de cabalgamiento, gneis y migmatitas y granitos son variadas, e incluyen zonas de falla, cabalgamiento e intrusiones. Con las rocas ultrabásicas (Dunitas de Medellín) su contacto es fallado, con disposición subhorizontal, localizándose las rocas ultrabásicas en la parte superior. La relación existente entre las anfibolitas y las rocas del Gabro de San Diego es claramente intrusiva; igualmente que con las rocas ácidas a intermedias del Stock de Samarcanda, encontrándose inclusive en algunos sectores rocas de contacto o cornubianas. El contacto con el Gneis Milonitíco de Sajonia es fallado en ambos lados mostrando la roca afectada por efectos de cizalla.

**Gneis de La Ceja (TRgLC).** Corresponde a gneises y granofelses bandeados, localmente plegados y con estructura migmatítica e intercalaciones de gneis miloníticos, cuarcitas y anfibolitas, y además de granulitas y migmatitas de textura granoblástica poligonal y metamorfismo retrogrado. Según la literatura, el contacto con la Anfibolita de Medellín es localmente intercalado y en otros lugares fallado.

Esta unidad se presenta alterada en general, tomando colores anaranjados, pardos, rojos y grises con bandas y manchas amarillas, la foliación está bien marcada y con estructura gnéisica fina. Localmente puede presentar segregaciones de cuarzo lechoso a lo largo de los planos de foliación; bandas de cuarzo y feldespato con textura granoblástica, con feldespato y micas. La parte milonítica se presenta como intercalaciones de paquetes en medio de anfibolitas, anfibolitas miloníticas y gneis milonítico. Según Ingeominas 2005, estas rocas se encuentran afectadas por una fuerte deformación dúctil, en cuerpos tabulares de dirección N45º - 60ºE.

El Gneis de La Ceja aflora en la parte final del trazado (por fuera de la banca vial proyectada), sobre el altiplano de San Nicolás, después del portal oriental del túnel, cubierto localmente por depósitos de vertiente. El perfil de meteorización es medianamente profundo, con desarrollo de suelos residuales y saprolitos que localmente superan los 10 m de espesor, caracterizados por un color rojo y anaranjado moteado de blanco, con un carácter areno limoso, deleznable, de media a baja compacidad, son escasos los afloramientos de roca fresca. A seguir se presenta el perfil de meteorización típico para esta unidad según datos de exploraciones realizadas por Solingral S.A. Ver las siguientes tablas.

Tabla 3-13 - Perfil de meteorización del Gneis de La Ceja

| Perfil | Descripción |
|---|---|
| Suelo residual IB<br>0 – 3 m | Desarrollo de materiales limoso hasta arenosos de color pardo, amarillento y rojizo, los cuales se diferencian de los suelos residuales de otras rocas por la presencia de cuarzo y micas |
| Saprolito IC<br>3 – 10 m | Limo arenoso que se caracteriza por el bandeamiento heredado de la roca parental, cuyas bandas son de color blanco, gris oscuro y diversas tonalidades de amarillo y rojo, además de un fuerte replegamiento |
| Transición Suelo - Roca (IC-IIA)<br>10 – 25 m | Arena y fragmentos de roca de color blanco y gris oscuro, caracterizada por un bandeamiento composicional y tamaño de grano grueso; es frecuente encontrar en las micas evidencias de efectos dinámicos tales como las bandas tipo “kink” |

Fuente: Solingral 2.009

Esta unidad aparece en contacto fallado con una escama de dunita y con las anfibolitas, aunque como ya fue mencionado se encuentra cubierto por depósitos de vertiente que no permiten definir claramente a lo largo de toda su extensión la tipología del contacto.

Tabla 3-14 - Gneis Milonítico de Sajonia

| Perfil | Descripción |
|---|---|
| Suelo residual (IB)<br>0.00 – 6,00 m | Arena de color pardo amarilloso, con bandeamiento de limo en colores rojizos, amarillo, gris y pardo; presenta venas de cuarzo de aproximadamente 10 cm de diámetro. Las arenas de los augen sobresalen en la matriz más fina permitiendo diferenciar la textura |
| Suelo residual (IB-IC)<br>6.00 – 15,00 m | Arena con fracciones menores de limo, se caracteriza por bandeamiento de colores rojizos, amarillo, gris y pardo, con mejor definición del bandeamiento. En este horizonte los minerales son más visibles |
| Saprolito (IC)<br>15.00 - 30,00 m | Arena limosa a limo arenoso, húmedo y suelto, donde son aún visibles las características texturales como estructuras tipo augen y un bandeamiento composicional muy definido. Comúnmente, se encuentra plegado |
| Transición Suelo – Roca (IC_IIA) 30,00 – 45,00 m | Finalmente, se tiene un gneis de grano medio, foliado, compuesto por feldespato, cuarzo, micas y anfíboles y microplegado. La roca presenta un color claro y variado con discontinuidades oxidadas |

Fuente: Estudio de Impacto Ambiental – Integral 2.009

El contacto con las unidades vecinas, en ambos lados corresponde a las Anfibolitas de Medellín, se presenta a modo de zonas de cizallamiento dúctil, en donde se observa roca fuertemente foliada y en ocasiones cizallada, además de pequeños cuerpos de esquistos meteorizados y fracturados.

#### 3.2.1.2.2 Complejo Ofiolítico de Aburrá

Esta unidad litodémica, propuesta por Correa y Martens (2000), para el corredor vial está representada solo por las Dunitas de Medellín.

**Dunitas de Medellín (JKuM).** Se trata de una roca compuesta esencialmente por olivino, con contenidos menores de cromita y magnetita; y alteraciones parciales serpentinita, está asociada en su origen a la base de la corteza oceánica. La meteorización de estas rocas genera suelos residuales que presentan condiciones y características muy diversas, con espesores variables entre 10 y 40 m. Adicionalmente, debe mencionarse que gracias al fuerte efecto tectónico y la posibilidad de disolución de los materiales allí presentes, existen zonas pseudocársticas con drenajes subterráneos, como se presenta hacia la zona del altiplano en terrenos de la vereda El

Plan del corregimiento de Santa Elena. Estas evidencias pseudocársticas incluyen oquedades (dolinas) en medio de las cuales algunas quebradas del sector se introducen al macizo rocoso, circulan subterráneamente y afloran más abajo, en la vertiente sur de la quebrada Santa Elena. Varios de estos rasgos fueron mapeados para el estudio de hidrogeología (Ver Estudio Hidrogeológico).

Desde el km 7+500 hasta el km 10+200, sector del portal de entrada, se tiene una zona de cabalgamiento, la cual pone en contacto las Anfibolitas de Medellín con las Dunitas y las Metabasitas del Picacho, no necesariamente se presentan afloramientos de dunitas pero puede aparecer ocasionalmente como bloques tectónicos y a modo de grandes bloques en los depósitos de talus de las laderas empinadas, cerca al portal occidental del túnel. También se tiene una escama de este tipo de rocas en el extremo oriental del corredor, entre las Anfibolitas de Medellín y el Gneis de La Ceja, cerca al portal oriental (km 18+500).

La meteorización de la dunita da como resultado suelos residuales que dependiendo de factores como el grado de fracturamiento del macizo, inclinación de los terrenos, geoformas y condiciones hidrológicas y de precipitación, presentan condiciones y características diversas. Según las condiciones morfológicas, los terrenos son de altas pendientes y los suelos derivados son poco espesor, en general menores de 15 m, de carácter limo arcilloso a limo arenoso y de color pardo rojizo intenso; por lo anterior son comunes los afloramientos de transición suelo-roca, que por su heterogeneidad pueden confundirse con depósitos de vertiente, al encontrarse además bloques en superficie.

Tabla 3-15 - Perfil de meteorización de la Dunita de Medellín

| Perfil | Descripción |
|---|---|
| Suelo residual IB<br>0– 5 m | Textura limosa de color pardo amarilloso con tintes rojizos, contiene pequeños nódulos ferrosos. Consistencia media a baja, plasticidad media |
| Saprolito (IC)<br>5 – 25 | Corresponde al horizonte de alteración de la dunita de mayor predominio en el área del altiplano, su espesor es discontinuo, incrementado un poco en zonas de alto fracturamiento de la roca. La textura es limo arcillosa, con presencia de minerales laminados de serpentina de color verde sin alteración. Por lo regular suprayace directamente la roca fresca, lo cual se caracteriza por el contacto tajante con este horizonte, o presenta un ligero cambio a roca parcialmente descompuesta y luego roca fresca. |
| Roca (IIA) IC<br>25 m en adelante | Es roca muy fracturada y completamente serpentinizada de color verde oscuro. |

Fuente: Estudio de Impacto Ambiental – Integral 2.009

La relación de las dunitas con las anfibolitas está enmarcada por una “zona de transición”, limitada por fallas y cizallas subhorizontales, identificadas en escasos puntos e interpretadas por rasgos morfológicos en otros, denominada “zona de cabalgamiento”, la roca se muestra afectada por cizallas, es así como se muestra alterada y fracturada desarrollando zonas de intensa serpentinización. Hacia la zona del portal oriental, los contactos son fallados con las dos unidades vecinas, por lo que se muestra la roca fracturada y serpentinizada.

#### 3.2.1.2.3 Zona de Cabalgamiento (Kmce)

Como “zona de cabalgamiento” se ha definido a un paquete de rocas tectónicamente muy afectado, que afloran en las partes media y final de la zona occidental, entre inmediaciones de la quebrada La Palencia y la quebrada La Aguadita o La Bocana. Es una franja subparalela a la

topografía, con una amplitud que oscila entre los 200 y 500 m. Este "paquete" constituye lo que podría denominarse una zona de melange (producto de un fallamiento inverso de muy bajo buzamiento a subhorizontal), compuesta por una gran diversidad de rocas como: milonitas, esquistos, cataclasitas y por metagabros, dunitas y anfibolitas afectadas tectónicamente. Las condiciones de las rocas, igualmente son diversas, presentándose en algunos sectores masivas y poco fracturadas y con buenas propiedades geotécnicas, y en otros completamente fracturadas y con evidencias de fallamiento, lo que desmejora la calidad del macizo[1].

El perfil de meteorización de estas rocas, al ser la mezcla de varias unidades, esquistos verdes, dunitas serpentinizadas, anfibolitas con una foliación fina y gneis, exhiben diferentes tipos de perfiles, en algunas zonas se muestra un gran desarrollo de suelos, mientras que en otros afloramientos se presenta la roca menos meteorizada e intemperizada. A seguir se presenta un perfil generalizado de esta unidad: Ver siguiente tabla.

Tabla 3-16 - Perfil de meteorización de las rocas de Cabalgamiento

| Perfil | Descripción |
|---|---|
| Suelo residual IB<br>0 – 5 m | Textura limosa de color pardo rojizo con tintes amarillentos y negros. Consistencia media a baja, plasticidad media |
| Saprolito (IC)<br>5 – 15 | Material limoso, localmente se muestra la foliación subhorizontal y fuertes planos de cizalla, el material se desbarata fácilmente en escamas esquistosas. En términos generales el perfil de meteorización es bastante irregular, el primer horizonte puede o no estar presente |

Fuente: Estudio de Impacto Ambiental – Integral 2.000

Esta unidad denominada de Cabalgamiento se tiene aflorando desde la abscisa km 7+500 hasta la zona del portal de entrada del Túnel de Santa Elena (km 10+200).

#### 3.2.1.2.4 Intrusivos cretáceos

**Batolito Antioqueño (KcdA).** El Batolito Antioqueño hace parte del ciclo de actividad magmática del Cretáceo Superior que afectó la paleocordillera central, relacionado a un proceso de subducción que permitió la generación de un magma granodiorítico a partir del cual cristalizó el batolito y los cuerpos relacionados como el Stock de Las Estancias y el de Samarcanda. Las rocas del Batolito Antioqueño y los procesos de meteorización y erosión que sobre ellas han actuado generan geoformas de colinas redondeadas de poca altura.

El Batolito Antioqueño, como tal aflora hacia el final del trazado en la zona de topografía suave del altiplano, en inmediaciones del Aeropuerto a partir de la glorieta de Sajonia, km 19+250, por fuera del alineamiento propuesto en este trabajo.

La roca fresca, tonalita, granodiorita, diorita, granito, se caracteriza por presentar una textura granítica, equigranular e hipidiomórfica, de color blanco moteado de negro y pardo, micáceo, con un desarrollo de potentes perfiles de meteorización en el altiplano, el cual en general está constituido por saprolitos limo arenosos, tal como se puede observar en la siguiente tabla:

Tabla 3-17 - Perfil de meteorización del Batolito Antioqueño

| Perfil | Descripción |
|---|---|
| Suelo residual IB<br>0 – 5 m | Limo arenoso de color rojo, amarillo rojizo o amarillo; de consistencia alta, firme y plasticidad baja. |

[1] Integral, 2000

| Perfil | Descripción |
|---|---|
| Saprolito (IC)<br>5 – 45 m | Arena limosa de color amarillo rojizo, de consistencia alta, firme, baja plasticidad, cementación moderada. Se alcanzan a distinguir en los bloques de roca sistemas de diaclasas rellenas por oxidaciones de minerales ferromagnesianos. Roca extremadamente meteorizada donde se conserva la estructura original en bloques, en un porcentaje aproximado de 10 a 20% y de dimensiones métricas, se caracterizan por presentar meteorización esferoidal, o anillos de cebolla. |
| Transición saprolito – Roca (IC – IIA)<br>45 – 65 m | Suelo saprolítico con abundantes bloques de roca moderadamente meteorizada. Dichos bloques se encuentran frescos a ligeramente meteorizados en formas redondeadas como remanentes de la meteorización esferoidal (cebolla). El saprolito es una arena limosa de color amarillo. |
| Roca (IIA)<br>65 – 80 m | Roca ligeramente meteorizada de color blanco moteado de negro y rojo, masiva, de textura granítica. Se caracteriza por las alteraciones de los minerales ferromagnesianos generando pequeñas aureolas de color rojizo y cobre. Las diaclasas se encuentran rellenas por oxidaciones de hierro y arcillas tipo caolín por alteración del feldespato |

Fuente: Estudio de Impacto Ambiental – Integral 2.009

Los contactos del Batolito Antioqueño con rocas metamórficas del Complejo El Retiro, particularmente con el Gneis de La Ceja, es intrusivo, con varios tramos removilizados por las fallas del Sistema La Honda.

**Stock de Samarcanda (KcdS).** Hace parte del denominado Batolito Antioqueño, definido anteriormente. Estas rocas presentan como característica importante una homogeneidad litológica, con un predominio de rocas del tipo tonalitas – granodioritas y granito micáceo y granatífero, de textura fanerítica con un tamaño de grano medio a grueso, color moteado. Mineralógicamente está constituido por cuarzo, feldespato potásico, plagioclasa sódica, biotita, moscovita y pequeñas cantidades de granate y circón. Presenta inyecciones cuarzosas (aplíticas) además de filones con claros efectos de mineralización hidrotermal.

Aflora hacia la parte final de la zona intermedia del túnel de Santa Elena, como un plutón que intruye a las anfibolitas del sector y que genera localmente rocas de contacto (cornubianas), este cuerpo aparece desde la abscisa km 15+250 a km 16+850 en el Túnel de Santa Elena.

Los perfiles de meteorización de esta unidad son espesos. A partir de las exploraciones realizadas, que incluyen una perforación de 151 m y varios sondeos geoeléctricos verticales (SEV). Los resultados muestran el predominio de arenas y limos arenosos sobre el basamento. En la siguiente tabla se presenta el perfil generalizado según la exploración realizada AO-TS-P-03 y AO-H-P-03.

Tabla 3-18 - Perfil de meteorización del Stock de Samarcanda

| Perfil | Descripción |
|---|---|
| Suelo residual (IB)<br>0 – 10 | Material arenoso con algunas fracciones de limo, las coloraciones son pardas amarillentas con manchas negras y blancas, es un material de baja compacidad, con alta humedad, localmente se puede observar la textura de la roca en algunas pequeñas fracciones un poco más sanas pero que se disgregan fácilmente |
| Transición suelo residual - saprolito (IB-IC)<br>10 – 30 | Arena donde se observa un poco más la textura de la roca granítica en coloraciones pardas, negra, amarillo y blanco. Compacidad baja, humedad media a alta |
| Saprolito (IC)<br>30 – 80 | Arena limosa con textura de la roca parental, presenta abundante moscovita y se logran ver colores blancos, negros y amarillos, presenta una humedad baja y |

| Perfil | Descripción |
|---|---|
| | es un material fácil de disgregar. |
| Transición Suelo – Roca (IC-IIA) 80 – 90 m | Bloques de roca de hasta 0,3 m de diámetro, con presencia de una fuerte oxidación y meteorización de minerales, rodeados de una matriz saprolítica limo arenosa de color pardo y de humedad baja, con una relación matriz – bloques de 30% - 70%. |
| Roca (IIA) 90 – 150 | Granito, compuesto por micas, feldespatos sódicos y cuarzo principalmente, en la cual se presenta zonas, donde la roca posee fuerte fracturamiento en pequeños bloques subangulares oxidados y zonas donde la roca se presenta sana, con alta resistencia y ningún tipo de discontinuidad u oxidación. Se pueden encontrar niveles arenosos saprolíticos. Las superficies de las discontinuidades presentan percolación de agua la cual propicia fuertes oxidaciones a óxidos de hierro de color anaranjado oscuro y amarillo. Recuperación: 95%. R.Q.D: 95% |

Fuente: Estudio de Impacto Ambiental – Integral 2.009

El contacto de esta unidad con las anfibolitas es netamente intrusivo a lo largo de toda su extensión.

**Gabro de San Diego (KgSD):** Descrito por Botero (1963) quien lo consideró como una cúpula menor del Batolito Antioqueño. Posteriormente Restrepo y Toussaint (1984), lo clasifican como stock, determinan un área de unos seis kilómetros cuadrados y le dan el nombre de Stock de San Diego. Este cuerpo tiene forma irregular ligeramente alargada con su eje principal de dirección NW. Es un cuerpo plutónico básico, varían composicionalmente desde dioritas hasta gabros, donde se presenta plagioclasas y hornblenda de tamaño hasta centimétrico (hasta unos 15 cm). Como rasgo dominante esta unidad exhibe un avanzado proceso de meteorización, favorecido por las condiciones climáticas y topográficas en las que se encuentra enmarcada, desarrollando suelos residuales, que pueden alcanzar hasta 45 m de espesor, como en el área del Seminario Mayor.

Este plutón aflora hacia la zona inicial del corredor, desde el sector del Seminario Mayor, en el antiguo estadero Baltimore sobre la variante Las Palmas. En este cuerpo se excavaría la totalidad del túnel corto con el que inicia el proyecto de conexión Aburrá – Oriente. La vía luego de este túnel y hasta la quebrada La Palencia (km 7+500) los suelos a excavar se asocian a este cuerpo plutónico.

Este gabro desarrolla un perfil de meteorización, con un carácter limo arcilloso y de tonalidades rojizas claras (blanco con manchas pardas a ocres), que varían comúnmente a profundidad a una arena limosa con textura de roca. A partir de las exploraciones realizadas y otras recopiladas se presenta un perfil generalizado (exploraciones AO-TB-P-01, AO-TB-P-02/03, AO-TB-P-04/05, AO-TB-P-06 y AO-TB-P-07). Ver siguiente tabla.

Tabla 3-19 - Perfil de meteorización del Gabro de San Diego

| Perfil | Descripción |
|---|---|
| Suelo residual IB 0 – 5 m | Limo arcilloso de color pardo rojizo, homogéneo sin textura de roca, humedad media y consistencia baja |
| Transición suelo residual – Saprolito (IB-IC) 5 – 15 m | Limo arcilloso de color pardo rojizo, moteado de negro y blanco, con un poco de textura de la roca, poco plástica, poca cohesión y baja consistencia |
| Saprolito (IC) 15 – 35 | Limo arenoso pardo amarillento a grisáceo, suelto con algunas bandas limo arcillosas, envolviendo fragmentos rocosos intensamente meteorizados y fracturados, muy débiles. Consistencia media a baja, humedad moderada y |

| Perfil | Descripción |
|---|---|
| | plasticidad baja. Se observa la textura de una roca ígnea plutónica básica de grano grueso. Existen bolas de roca fresca (meteorización esferoidal) de hasta 0,9 m de diámetro. |
| Transición Suelo- Roca (IC – IIA)<br>35 – 45 | Roca fracturada y alterada, se presentan venas calcáreas, fracturas antiguas selladas y algo de fracturamiento mecánico. Son comunes las evidencias de meteorización esferoidal.<br>Recuperación: 80%. RQD: 20% |
| Roca (IIA)<br>45 m en adelante | Roca poco fracturada y meteorizada, de resistencia dura, con alteraciones locales de discontinuidades, se presentan diques centimétricos y venillas, no se aprecian alteraciones ni patinas.<br>Recuperación: 95%. RQD: 85% |

Fuente: Estudio de Impacto Ambiental – Integral 2.009

La relación de esta unidad litológica, tanto con las Dunitas de Medellín como con las rocas del cabalgamiento (obducción), es de carácter intrusivo, con frecuentes diques básicos que salen del Stock y se inyectan en las rocas vecinas.

#### 3.2.1.2.5 Depósitos de Vertiente

Bajo esta denominación de depósitos no litificados se incluyen los depósitos de talus, de deslizamiento y los flujos de escombros y/o lodos que por su extensión permiten ser cartografiados. Por sus espesores y grado de madurez es conveniente cartografiarlos como unidades geológicas independientes y no como simples formaciones superficiales.

**Depósitos de Talus (Qt).** Estos depósitos corresponden a bloques rocosos que se presentan de forma superficial, sueltos en algunas de las vertientes. Los materiales que los constituyen presentan variadas litologías dependiendo de la zona donde se localizan, así se pueden encontrar talus de anfibolitas, dunitas y metagabros. Estos depósitos se localizan en el sector de la vía de acceso occidental y descansan principalmente sobre las rocas de cabalgamiento (Kmce); aparecen en las abscisas km 8+800, km 9+000 a km 9+200 y km 9+400 a km 9+700.

**Depósitos de Deslizamiento (Qd).** Son el producto de fenómenos de inestabilidad o movimientos de masa ocurridos en los terrenos inclinados, generados por una combinación de factores como la gravedad, el agua y la intervención humana, entre otras. Su identificación y delimitación se facilita porque generalmente están asociados a los lugares de las vertientes donde se observan condiciones de menor pendiente y topografía suave, seguidos de una zona de pendiente alta en forma de escarpe, desde donde se desprendieron los materiales que los componen.

En el corredor vial son relativamente frecuentes, pero en general son de poca extensión. Están constituidos por bloques rocosos subangulares a subredondeados, heterométricos, embebidos dentro de una matriz limo arenosa a limo arcillosa; sin embargo, pueden presentarse constituidos casi en su totalidad por materiales finogranulares y localmente, con mayor frecuencia hacia el sector de Santa Elena tienen un aporte importante de ceniza volcánica. El espesor es bastante variable, entre uno y diez metros. En el sector de Baltimore estos depósitos se componen de un limo arcilloso micáceo, color rojo con manchas amarillas y blancas con fragmentos de roca meteorizados que dejan residuo arenoso; son de consistencia alta a media, aspecto homogéneo, humedad baja a media y plasticidad alta. Para el sector de Santa Elena, los materiales encontrados que conforman depósitos coluviales corresponden a materiales limosos de color pardo, aspecto grumoso, con pequeños bloques rocosos subangulares y presencia de materia

orgánica y ceniza volcánica; además pueden contener pequeños bloques rocosos subangulares, son materiales de baja densidad, consistencia baja, humedad baja y algo plástica.

**Flujos de escombros y/o lodos (Qf).** Estos depósitos están constituidos por flujos de varias generaciones, cuyos clastos presentan diferentes grados de meteorización. Son generados al producirse hacia las partes altas de las vertientes una saturación y pérdida de resistencia, lo que hace más vulnerables a fenómenos tales como las altas precipitaciones o los movimientos sísmicos. Estos eventos en caso de ocurrir, le confieren a los suelos un carácter viscoso, debido a la mezcla del agua con los suelos arcillosos y limosos, de forma que pueden descender más o menos controlados por los cauces de las corrientes, arrastrando nuevos materiales y mezclándose caóticamente hasta encontrar unas condiciones de baja pendiente que permitan su depositación. Según la granulometría de los materiales que conforman la fuente, pueden darse depósitos de flujo con predominio de bloques rocosos denominados flujos de escombros o de la fracción fina (en general arcilla o limo) en cuyo caso se llaman flujos de lodos. Sin embargo, dada la mecánica del fenómeno, que no permite una selección o clasificación del material, pueden existir dentro del mismo depósito zonas que correspondan a flujos de escombros y otras a flujos de lodos. El estado de meteorización, su grado de incisión y altura respecto al fondo de las vaguadas permitirá definir su edad relativa y grado de estabilidad.

**Cenizas volcánicas.** Una condición especial de estos terrenos son las cubiertas superficiales de cenizas volcánicas, las cuales pueden presentarse a modo de capas que modelan y suavizan los terrenos o haciendo parte de la matriz de algunos de los depósitos de vertiente. El espesor de las capas más continuas depende de las condiciones geomorfológicas, siendo más espesas hacia la zona del altiplano, llegando alcanzar unos dos metros de potencia y disminuyendo hasta unos 0,70 cm en las zonas de las vertientes y no se encuentran presentes donde las laderas son más empinadas, como es el caso de la mayor parte del trazado de la vía de acceso occidental. Las cenizas, dado su espesor y lo reducido de sus afloramientos no son cartografiadas dentro del plano geológico.

#### 3.2.1.2.6 Depósitos Antrópicos – Llenos (Qll)

Este tipo de depósitos artificiales son poco comunes a lo largo del corredor vial, están asociados con los desarrollos urbanos y constructivos de una ciudad en crecimiento. Por lo general tienen poca extensión y poco espesor, y se pueden presentar de dos tipos, los llenos que cumplen normas técnicas, producto de desarrollo de vías o para edificaciones y los llenos cuyo origen es más informal y están constituidos a modo de botadero de escombros donde se incluyen ladrillos, basura, cemento, etc. En el corregimiento de Santa Elena, sector de la cancha de futbol, se encuentra un lleno de casi 10 m de potencia y hacia la zona de Sajonia, km 19+945, se encuentra un lleno de unos cuatro metros de profundidad conformado por un limo con gravas y fragmentos rocosos, ladrillos, arena gris, presenta consistencia media a alta, humedad baja a media.

### 3.2.1.3 Geología Estructural

Considerando la posición geográfica de Colombia, el país se encuentra dentro de un complejo marco geodinámico de convergencia de las placas: Nazca, Caribe y Sur América, la micro placa Panamá y el Bloque Andino. En este marco tectónico el proyecto vial se sitúa en el extremo norte de la cordillera Central sobre el Bloque Andino, zona donde se ha generado una estructura cortical con un complejo sistema de fallas regionales. Estas estructuras, en el departamento de Antioquia,

se distribuyen en dos grandes sistemas de fallas aproximadamente paralelas entre sí, donde el primer sistema lo conforman la zona de fallas Palestina (al este) y el segundo sistema corresponde a Cauca-Romeral (al oeste), con una gran porción de la cordillera Central en el medio de los sistemas. El Valle de Aburrá está íntimamente ligado en su origen y evolución con los alineamientos más orientales del sistema Romeral, incluso se plantean que algunas trazas de este sistema (con una expresión moderada) se separan del tren principal, al sur del Valle de Aburrá, y se extienden sobre el altiplano oriental, involucrando los terrenos del proyecto vial de interés.

Teniendo en cuenta el marco tectónico regional de esta parte de la cordillera, los resultados obtenidos con el análisis de la información existente, la fotointerpretación y los reconocimientos de campo, en el área de estudio se presentan como estructuras importantes fallas, zonas de cizalladura de diferente magnitud, planos de foliación y diaclasas.

#### 3.2.1.3.1 Estructuras de Cabalgamiento

Dentro de las estructuras presentes a lo largo del corredor vial, se tienen las estructuras de cabalgamiento, las cuales son estructuras definidas por las características que les imprimen a los materiales involucrados. Para el área de estudio se definen dos zonas de cabalgamiento que a su vez afectan materiales de diferente origen como son las Dunitas de Medellín, las Anfibolitas de Medellín y el Gneis Milonitíco de Sajonia. A seguir se hace una breve descripción de estas estructuras:

**Cabalgamiento entre dunita y anfibolita:** Es una estructura a modo de escama, que envuelve los materiales mencionados, imprimiendo en estas rocas características esquistosas, se observan así esquistos verdes talcosos, con superficies de lisos y estructuras de foliación que muestran buzamientos fuertes con dirección hacia el altiplano y se suavizan hacia el valle, como se puede observar en la quebrada Santa Elena, margen izquierda, un poco arriba del alineamiento de la vía, pero donde puede ser factible que se muestre en algunos de los taludes proyectados. Este cabalgamiento muestra entonces una zona de rocas muy fracturadas y mezcladas entre anfibolita, dunita, dunita serpentinizada, esquistos verdes, las cuales evidencian un comportamiento frágil, especialmente hacia el borde donde se tiene la dunita. La edad de este emplazamiento no está claramente definido.

**Milonita al interior del macizo metamórfico:** Se muestra un emplazamiento asociado al complejo ofiolítico, con características de un comportamiento dúctil de los materiales involucrados, especialmente al interior del macizo de Anfibolitas de Medellín, donde se evidencian zonas de recristalización con zonas de mayor densidad en el patrón de foliación paralelas al plano de cabalgamiento. Su origen se puede interpretar como una zona interna de deformación dúctil (metamorfismo dinámico) que obligó a la recristalización de una franja de anfibolitas y gneises. La disposición espacial de esta franja de roca milonítica está íntimamente relacionada con el borde oriental cuerpo de dunitas de Medellín, con foliación subparalela al plano donde se describen los esquistos verdes, la cual presenta un alto ángulo de buzamiento hacia la superficie del altiplano y se torna más bajo con la profundidad. Es importante mencionar que estos materiales no representan condiciones pobres del macizo sino rasgos de recristalización, cambios litológicos, mineralización, foliación, etc.

### 3.2.1.3.2 Fallas principales

Para fines de comprensión y ubicación geográfica, se describirán las fallas geológicas en el orden en que aparecen con el abscisado del proyecto, es decir, empezaremos con las de la zona occidental y terminaremos con las que se encuentran en la zona más oriental del proyecto:

En primer lugar está la zona del túnel Seminario, allí no se tiene registro en planos ni en documentación alguna referente a fallas en la zona, sin embargo con los estudios de tomografía eléctrica se detectaron 5 posibles zonas de falla o lineamientos locales que no son detectados en superficie pero que el estudio geoeléctrico indica una posible conexión a profundidad. Estas zonas corresponden a una zona de falla cerca al portal sur del Túnel Seminario (Esto se confirmó con otros estudios complementarios de la zona de Emportalamiento), otra a media ladera del costado sur, otra cerca al talud entre el colegio y la terraza inferior de la antigua cancha de fútbol, y las otras dos a media ladera hacia el costado norte del cerro dónde llega el portal norte del túnel. Cabe resaltar que por el relieve, el tipo de terreno que es puro suelo saprolítico del gabro de San Diego y con los recorridos de campo, no se observa evidencia superficial alguna que confirme las fallas en las 4 zonas diferentes a la primera. Ver la siguiente figura.

Figura 3-1 - Zonas posibles de falla en el trazado del túnel Seminario

Falla La Pastora : Tiene una dirección N15-20°E, hacia la vertiente de la vía Las Palmas separa los cuerpos litológicos del gabro de San Diego y las dunitas, luego cruza la zona de la vía a cielo abierto colindando con las rocas de la zona de cabalgamiento y posteriormente se sigue en dirección N-NE hacia las Metabasitas del Picacho.

La falla La Aguadita que tiene una dirección general entre N50°W y N60°W y buzamientos fuertes a verticales; separa en la parte alta de la montaña, las formaciones geológicas de la Dunita y la

Anfibolita, mientras que en la parte inferior por donde cruza la vía separa las rocas de cabalgamiento de la Anfibolita. Por lo regular las rocas afectadas se presentan fracturadas; esta falla no cruza el lineamiento del Túnel Santa Elena pero si pasa cerca de su portal occidental.

Falla Perfil C-D: Esta falla fue detectada recientemente con las investigaciones de tomografía eléctrica y AMT; está ubicada a media ladera entre el portal occidental del túnel Santa Elena y el Alto cerca al restaurante El Silletero. Se estableció que tiene conexión hidráulica con el Túnel Santa Elena con un buzamiento subvertical.

Fallas de contacto litológico entre Anfibolitas y el Gneis Milonítico de Sajonia: La falla más occidental presenta una dirección N-S y la falla Oriental dirección N20-30°W; separa el cuerpo central del Gneis con los cuerpos laterales de las Anfibolitas. Con la tomografía se corroboró la conectividad del acuífero subterráneo con los ejes de los túneles de Santa Elena.

La falla Santa Elena cruza cerca del corregimiento del mismo nombre, presenta dirección entre N20°E y N50°E siguiendo el lineamiento de la quebrada San Pedro y tiene buzamientos altos hasta verticales, con desarrollo generalmente de roca fracturada. Esta falla no fue detectada con la tomografía eléctrica, sin embargo para fines de cálculos hidrogeológicos se tuvo en cuenta para establecer el escenario más desfavorable respecto a las infiltraciones de agua hacia el Túnel Santa Elena.

El lineamiento San Ignacio que tiene dirección E-W cruza el eje del Túnel Santa Elena cerca del Alto de Cerro Verde (Junto a la estación de servicio de Terpel), se detectó superficialmente mediante la tomografía aunque la audio magneto telúrica (AMT) no mostró una conectividad profunda con el eje del túnel Santa Elena.

Fallas 1 y 2 del perfil L-M: son dos pequeñas discontinuidades locales detectadas con la tomografía y que con la AMT no muestran una conectividad profunda con el eje del túnel Santa Elena.

Falla Samarcanda 3: Va en dirección N30°E por la quebrada La Maruchenga; no muestra una conectividad profunda.

Lineamiento Samarcanda 4 : Aparece como una parte recta en dirección N45-50°E siguiendo uno de los tributarios de la Quebrada La Berraquera, tiene poca longitud, atraviesa parte del Stock de Samarcanda y cruzaría perpendicularmente la traza de los ejes de los túneles de Santa Elena en el Km 15+500. Los métodos geofísicos no lo detectaron como una falla, por lo que se clasifica como un lineamiento.

Falla transversal Samarcanda: Viene en dirección E-W atravesando varias litologías como el contacto entre las anfibolitas y un pequeño cuerpo de dunitas, luego cruza transversalmente el Stock de Samarcanda y cruza diagonalmente los ejes de los túneles Santa Elena en el Km15+800, por lo que hay que tener cuidado en el momento constructivo con las posibles cuñas inestables que se podrían formar en el techo de los túneles.

Falla Samarcanda 1: Es la principal estructura de la zona, va en dirección N-S como van las diversas fallas de tipo regional en esta zona, cruza longitudinalmente el Stock de Samarcanda y su traza forma un valle en “V” profundo por el que transita la quebrada Yarumal. El cruce de esta falla con el eje de los túneles es un sitio crítico de mucho cuidado porque convergen 3 fenómenos que son la zona de falla, la menor cobertura con al techo del túnel (150 m aproximadamente) y agua superficial por el cauce de la Quebrada Yarumal. La tomografía ha mostrado que cubre una zona amplia de unos 200 m aproximadamente.

Falla de Las antenas: Es una estructura de poca longitud con dirección N40°E que cruza perpendicularmente la traza del eje de los túneles Santa Elena en el Km17+700 aprox.

Otra falla importante es la Caney que tiene una orientación general N50°W y buzamientos verticales, aflora en inmediaciones de la vereda La Quiebra y pone en contacto un pequeño cuerpo de dunitas con las anfibolitas; las rocas afectadas por esta falla por lo regular se presentan altamente fracturadas y cizalladas, con lisos y estrías y sus zonas de influencia tienen en general menos de 30 m de ancho.

Todas las unidades geológicas incluyendo las unidades estructurales como fallas o lineamientos se encuentran en el Anexo 3-2- en los planos AO-VI-GO-002, AO-VI-GO-003, AO-VI-GO-004 y AO-VI-GO-005; las estructuras de carácter local detectadas recientemente se encuentran descritas y referenciadas en los diversos planos del Anexo 3-3- Estudio hidrogeológico realizado por GEODATA, el cual hace parte integral de esta información complementaria.

#### 3.2.1.3.3 Diaclasas

Las diaclasas son relativamente abundantes y afectan indistintamente las rocas ígneas y metamórficas. De acuerdo con el análisis de las diaclasas inventariadas en las zonas donde el proyecto vial se desarrolla en superficie, se han determinado varios sistemas de fracturas, ninguno de los cuales se presenta como principal o dominante en el macizo ígneo - metamórfico que cruzará el trazado.

- Para la anfibolitas se han determinado 2 sistemas principales, cada uno de los cuales representa menos del 15 % de la población inventariada, a saber:
  - Un sistema con orientación comprendida entre N60°-75°E y con buzamientos variables, mayores de 45°, tanto al noroeste como al sureste, hasta verticales.
  - Otro sistema con orientación comprendida entre N30°-45°W, con buzamientos muy variables, mayores de 30°, tanto al noreste como al suroeste, hasta verticales.

  El resto de la población está constituida por diaclasas con disposición subparalela y diagonales a las de los sistemas anteriores. La mayoría de estas diaclasas son cerradas, con superficies desde planas hasta onduladas, suaves y rugosas; presentan persistencia desde media hasta alta, con longitudes que varían entre 3 y 20 m y espaciamientos muy variables entre 0,1 y 1 m.
- Para las rocas ultrabásicas se definieron 2 sistemas principales, cada uno de los cuales representa menos del 25% de la población inventariada, a saber:
  - Un sistema con orientación comprendida entre N15°-30°E con buzamientos desde 50° al noroeste hasta verticales.
  - Otro sistema con orientación comprendida entre N60°-75°W con buzamientos bastante variables, mayores de 50° tanto al noreste como al suroeste, hasta verticales.

  El resto de la población presenta una orientación distribuida tanto al noreste como al noroeste y con buzamientos igualmente variables, en general mayores de 50°. Todas estas diaclasas son por lo general planas, suaves a rugosas y cerradas, de persistencia moderada, con longitudes entre 3 y 15 m.

- Para las rocas del Stock de San Diego el inventario de diaclasas fue limitado, debido a que los afloramientos de éstas son igualmente escasos, por lo tanto no se identifica ninguna familia predominante sino que se presenta un rango variable de disposiciones con orientación tanto al noreste como al noroeste y este-oeste y con buzamientos igualmente muy variables en general mayores de 40°. Estas diaclasas son por lo regular planas, rugosas y cerradas y de persistencia baja a media, con longitudes entre 1 y 10 m.

De acuerdo con el análisis de las diaclasas inventariadas en la zona del túnel proyectado, igualmente se determinaron varios sistemas de fracturas, ninguno de los cuales es dominante en este macizo ígneo metamórfico.

- Dentro de las anfibolitas sobresale un sistema que constituye menos de 20% de la población inventariada y otros tres, cada uno de los cuales representa menos del 15%, a saber:
  - El primer sistema con orientación comprendida entre N60°-80°W con buzamientos variables, mayores de 30° (en general mayores de 70°) tanto al noreste como al suroeste.
  - Los otros tres sistemas con orientaciones entre N15°-30°E; N75°-85°E y N10°-20°W respectivamente, con buzamientos bastante variables, mayores de 40° (en general mayores de 70°) a verticales.

  El resto de la población está constituida por diaclasas con disposición subparalela y diagonales a las de los sistemas anteriores. La mayoría de las diaclasas son en general cerradas, con superficies desde planas hasta onduladas, suaves y rugosas, a veces rellenas por delgadas venas de cuarzo, con espesores menores de 1cm, presentan persistencia desde media hasta alta y muy alta, con longitudes que varían entre 3 y más de 20 m y espaciamientos variables entre 0,1 y 2 m.
- Para las rocas del Stock de Samarcanda, el inventario fue limitado, debido a que los afloramientos de diaclasas son escasos, por lo tanto no hay una tendencia marcada, sino varias familias con disposiciones variables, destacándose las siguientes: N15°-30°W; N30°-50°E; N50°-70°W y N10°-20°W con buzamientos igualmente variables, en general mayores de 45° con tendencia a vertical. Con superficies onduladas rugosas, persistencia media alta con longitudes entre 3 y 20 m y espaciamientos entre 0,6 y 2m.
- Para la zona oriental, donde aflora el Batolito Antioqueño no se realizó inventario de diaclasas, puesto que solo aflora suelo residual y las escasas estructuras heredadas de la roca parental no son representativas para establecer tendencias.

#### 3.2.1.3.4 Foliación

La foliación general de las anfibolitas presenta orientación comprendida entre N30°-45°W y N10°-20°W, con buzamientos variables, en general menores de 40°. Por lo regular la foliación no es una discontinuidad destacada en estas rocas y no representan un plano marcado de debilidad. Sin embargo, en las zonas de los dos portales las tendencias de la foliación son en general sub-horizontal, con posibilidad de definir relajamientos de algunas lajas rocosas en la clave.

### 3.2.1.4 Geomorfología

El corredor vial se localiza entre el valle de Aburrá y el altiplano de San Nicolás, con alturas entre sobre el nivel del mar que oscilan entre 1.570 y 2.800 m. El conjunto de altiplanos y el valle del río

Medellín o Aburrá conforman la característica geomorfológica más sobresaliente de la parte norte de la Cordillera Central colombiana. De acuerdo con Arias (1995) el valle de Aburrá es entonces un relieve de segundo orden, posterior a los altiplanos a los cuales corta. La historia geomorfológica más antigua de este sector de la cordillera la conforman el conjunto de altiplanos formados en sucesivos pulsos del levantamiento orogénico durante el Terciario. Un aspecto relevante para el estudio geomorfológico es el hecho conocido, desde tiempos de los primeros investigadores, que el valle en su conjunto presenta peculiaridades en su forma general, lo que ha llevado a algunos investigadores a pensar que la forma actual es el resultado de una evolución compleja en la que se entremezclan procesos tectónicos y capturas entre diferentes cuencas[2].

A escala más detallada[3], Corantioquía adelantó la cartografía a escala 1:100.000 de toda su jurisdicción que comprende la parte centro norte del departamento de Antioquia, y considerando este trabajo la zona del proyecto vial se localiza en las siguientes unidades de relieve: Superficies de erosión, Escarpes Regionales y Cañones. Para los terrenos se tienen pendientes fuertes en las zonas de escarpes y cañones, mientras son moderadas y suaves en las superficies de erosión. El avance remontante del frente erosivo del rio Aburrá o Medellín, a través de algunas corrientes por donde atraviesa el corredor vial, ha generado un sistema de lomos de flancos empinados, rectos y de tope agudo; además, las corrientes que los separan transcurren por profundos y estrechos cañones con tendencias similares, tal es el caso de la quebrada Santa Elena.

Dentro de las condiciones geomorfológicas de los terrenos, los cuales se están enmarcados dentro de un paisaje de montaña, se tienen como características importantes los procesos superficiales o morfodinámicos que definen diferentes geoformas y su grado actual de estabilidad. En términos generales se presenta una actividad morfodinámica media a baja; relacionada con sobrepastoreo generalizado, antiguas cicatrices de deslizamiento que tiene asociados o no depósitos de vertiente, algunos deslizamientos activos y zonas húmedas y de empozamiento y finalmente, hacia las márgenes de algunas corrientes se presenta erosión de orillas y desgarres superficiales.

#### 3.2.1.5 Sectorización Geológico – Geotécnica del Corredor

La sectorización del corredor vial, incluyendo vías de acceso y túneles, considera aspectos que guardan estrecha relación con el comportamiento, las características y estabilidad de los terrenos que conforman el corredor vial, entre los que se incluyen: litología, condiciones del macizo, relieve, grado de evolución, rasgos estructurales, grado de meteorización y procesos morfodinámicos. según estas premisas fueron determinados los siguientes sectores:

##### 3.2.1.5.1 Sector 1. Túnel El Seminario: (Km 5+050 - Km 5+900)

En este sector el trazado de la vía inicia su recorrido en un intercambio para luego entrar en el túnel, con una longitud de 782 m, Anexo 3-2 - Plano AO-VI-GO-004. El trazado sigue la parte baja de la cuchilla del Seminario pasando de sur a norte debajo del mismo, en un relieve moderado de lomos alargados, de tope redondeado, amplio y de alguna extensión, con disposición consecuente con el drenaje y cuyos flancos presentan rasgos variables dependiendo de la presencia o no de cauces activos. La zona de estudio presenta una morfologia variada en ambos portales, ya que sobre el portal norte se tiene vertientes bajas rectas (menores a 25%) que presentan corrientes que drenan a la quebrada Santa Elena, mientras le portal sur tiene vertientes moderadas (25 -

[2] Rendón, 2003
[3] CORANTIOQUIA (2002)

50%) de forma cóncava, que corresponde a la parte superior de corrientes que drenan al rio Medellín.

Son terrenos constituidos por la unidad del Gabro de San Diego; intensamente meteorizado, con desarrollo de un perfil de suelos profundo, que puede alcanzar 45 m de espesor o más según las exploraciones. Este material presenta características de un suelo de color rojizo con motas blancas y de textura arcillo limosa en superficie, tornándose limo arenosa con la profundidad donde se identifica el saprolito. Allí el material es más arenoso exhibiendo minerales de gran tamaño (hornblendas), esta unidad puede localmente estar cubierta por depósitos de vertiente como es el caso de la zona de los portales de entrada, donde se encontró tanto en la exploración del subsuelo como en campo un depósito de espesor cercano a los siete metros. Los procesos erosivos presentes están influenciados por la facilidad que presentan los suelos saprolíticos a ser erodados por aguas superficiales y concentradas, con desarrollo de surcos, canalones y pequeñas cárcavas y además se presentan cicatrices de fenómenos de remoción en masa superficiales.

El lado SW del túnel implica la conformación de dos plazoletas, una para el acceso principal con sección vial máxima y otra, más al oeste, con una menor sección para un lazo de empalme con la Vía Las Palmas. Dichas excavaciones se realizarán en su totalidad sobre suelos y depósitos de deslizamiento, con alturas inferiores a los 25 m e inclinación 1V:1H. Por la orientación adversa de los planos de contacto entre horizontes y con el depósito, además de las bajas condiciones mecánicas se requiere la implementación de obras de contención tipo anclajes, acordes con la importancia de los portales y su permanencia en el tiempo. El portal Sur, se encuentra dentro de una cicatriz tipo relicto (se estima su ocurrencia en tiempos geológicos), la cual tiene un ancho de 130 m y una longitud de 150 m, comprendida desde su corona hasta la vía Las Palmas.; dado que es una cicatriz estable, que no ha presentado actividad dentro de los registros estudiados (fotografías aéreas desde 1959), no se considera que en si sea un problema de estabilidad, sino que los problemas se asocian a los depósitos generados por este.

El túnel El Seminario al menos en sus primeros 30 m de longitud sería excavado en suelos propiamente dichos (IB y IC), con eventuales bloques aislados de hasta 4,0 m, producto de la meteorización esferoidal (común en este cuerpo plutónico); luego el túnel se introduce, por unos 35 m, en una transición suelo-roca (IC-IIA) caracterizada por abundantes bloques de roca (redondeados y con cáscaras) en medio de una matriz saprolítica (limo arenosa) húmeda por debajo del nivel freático. Desde allí (km 5+165) y hasta la abscisa km 5+745 la excavación transcurriría en rocas gabroicas levemente meteorizadas (IIA), sin embargo es frecuente la presencia de zonas de circulación de aguas que han generado, por meteorización, suelos saprolíticos arenosos de alta permeabilidad. Entre los km 5+745 y km 5+825 nuevamente se puede presentar una transición suelo roca (IC-IIA) con las condiciones ya descritas. Finalmente, los últimos 50 m (hasta la abscisa km 5+875) se prevén suelos (IB-IC).

En el sector NE del túnel El Seminario se prevé otra pequeña plazoleta, con condiciones similares a las descritas para los portales SW. En este caso se tiene una capa de flujo de lodos y/o escombros sobre los suelos finos. Allí el talud de corte no supera los 15 m, sin embargo también es importante implementar medidas que garanticen la estabilidad a mediano y largo plazo.

Respecto a este portal norte, la característica geomorfológica más relevante es la presencia de bloques de roca de gran tamaño en superficie, hasta 5 m de diámetro, a su vez, no se evidenció

actividad morfodinámica relevante respecto a deslizamientos o procesos de erosión superficial, esto debido al bajo relieve de dicha zona.

La información detallada de ésta zona de estudio incluyendo los mapas y anexos, se puede consultar en el Anexo 3-2- Informe I-2284-TO-06-Rev1 realizado por INTEINSA y que hace parte integral de este estudio actualizado.

#### 3.2.1.5.2 Sector 2. Portal Norte Túnel El Seminario– Quebrada La Pastora. (Km 5+900 – Km 7+680)

Esta parte del trazado continúa sobre la parte media de la vertiente, son geoformas de laderas de suaves a moderadas, con inclinaciones entre 5° y 25° y constituidas por una serie de lomos de tope redondeado y amplio, localmente presenta fuerte incisión con desarrollo de flancos empinados, siendo poco frecuente este rasgo.

Son terrenos constituidos por las rocas del Gabro de San Diego siguiendo las mismas características del material descrito para el túnel El Seminario. Estas rocas, como se mencionó anteriormente, afloran en avanzado estado de meteorización, con perfiles de meteorización de hasta 45 m (ver Anexo 3-2- Plano AO-VI-GO-002). Además, en este tramo se presentan localmente depósitos de vertiente del tipo flujo de lodos y/o escombros que cubren parcialmente el relieve modelado sobre los suelos, dentro de los que se destacan los localizados discontinuamente entre las quebradas Los Caunces y La Pulgarina. Estos depósitos están constituidos por una matriz arcillo limosa, húmeda, blanda, plástica de color pardo amarillento que envuelve bloques frescos de gabro, redondeados que alcanzan los tres metros de diámetro. En general, este sector presenta condiciones geológicas y geotécnicas favorables para la construcción del proyecto vial, el cual propone cortes de hasta 20 m de altura en suelos en general cohesivos. Sin embargo en inmediaciones del corredor se identificaron varias zonas húmedas (en las zonas altas de las cuencas) que deberán ser tratadas con filtros y localmente con drenes sub-horizontales, antes y durante las excavaciones.

#### 3.2.1.5.3 Sector 3. Quebrada La Pastora – Quebrada La Espadera. Km 7+680 – Km 9+200

Este sector transcurre sobre la vertiente de la quebrada Santa Elena, en un tramo caracterizado por varias corrientes importantes que transcurren en dirección S-N, como son en su orden Chupadero, Mediagua y La Espadera. Las cuales están separadas por lomos que descienden en igual dirección, de topes redondeados y estrechos, con flancos irregulares de inclinación moderada a localmente empinada.

Geológicamente estos terrenos se desarrollan sobre las rocas denominadas en este estudio como de cabalgamiento (Kmce). Allí afloran rocas localmente cizalladas y en general con un marcado fracturamiento. Desde el punto de vista litológico se observaron una distribución errática de dunitas, anfibolitas y gneises, además de paquetes de esquistos verdes subhorizontales. Como se mencionó, todas estas rocas se presentan afectadas tectónicamente mostrando rasgos de marcada foliación, cizallas y una fuerte a moderada meteorización, con desarrollo de suelos también heterogéneos que alcanzan los 15 m de espesor y que reposan sobre la transición suelo-roca fracturada y con abundante matriz saprolítica. Según los sondeos ejecutados se marca el predominio de suelos derivados de rocas anfibolíticas y gnéisicas, limosos, gris verdosos, con bandeamiento y baja humedad. También en este tramo aparecen frecuentemente depósitos de vertiente del tipo flujo de lodos y/o escombros, especialmente hacia las zonas de inclinación más

suave (descansos topográficos). Estos depósitos incluyen bloques heterométricos con diverso grado de meteorización que alcanzan proporciones de hasta el 50% del volumen total. En general el espesor total de estos depósitos no supera los cinco metros pero se reportan localmente hasta 15 m.

Para este sector el proyecto vial transcurre en general sobre viaductos fundados a profundidad (pilas) además de cortes de alturas variables, que no superan los 25 m y por ende se excavarán en su mayoría sobre los suelos heterogéneos descritos y en roca meteorizada y fracturada, especialmente en la parte central de los tramos donde los taludes alcancen la mayor altura.

#### 3.2.1.5.4 Sector 4. Quebrada La Espadera - Portal Occidental del Túnel De Santa Elena. Km 9+200 – Km 10+200

Este tramo corresponde a una vertiente con pendientes desde muy fuertes hasta escarpadas (mayores de 45°) con predominio de lomos largos, abruptos y frecuentes paredes rocosas. Al igual que el anterior este relieve está modelado sobre las rocas de la zona de cabalgamiento y la parte final en rocas del tipo anfibolitas. En este sector, dadas las condiciones extremas de pendiente las rocas en general tienen un pobre desarrollo de perfil de meteorización o incluso inexistente. Las rocas de cabalgamiento se muestran afectadas tectónicamente, y además en campo se observan bloques que aparentemente han sufrido un proceso de relajamiento evidenciado en la apertura de sus discontinuidades, incluso es frecuente la ocurrencia de depósitos de bloques sueltos y sin matriz sobre la ladera, denominados depósitos de talus, caídos por gravedad desde las paredes rocosas. Por otro lado, hacia el final del sector, sobre las anfibolitas se presentan un mayor desarrollo de suelo residual, de carácter limoso en tonalidades rojizas y donde se observa la roca fresca esta se encuentra menos oxidada y meteorizada (ver Anexo 3-2- Plano AO-VI-GO-002).

Según las exploraciones ejecutadas en este sector, que corresponden en su totalidad a líneas de refracción sísmica, se pudo establecer de manera sistemática la presencia de una sobrecapa de suelos heterogéneos de hasta cinco metros de espesor, seguido por una transición suelo-roca (IC-IIA) de otros cinco metros de espesor. Rematando en la roca poco meteorizada (IIA-IIB) fracturada.

En este sector la banca de la vía se conformará principalmente por medio de cortes, los cuales alcanzan la mayor altura de todo el proyecto, llegando incluso a los 45 m. Por las condiciones geométricas de distribución de los horizontes de meteorización respecto al plano del talud es necesario ajustar el diseño geométrico de los mismos a los materiales que afloren y no acometer diseños típicos. En este sentido se debe mencionar que es recomendable la conformación de una berma en la transición suelo –roca (IC-IIA), a partir de la cual se debe tener una inclinación menor y una serie de tratamientos para los suelos suprayacentes. Por el contrario de la berma hacia abajo, correspondiente al macizo rocoso los taludes son fuertemente inclinados y debidamente tratados ante las cuñas definidas por las discontinuidades. Obviamente la posición de la berma varía fuertemente en el sentido horizontal, por lo que ésta se debe escalonar en tramos de longitud construible por la maquinaria y que se permita captar el agua, disipar su velocidad (entre niveles) y entregarla adecuadamente a la base del talud.

Todo el detalle del estado de la vía occidental a cielo abierto comprendidos sus 4.5 Km desde el portal norte del Túnel Seminario hasta el portal Occidental del Túnel Santa Elena, se encuentra

descrito detalladamente en el informe de I-2284-TO-10-Rev1, estudio realizado por INTEINSA y que forma parte integral de la complementación de los estudios.

#### 3.2.1.5.5 Sector 5. Portal Túnel de Santa Elena. (Km 10+200 – Km 11 + 400)

Este es el primer tramo del sistema del túnel de Santa Elena, iniciando con el portal occidental ubicado sobre la orilla derecha de la quebrada La Aguadita. Allí se observan unas vertientes escarpadas asociadas al cañón de estas corrientes, constituidas por anfibolitas de grano fino, color gris oscuro a negro y bandeamiento cerrado, en general sub-horizontal. Los afloramientos de roca son pocos por la presencia de vegetación y algunas zonas de suelo limo-arcilloso que alcanzan los siete metros de espesor. Allí se plantea una excavación que alcanza los 40 m de altura, con suelos (IC-IIA) hacia la parte superior y roca meteorizada en la base del talud (IIA). Esta estratigrafía y las relaciones geométricas con la excavación requieren tratamientos geotécnicos. Adicionalmente, hacia la parte externa de la plazoleta asociada al portal se conformaría un lleno de grandes dimensiones, sobre la cuenca de la quebrada La Aguadita, previa construcción de un boxcoulvert.

Ya dentro del macizo, y por una longitud de unos 25 m, las excavaciones del túnel se realizaran en rocas tipo anfibolita meteorizada, con abundantes discontinuidades. Para el resto de este sector el túnel continúa en roca fresca con buenas condiciones geomecánicas y una grado bajo de fracturamiento (roca buena).

#### 3.2.1.5.6 Sector 6. Km 11+400 – Km 12+250

Este sector corresponde geológicamente al gneis milonítico de Sajonia, que como ya se mencionó, corresponde a una unidad litodémica definida por Ingeominas (2005) en la plancha 147 (Medellín Oriental) y relacionada en su origen con el proceso de metamorfismo dinámico por el cabalgamiento de la corteza oceánica. Los límites de esta franja de roca (de tendencia N-S) están definidos por zonas de cizallamiento dúctil que en superficie se observan tenuemente sobre el relieve. Además la posición espacial y el buzamiento de estas estructuras son difíciles de establecer, por lo cual se asumió la información de otros autores. Estas rocas en general presentan unas condiciones geomecánicas e hidrogeológicas buenas.

#### 3.2.1.5.7 Sector 7. Km 12+250 – Km 14+800

El túnel de Santa Elena, luego se sobrepasar la zona gnéisica anteriormente descrita, se interna nuevamente en un macizo preponderantemente anfibolítico, con intercalaciones de gneises biotíticos de color pardo rojizo y gris. Sin embargo, no existen diferencias geomecánicas entre las dos litologías mencionadas. En este sector el techo del túnel alcanza los 550 m. Como rasgos tectónicos relevantes se debe mencionar el cruce de varias fallas. La de mayor preponderancia es la Falla Santa Elena, en el km 12+800, de dirección N-S, alto buzamiento y comportamiento de rumbo, la cual se caracterizó en la perforación AO-TS-P-01. Dicha estructura presenta varias trazas, pero no excede en su zona de cizalla los cinco metros y unas franjas de influencia inferiores a los 10 m a cada lado.

Según se estableció con la perforación AO-TS-P-02, el túnel cruzaría en inmediaciones del km 13+800 una falla con condiciones geomecánicas similares a las ya descritas para la falla Santa Elena, conocida como el Lineamiento San Ignacio. Sin embargo a diferencia de esta su buzamiento es cercano a los 65º, con un buzamiento aparente sobre el perfil del túnel.

#### 3.2.1.5.8 Sector 8. Km 14+800 – Km 17+320

Se plantea acá que en inmediaciones de la abscisa km 14+800 se hallaría un contacto de tipo intrusivo entre el macizo metamórfico anfibolítico y un cuerpo plutónico ácido, denominado en la cartografía regional como Stock de Samarcanda. Por la tipología de este tipo de contactos su posición y variación en el espacio es en extremo difícil de establecer, por ello el patrón acá planteado es solo interpretativo. Adicionalmente, es importante mencionar que los efectos térmicos del magma caliente en el momento de su emplazamiento sobre la roca caja (anfibolita) la silicifican y endurecen, generando una roca abrasiva, denominada cornubiana cuyo espesor es variable. Dentro del cuerpo ígneo plutónico se tienen rocas ácidas del tipo granito y cuarzodiorita, con un alto porcentaje de cuarzo, feldespato y micas (moscovita principalmente).

Este macizo, desde el punto de vista geomecánico, presenta unas buenas condiciones, especialmente donde el techo en roca es máximo. Sin embargo, por el profundo y prolongado procesos de meteorización que ha sufrido este cuerpo, se han desarrollo perfiles de suelos de hasta unos ocho metros y unos espesores de roca meteorizada (IIA) hasta de 40 m. Teniendo en cuenta esta situación entre las abscisas km 16+660 y km 17+320, el techo se reduce empobreciendo las condiciones del macizo, llevándolo a una calidad de roca media, adicionalmente en este sector se observa una falla de tendencia N-S, de muy buena expresión geomorfológica y una zona de cizalla de unos 30 m y zonas de influencia de otros 20 m a cada lado. Finalmente, en este mismo sector del túnel de Santa Elena se detectaron otras dos fallas cercanas, con características similares a la anteriormente descrita, afectando el macizo entre las abscisas km 15+500 (Falla Samarcanda 4) y km 15+660 (Falla Transversal Samarcanda); ver Anexo 3-2 Plano AO-VI-GO-003.

#### 3.2.1.5.9 Sector 9. Km 17+320 – Km 18+520

Nuevamente el Túnel de Santa Elena, luego de cruzar una zona de roca de contacto, se interna en el macizo metamórfico, constituido principalmente por anfibolitas y gneises biotíticos intercalados. Este macizo corresponde a roca III de muy buenas condiciones, sin embargo, localmente, según información de estudios anteriores y nuestra fotointerpretación, se cruzaría una zonas de falla, en inmediaciones del km 17+500 (Falla Las Antenas). Es importante anotar que esta estructura no fue hallada durante los trabajos de cartografía geológica.

Este sector termina en la plazoleta del portal oriental del túnel. Allí existió una cantera de roca, de la cual aún se conserva un talud irregular escalonado en roca, constituido en su totalidad por anfibolitas finas (básicas) densas, duras y solo parcialmente oxidadas en las discontinuidades (IIA). Hacia arriba esta roca se torna rápidamente en una transición suelo-roca con materiales limosos y arcillosos pardo amarillento, que envuelven bloques de roca meteorizados en la periferia. El talud concebido para este portal alcanza alturas de hasta 25 m por lo que se recomienda la instalación de medidas de refuerzo que permitan garantizar la estabilidad en el mediano y largo plazo. Así mismo vale la pena mencionar que un rasgo de gran importancia es alto grado de humedad de la zona del portal, con varios afloramientos de agua y el cruce (sobre la plazoleta existente) de una pequeña quebrada. Se deberán implementar antes de cualquier tipo de intervención las obras de drenaje y sub-drenaje requeridas.

#### 3.2.1.5.10 Sector 10. Portal Oriental Túnel Santa Elena - Vía de Acceso Oriental A Sajonia. (Km 18+520 – Km 19+800)

En este último tramo el proyecto vial transcurre nuevamente en superficie, en medios de una topografía ondulada de colinas y lomos bajos, típica del altiplano del oriente antioqueño. Desde el punto de vista geológico se observan rocas metamórficas meteorizadas, además de dunitas, depósitos de vertiente (deslizamientos y flujos de lodos y/o escombros) también descompuestos y localmente depósitos aluviales - torrenciales de la quebrada Salazar (cuya margen derecha es seguida por la vía en estudio). En este tramo se propone la conformación de taludes de corte de hasta 25-30 m de altura, en medio del espeso perfil de meteorización mencionado; sin embargo, cerca de los seis metros de profundidad aparece roca muy meteorizada pero de fácil corte. Adicionalmente se debe mencionar la conformación de terraplenes en la parte final del proyecto, en inmediaciones de la glorieta de Sajonia. Allí los suelos aluviales finos son muy húmedos y blandos, situación que ameritará un previo mejoramiento con drenajes profundos y algunos reemplazos de consideración.

### 3.2.2 Geotecnia

En este capítulo se presentan los resultados de los estudios e investigaciones del subsuelo del proyecto, orientados a evaluar y estimar las propiedades mecánicas de los materiales involucrados en las diferentes obras, además del diseño geotécnico del túnel y de las vías de acceso, así como el diseño de las obras necesarias para garantizar su estabilidad. Comprende también este ítem la evaluación de las laderas, sitios de depósitos y se presentan los diseños geotécnicos de las cimentaciones de los puentes y de la estructura del pavimento.

#### 3.2.2.1 Geotecnia del Túnel

En este numeral se presentan los resultados obtenidos en el diseño geotécnico del soporte para las excavaciones subterráneas de los túneles contemplados en el proyecto.

El alineamiento proyectado del túnel de Santa Elena tiene una longitud aproximada de 8,2 km, donde sus portales occidental y oriental se localizan en la cotas 2.020 y 2.200 m.s.n.m, respectivamente. Desde el punto de vista geológico éste túnel atravesará rocas del complejo metamórfico anfibolítico de Medellín, el Gneis Milonítico de Sajonia, el cuerpo granítico de Samarcanda, y zonas donde se presentan fallas geológicas.

Por otro lado, el alineamiento del túnel El Seminario tiene con una longitud aproximada de 782 m, con sus portales sur y norte localizados en las cotas 1.764 m y 1.809 m respectivamente. El portal del lazo 3 se localiza en la cota 1.767 m. Geológicamente, el túnel transcurre en su totalidad por el cuerpo del Gabro de San Diego, con un 70% de su longitud bajo material saprolítico y un 30% en roca hacia la parte central de los tubos donde encuentran la mayor cobertura.

##### 3.2.2.1.1 Exploraciones Geotécnicas y Ensayos

###### *3.2.2.1.1.1 Generalidades*

Inicialmente se realizaron en el alineamiento del túnel de Santa Elena tres perforaciones. La perforación AO-TS-P-01 en inmediaciones de la cabecera urbana del corregimiento de Santa Elena con una longitud de 150 m, azimut de 128° y un buzamiento de 65°, la perforación AO-TS-P-02 en el costado noroccidental del Cerro Verde con una longitud de 150 m y la perforación AO-TS-P-03

aproximadamente en el km 15+600 del corredor del túnel con una longitud de 150,0 m. Las perforaciones AO-TS-01 Y AO-TS-02 se ejecutaron en el cuerpo de anfibolitas con el fin de obtener información directa de éste y, en el caso de la AO-TS-01, para identificar las características de la falla Santa Elena. La perforación AO-TS-03 se realizó en el Stock de Samarcanda.

Posteriormente se realizaron 18 perforaciones verticales en superficie a lo largo del eje de los túneles Santa Elena, ubicados estratégicamente según la geología y cercanía a zonas de fallas detectadas, con el fin de ampliar y corroborar el conocimiento geológico y geotécnico del macizo rocoso así como para la instalación posterior de los piezómetros que sirven para el análisis hidrogeológico de la zona. Las perforaciones de estos piezómetros suman 1083,5 m en los cuales algunos se realizaron con recuperación de núcleo y otros a destrucción; la profundidad de cada perforación varió entre 40, 60, 80 y 160 m. Los núcleos recuperados se encuentran almacenados en cajas debidamente marcadas y dispuestas de forma ordenada en la Litoteca del proyecto, cada uno con su respectivo registro de perforación y registro fotográfico.

Figura 3-2 - Litoteca del proyecto

Para el complemento de los estudios hidrogeológicos se realizaron otras 2 perforaciones de 150 m cada una ubicadas la primera cerca al Restaurante El Silletero sobre el Gneis milonítico de Sajonia y la otra dentro del stock de Samarcanda, ambas con fines de conocimiento geológico, geotécnico y de propiedades hidráulicas de los macizos rocosos; así mismo se realizaron otras 4 perforaciones de unos 30 m de profundidad en zonas específicas para la evaluación de las características hidrogeológicas de las diversas unidades, en las cuales se realizaron pruebas de bombeo tipo Lugeón. Además de la exploración programada para caracterizar los materiales de las zonas adyacentes a los túneles, se ejecutó un programa de exploración enfocado a estimar parámetros para el modelo hidrogeológico del túnel de Santa Elena. Este programa incluyó 4 perforaciones de 30,0 m de longitud cada una, dichas perforaciones son AO-H-P-01 a AO-H-P-04.

Sobre el alineamiento del túnel El Seminario se realizaron 5 perforaciones, la AO-TB-01 en el portal sur; la AO-TB-03 localizada aproximadamente en el km 5+150 de 50,20 m de longitud; la AO-TB-05 ejecutada en la parte de mayor techo del túnel, aproximadamente en el km 5+620, de 130,0 m de longitud; la AO-TB-06 de 50,10 m de longitud, en la zona del portal norte en el km 5+750 aproximadamente; y finalmente la AO-TB-07 también en la zona del portal norte, de 30,0 m de

longitud y ubicada aproximadamente hacia el km 5+810. Posteriormente se realizaron dos perforaciones de 30 y 40 m de profundidad cada una sobre su alineamiento y cercanas a los portales para la caracterización hidrogeológica del Gabro de San Diego en sus componentes rocoso y saprolítico empleando ensayos de bombeo tipo Lefranc.

Sondeos geofísicos también fueron realizados tanto para el estudio geotécnico como hidrogeológico del corredor. La relación de estos sondeos se presenta en el Anexo 3-3 - Estudio hidrogeológico.

La localización de las perforaciones y el alineamiento general del trazado del corredor se presenta en los planos Anexo 3 – 2 AO-VI-GO-002 a 005.

Las perforaciones se realizaron para determinar el espesor y las propiedades de los suelos y depósitos existentes, estimar los perfiles de meteorización de los diferentes tipos de rocas, la localización y características de las zonas de falla, la posición del nivel freático y las condiciones generales del macizo rocoso existente en la zona donde se ha proyectado los túneles.

Figura 3-3 - Perforaciones sobre el alineamiento de los Túneles del Seminario

Figura 3-4 - Perforaciones sobre los ejes de los túneles Santa Elena.

### *3.2.2.1.1.2 Definición del perfil geológico*

En el Anexo 3-2- planos AO-VI-GO-004 y AO-VI-GO-005 se presenta el perfil geológico considerado para el diseño del soporte de los túneles El Seminario y Santa Elena respectivamente. De acuerdo con las exploraciones geológicas se identificó en el túnel El Seminario un único sector, mientras que en el sistema del túnel de Santa Elena se identificaron varios sectores desde el portal occidental hasta el portal oriental. En la siguiente tabla se muestra dicha sectorización.

Tabla 3-20- Sectorización Geológica de los Túneles

| Túnel | Sector Geológico | Abscisa | Descripción General |
|---|---|---|---|
| El Seminario | 1 | km 5+080- km 5+866 | Gabro de San Diego. Espesores de suelo de hasta 45 m – Excavación se desarrolla en todo el perfil de meteorización del Gabro, desde roca fracturada y poco alterada hasta roca muy fracturada con presencia de suelo. |
| Santa Elena | 1 | km 10+330-km 10+400 | Portal Occidental. Anfibolitas moderadamente fracturadas |
| | 2 | km 10+400-km 11+700 | Anfibolitas. Fallamientos paralelos y perpendiculares-zonas de alto fracturamiento. |
| | 3 | km 11+700-km 12+550 | Gneiss Milonítico de Sajonia. Macizo en buenas condiciones |
| | 4 | km 12+550-km 15+300 | Anfibolitas. Falla Santa Elena |
| | 5 | km 15+300-km 17+000 | Stock de Samarcanda profundo proceso de meteorización |
| | 6 | km 17+000-km 18+517 | Portal Oriental. Anfibolitas moderadamente fracturadas |

**Túnel El Seminario**

Esta sectorización es aplicable para los dos tubos a construir a futuro en el sistema de túnel Seminario.

El túnel El Seminario al menos en sus primeros 30 m de longitud sería excavado en suelos propiamente dichos (IB y IC), con eventuales bloques aislados de hasta 4,0 m, producto de la

meteorización esferoidal (común en este cuerpo plutónico); luego el túnel se introduce, por unos 35 m, en una transición suelo-roca (IC-IIA) caracterizada por abundantes bloques de roca (redondeados y con cáscaras) en medio de una matriz saprolítica (limo-arenosa) húmeda por debajo del nivel freático. Desde allí (km 5+400) y hasta la abscisa km 5 +745 la excavación transcurriría en rocas gabroicas levemente meteorizadas (IIA). Entre los km 5 + 745 y km 5 +825 nuevamente se presenta una transición suelo roca (IC-IIA) con las condiciones ya descritas. Finalmente, los últimos 50 m (hasta la abscisa km 5 +866) se prevén suelos (IB - C).

### Túnel de Santa Elena

Esta sectorización es aplicable para los dos tubos a construir en el sistema de túnel santa Elena.

El sector No. 1, km 10+330-km 11+400, corresponde a la zona del portal occidental, la excavación se realizará en las rocas de la Anfibolita de Medellín, afectadas por su proximidad al contacto fallado con las Dunitas de Medellín y la zona de cabalgamiento. Los espesores de la sobrecapa de meteorización serán cercanos a los 8,50 m y está constituida por suelos limoarenosos y roca meteorizada.

En el sector No. 2, (km 11+400-km 12+250), En este sector la excavación del túnel se realizará en gneises miloníticos de Sajonia, los cuales se presentan afectados por procesos de metamorfismo dinámico por el cabalgamiento de la corteza oceánica. Estas rocas en general presentan unas condiciones geomecánicas buenas.

En el sector No. 3, km 12+250-km 14+800, En este sector la excavación del túnel se realizará nuevamente en las Anfibolitas de Medellín. En este sector el techo del túnel alcanza los 550 m. Como rasgos tectónicos relevantes se debe mencionar el cruce de varias fallas. La de mayor preponderancia es la Falla Santa Elena, en el km 12+800, de dirección N-S, alto buzamiento y comportamiento de rumbo, la cual se caracterizó en la perforación AO-TS-P-01.

En el sector No. 4, km 14+800-km 17+320, la excavación se realizará en las rocas del Stock de Samarcanda. Este macizo, desde el punto de vista geomecánico, presenta unas buenas condiciones, especialmente donde el techo en roca es máximo. Sin embargo, por el profundo y prolongado procesos de meteorización que ha sufrido este cuerpo, se han desarrollo perfiles de suelos de hasta unos ochenta metros y unos espesores de roca meteorizada (IIA) también considerables. Teniendo en cuenta esta situación entre las abscisas km 16+660 y km 17+320, el techo se reduce empobreciendo las condiciones del macizo, llevándolo a una calidad de roca media, adicionalmente en este sector se observa una falla de tendencia N-S, de muy buena expresión geomorfológica y una zona de cizalla de unos 30 m y zonas de influencia de otros 20 m a cada lado. Finalmente, es este mismo sector del túnel de Santa Elena se detectaron otras dos fallas cercanas, con características similares a la anteriormente descrita, afectando el macizo entre las abscisas km 15+530 y km 15+660 (ver Anexo 3-2- Plano AO-VI-GO-003).

En el sector No. 5, (km 17+320-km 18+517), nuevamente el túnel de Santa Elena, luego de cruzar una zona de roca de contacto (cornubiana), se interna en el macizo metamórfico, constituido principalmente por anfibolitas y gneises biotíticos intercalados. Este macizo corresponde a roca III de muy buenas condiciones; sin embargo, localmente, según información de estudios anteriores y nuestra fotointerpretación, se cruzarían dos zonas de falla, en inmediaciones del km 17+500 y km 17+600. Es importante anotar que estas estructuras no fueron halladas durante los trabajos de cartografía geológica.

#### *3.2.2.1.1.3 Ensayos de laboratorio*

**Ensayos de laboratorio sobre muestras de suelo (año 2000):** A las diferentes muestras recuperadas de las perforaciones se les realizaron diversos ensayos de laboratorio. En las muestras de suelo recuperadas de la perforación AO-TE-01, zona del portal oriental, se hicieron ensayos de caracterización física como granulometría, límite líquido, límite plástico y humedad natural. En la Tabla 3-21 se presentan los resultados de los ensayos de laboratorio efectuados en las diferentes muestras de suelo.

Para determinar los parámetros de resistencia al corte de los suelos de las anfibolitas de Medellín, en la zona del portal oriental, se realizó un ensayo en cámara triaxial CU, con medida de presión de poros a una muestra de la perforación AO-TE-01. En el Anexo 3-2 se muestran los resultados de los ensayos de laboratorio en las diferentes muestras.

**Ensayos de laboratorio sobre muestras de suelo (2009):** En esta etapa del proyecto se realizaron ensayos de laboratorio a las muestras de suelo recuperadas de todas las perforaciones ejecutadas para la exploración del túnel El Seminario. Sobre estas muestras se hicieron ensayos de caracterización física como granulometría, límite líquido, límite plástico y humedad natural. Para las muestras recuperadas de las perforaciones del estudio hidrogeológico se ejecutaron, además de los ensayos mencionados anteriormente, ensayos de permeabilidad.

Para la zona de los portales del túnel El Seminario también se realizaron dos ensayos triaxiales C.U. en dos muestras de las perforaciones AO-TB-P-01 Y AO-TB-P-07, y de corte directo en dos muestras de estas mismas perforaciones para estimar las propiedades de resistencia al corte de estos materiales.

**Ensayos de laboratorio sobre muestras de roca:** Para la caracterización del macizo rocoso y estimar la calidad del mismo, se utilizaron los núcleos de roca obtenidos de las tres perforaciones utilizadas para la exploración del túnel de Santa Elena (AO-TS-P-01, AO–TS–P-02 y AO-TS-P-03) y en la perforación AO-TB-P-05 del túnel El Seminario. A los núcleos de roca sana se les hizo ensayos de carga puntual y resistencia a la compresión simple. En esta etapa del proyecto, se llevaron a cabo doce ensayos de compresión simple en muestras de roca sana de la anfibolita y algunas alteradas del Stock de Samarcanda. Los valores de resistencia a la compresión simple dieron como resultado para el gabro de San Diego una resistencia promedio de 103 MPa con un valor máximo de 159 MPa para la anfibolita, una resistencia promedio de 101,7 MPa con un valor máximo de 136 MPa y para la zona meteorizada del stock de Samarcanda una resistencia promedio de 41,4 MPa con un valor máximo de 62,3 MPa. Adicionalmente, se ejecutaron dieciséis ensayos de carga puntual, para los que se obtuvo una resistencia promedio para el gabro de San Diego de 3,4 MPa, con un valor máximo de 6,2 MPa; Para la anfibolita se obtuvo una resistencia promedio de 6,4 MPa, con un valor máximo de 9,9 MPa; y para el stock de Samarcanda un valor promedio de 2,0 MPa, con un valor máximo de 3,1 MPa. En las siguientes tablas se muestran los resultados de los ensayos de carga puntual, de compresión simple de la etapa anterior del proyecto y los resultados de los ensayos realizados sobre las muestras recuperadas en esta etapa.

Tabla 3-21 - Resultados de Ensayos de Laboratorio del Portal Oriental

| SONDEO | MUEST. | PROF. | W nat. | P-200 | P-4 | ENSAYOS DE LABORATORIO | | | | | | | | | CLASIF. |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | No. | (m) | % | % | % | LL % | LP % | IP % | γd kN/m³ | qu kPa | c kPa | ϕ | c' kPa | ϕ' | (USCS) |
| AO-TE-01 | 7 | 6,20 | 51,6 | 64 | 84 | 50 | 41 | 9 | | | | | | | ML |
| | 19 | 15,80 | 59,8 | 84 | 100 | 55 | 41 | 14 | | | | | | | MH |
| | 20 | 16,70 | 52,8 | | | | | | 11,05 | | 66,9 | 28,4 | 23,9 | 35,9 | |

Tabla 3-22 - Ensayos de Carga Puntual sobre Núcleos de Roca del Túnel

| Sondeo | Prof. (m) | Núcleo No. | Diám. del núcleo D (mm) | Long. Del núcelo L (mm) | Tipo de ensayo | Carga P (kN) | De² (mm²) | (kN/mm²) | a=(D/50)^0,45 | Is(50)=Isxa (kN/mm²) | Is(50) (MPa) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| AO-TW-01 | 5,03 | 1 | 47,35 | 53,1 | Diámet. | 8 | 2242 | 0,003568 | 0,97579 | 0,003482 | 3,48183 |
| AO-TW-01 | 17,40 | 3 | 47,35 | 64,23 | Diámet. | 1,5 | 2242 | 0,000669 | 0,97579 | 0,000653 | 0,65284 |
| AO-TW-01 | 25,5 | 5 | 47,35 | 51,45 | Diámet. | 12 | 2242 | 0,005352 | 0,97579 | 0,005223 | 5,22274 |
| AO-TW-01 | 29,25 | 6A | 47,35 | 47,2 | Diámet. | 10 | 2242 | 0,004460 | 0,97579 | 0,004352 | 4,35229 |
| AO-TW-01 | 29,25 | 6B | 47,35 | 52,65 | Diámet. | 12 | 2242 | 0,005352 | 0,97579 | 0,005223 | 5,22274 |
| AO-TE-01 | 31,43 | 14A | 47,35 | 49,6 | Diámet. | 12,5 | 2242 | 0,005575 | 0,97579 | 0,005440 | 5,44036 |
| AO-TE-01 | 31,43 | 14B | 47,35 | 51,75 | Diámet. | 16 | 2242 | 0,007136 | 0,97579 | 0,006964 | 6,96366 |
| AO-TE-01 | 32,86 | 15 | 47,35 | 51,85 | Diámet. | 19 | 2242 | 0,008474 | 0,97579 | 0,008269 | 8,26935 |
| AO-TE-01 | 32,35 | 16ª | 47,3 | 51,5 | Diámet. | 21,5 | 2237 | 0,009610 | 0,97533 | 0,009373 | 9,37275 |
| AO-TE-01 | 32,35 | 16B | 47,3 | 52,3 | Diámet. | 22 | 2237 | 0,009833 | 0,97533 | 0,009591 | 9,59072 |

Tabla 3-23 - Ensayos de Compresión sobre Núcleos de Roca del Túnel

| Sondeo | Prof. (m) | Núcleo No. | Diámet (mm) | Área (mm²) | Altura (mm) | Volumen (mm³) | Peso (kN) | Densid. (kN/m³) | H/D | Factor de corr. | Carga Rotura (kN) | Resist. Correg. (MPa) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| AO-TW-01 | 5,35 | 2 | 47,2 | 1750 | 98,0 | 171 560 | 4,549E-03 | 26,52 | 2,076 | 1 | 106,02 | 60,24 |
| AO-TW-01 | 22,00 | 4 | 47,4 | 1765 | 108,0 | 190 620 | 5,631E-03 | 29,54 | 2,278 | 1 | 160,02 | 89,62 |
| AO-TW-01 | 29,62 | 7 | 47,3 | 1757 | 95,4 | 167 620 | 4,803E-03 | 28,66 | 2,02 | 1 | 116,03 | 65,50 |
| AO-TE-01 | 30,20 | 13 | 47,3 | 1757 | 107,8 | 189 400 | 5,523E-03 | 29,16 | 2,28 | 1 | 130,02 | 73,30 |
| AO-TE-01 | 31,43 | 14 | 47,3 | 1757 | 108,8 | 191 160 | 5,670E-03 | 29,66 | 2,30 | 1 | 120,03 | 68,14 |

Tabla 3-24 - - Resumen de ensayos de laboratorio – Exploración túneles 2009

| Muestra Número | Peso Específico | Relación de vacíos | Saturación ( % ) | Densidad húmeda (kN/m$^3$) | Densidad seca (kN/m$^3$) | C (kPa) | $\phi$ (°) | C´ (kPa) | $\phi$´ (°) | Permeabilidad (cm/s) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 11(AO-TB-P-1) | 2.6 | - | - | 16.5 | 12.8 | - | - | - | - | 3.20E-06 |
| 17(AO-TB-P-1) | 2.9 | 1.1 | 67.3 | 17.2 | 13.0 | - | - | 11.0 | 35.0 | - |
| 20(AO-TB-P-1) | 2.8 | 0.9 | 87.6 | 18.9 | 14.8 | 58.5 | 25.6 | 18.3 | 35.3 | - |
| 13(AO-TB-P-3) | - | - | - | 11.9 | 8.5 | - | - | - | - | - |
| 1(AO-TB-P-5) | - | - | - | 29.3 | 29.3 | - | - | - | - | - |
| 2(AO-TB-P-5) | - | - | - | 30.0 | 30.0 | - | - | - | - | - |
| 3(AO-TB-P-5) | - | - | - | 29.3 | 29.3 | - | - | - | - | - |
| 13(AO-TB-P-5) | - | - | - | 17.4 | 13.4 | - | - | - | - | - |
| 20(AO-TB-P-6) | - | - | - | 16.2 | 10.7 | - | - | 16.2 | 10.7 | - |
| 7(AO-TB-P-7) | - | - | - | 16.6 | 11.0 | - | - | - | - | - |
| 13(AO-TB-P-7) | 2.8 | 1.6 | 94.2 | 16.0 | 10.3 | - | - | - | - | 3.70E-06 |
| 16(AO-TB-P-7) | 2.8 | 1.4 | 87.7 | 16.5 | 11.3 | - | - | 11.0 | 28.0 | - |
| 19(AO-TB-P-7) | 2.8 | - | 94.8 | 17.5 | 12.0 | 56.5 | 20.3 | 23.9 | 33.7 | - |
| 8(AO-H-P-1) | 2.9 | 1.8 | 86.0 | 15.7 | 10.2 | - | - | - | - | 6.80E-06 |
| 11(AO-H-P-1) | 2.8 | 1.9 | 68.9 | 14.3 | 9.8 | - | - | - | - | 9.50E-06 |
| 17(AO-H-P-1) | 2.8 | 1.9 | 87.9 | 15.4 | 9.7 | - | - | - | - | 1.00E-05 |
| 7(AO-H-P-2) | 2.8 | 1.9 | 95.4 | 15.9 | 9.7 | - | - | - | - | 2.80E-06 |
| 12(AO-H-P-4) | 2.7 | 1.7 | 99.7 | 16.3 | 9.9 | - | - | - | - | 1.80E-06 |
| 18(AO-H-P-4) | 2.8 | 1.9 | 92.5 | 16.1 | 10.4 | - | - | - | - | 7.40E-06 |
| 1(AO-TS-P-1) | - | - | - | 29.2 | 29.2 | - | - | - | - | - |
| 3(AO-TS-P-1) | - | - | - | 28.2 | 28.2 | - | - | - | - | - |
| 5(AO-TS-P-1) | - | - | - | 29.5 | 29.5 | - | - | - | - | - |
| 6(AO-TS-P-1) | - | - | - | 28.0 | 28.0 | - | - | - | - | - |
| 11(AO-TS-P-1) | - | - | - | 29.5 | 29.5 | - | - | - | - | - |
| 1(AO-TS-P-3) | - | - | - | 24.8 | 24.8 | - | - | - | - | - |
| 2(AO-TS-P-3) | - | - | - | 25.5 | 25.5 | - | - | - | - | - |
| 4(AO-TS-P-3) | - | - | - | 26.0 | 26.0 | - | - | - | - | - |
| 6(AO-TS-P-3) | - | - | - | 25.8 | 25.8 | - | - | - | - | - |
| 15(AO-TS-P-3) | 2.6 | 1.2 | 83.1 | 16.6 | 12.0 | - | - | - | - | 1.50E-04 |
| 18(AO-TS-P-3) | 2.6 | 0.9 | 98.5 | 18.5 | 13.9 | - | - | - | - | 3.80E-05 |

Tabla 3-25 - Resumen de ensayos de laboratorio – Exploración túneles 2009 (continuación)

| Muestra Número | Profundidad ( m ) | $I_{50}$ (MPa) | Esfuerzo Máximo (kPa) (muestras de suelo) | Módulo de Elasticidad (kPa) (muestras de Suelo) | Esfuerzo Máximo (MPa) (muestras De roca) | Módulo de Elasticidad (GPa) (muestras de Roca) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 23(AO-TB-P-1) | 15.70 | - | 108.4 | 1880.0 | - | - |
| 13(AO-TB-P-3) | 12.60 | - | 51.3 | 744.0 | - | - |
| 1(AO-TB-P-5) | 66.50 | - | - | - | 136.0 | 28.0 |
| 2(AO-TB-P-5) | 80.95 | - | - | - | 89.7 | 28.0 |
| 3(AO-TB-P-5) | 88.15 | - | - | - | 79.5 | 29.0 |
| 4(AO-TB-P-5) | 97.35 | 0.7 | - | - | - | - |
| 5(AO-TB-P-5) | 106.80 | 3.3 | - | - | - | - |
| 6(AO-TB-P-5) | 113.00 | 6.2 | - | - | - | - |
| 13(AO-TB-P-5) | 8.15 | - | 116.0 | 3072.0 | - | - |
| 20(AO-TB-P-6) | 14.70 | - | 119.0 | 3514.0 | - | - |
| 7(AO-TB-P-7) | 3.90 | - | 120.2 | 1850.0 | - | - |
| 18(AO-H-P-4) | 17.00 | - | 13.3 | 424.0 | - | - |
| 1(AO-TS-P-1) | 44.50 | 9.9 | - | - | 159.3 | 30.0 |
| 2(AO-TS-P-1) | 47.25 | 7.7 | - | - | - | - |
| 3(AO-TS-P-1) | 59.35 | 5.4 | - | - | 80.3 | 14.0 |
| 5(AO-TS-P-1) | 78.05 | 3.7 | - | - | 103.2 | 16.0 |
| 6(AO-TS-P-1) | 102.75 | - | - | - | 70.8 | 17.0 |
| 7(AO-TS-P-1) | 112.30 | 2.6 | - | - | - | - |
| 8(AO-TS-P-1) | 117.15 | 8.9 | - | - | - | - |
| 9(AO-TS-P-1) | 123.60 | 5.1 | - | - | - | - |
| 10(AO-TS-P-1) | 129.30 | 7.9 | - | - | - | - |
| 11(AO-TS-P-1) | 150.30 | - | - | - | 53.4 | 13.0 |
| 1(AO-TS-P-3) | 126.40 | - | - | - | 16.9 | 2.0 |
| 2(AO-TS-P-3) | 137.70 | 1.9 | - | - | 44.7 | 5.0 |
| 3(AO-TS-P-3) | 141.10 | 1.2 | - | - | - | - |
| 4(AO-TS-P-3) | 141.20 | 2.9 | - | - | 62.3 | 11.0 |
| 5(AO-TS-P-3) | 149.50 | 3.1 | - | - | - | - |
| 6(AO-TS-P-3) | 150.60 | 0.7 | - | - | 29.7 | 21.0 |

#### *3.2.2.1.1.4 Líneas de refracción sísmica*

Además de la exploración directa realizada en el alineamiento de los túneles, se vio la necesidad de implementar un programa de exploración indirecta, especialmente en el túnel El Seminario, con el fin de definir las características tanto de los portales como de parte de su alineamiento. Esta exploración se realizó a partir de ensayos de refracción sísmica que estiman el espesor de los estratos de los diferentes materiales en función de la velocidad de propagación de onda compresiva por cada uno de éstos.

La investigación estuvo conformada por seis líneas, cuatro de 55 m de longitud y dos de 110 m de longitud, cada una con 12 geófonos espaciados cada 5 m ó 10 m respectivamente, para lo cual se empleó un sismógrafo digital computarizado marca Geometrics ES-3000 el cual determina el tiempo de viaje de la onda compresiva entre la fuente y cada uno de los geófonos.

Según la información obtenida en campo, en la profundidad alcanzada por los ensayo se encontró un buen contraste entre materiales en la mayoría de las líneas; sin embargo, en la línea de refracción 3, ubicada en la zona del portal norte, no se encontró contraste, encontrando un material con velocidad de onda de aproximadamente 300 m/s. En el resto de la líneas se observó un material superficial con espesor promedio de 10 m y máximos de hasta 15 m, cuya velocidad de onda compresiva es inferior a 500 m/s, lo que lo caracteriza como un material de consistencia blanda; por debajo de éste se encontró otro material con velocidad de onda compresiva entre 500 m/s y 800 m/s, posiblemente un suelo más consolidado, con espesores explorados de hasta 25 m; por último un material que podría corresponder a la transición suelo-roca, con velocidad de onda compresiva entre 1.000 m/s y 1.500 m/s, que únicamente se encontró en la línea de refracción 5.

En el plano AO-VI-GO-002 se presenta la localización en planta de estos trabajos y en las figuras 4.1 a 4.3 los resultados de cada una de estas líneas.

Como complemento a estos estudios está el informe hidrogeológico (Anexo 3-3) realizado por la firma GEODATA en el cual se describen y detallan cada una de las campañas de exploración geofísica con las que se corroboraron los modelos geológicos para los túneles de Seminario como de Santa Elena; se realizaron tomografías eléctricas sobre la totalidad de los ejes de ambos túneles, técnica que consiste en la medición de las resistividades eléctricas de los diversos tipos de roca mediante el análisis de elementos finitos. Como complemento a ello se hicieron análisis de AMT – Audio Magneto Telúrica, que mediante la calibración previa con la tomografía permitió definir la conectividad hidráulica entre el acuífero superficial con los ejes de los túneles ya que dicha técnica permite conocer el perfil geológico hasta unos 1000 m de profundidad, o sea hasta más abajo del nivel de túnel.

### 3.2.2.1.2 Características del Macizo Rocoso

#### *3.2.2.1.2.1 Generalidades*

Para la descripción del macizo rocoso se utilizó la información proveniente del estudio de 2000 donde se ejecutó un levantamiento detallado de sus diferentes características, en el cual fue indispensable la búsqueda de afloramientos en zonas de canteras, taludes de las vías de acceso y a lo largo de la mayoría de las quebradas existentes. En total, se levantaron siete estaciones, una en cada portal y cinco a lo largo del alineamiento donde se hizo medida sistemática de estructuras

como foliaciones, diaclasas y fallas, con las cuales se realizó el análisis estadístico de discontinuidades, dando como resultado la identificación de sistemas representativos. La estructura más importante es la foliación que se encuentra constante en todo el alineamiento del proyecto, cuyo buzamiento varía entre 10º y 40º. En la Tabla 3-26 se muestran los registros de las principales familias de discontinuidades medidas a lo largo del alineamiento del túnel Santa Elena.

En los levantamientos realizados, se consignaron todas las características de las discontinuidades, tales como tipo de relleno, apertura, forma de las superficies, espaciamiento, persistencia meteorización, filtración, y resistencia de las paredes, todos ellos parámetros utilizados para describir y valorar el macizo rocoso. En las respectivas memorias de cálculo se presenta el levantamiento geológico de discontinuidades y sus características.

La información estructural recolectada para cada estación de muestreo, fue procesada mediante el programa DIPS (Anexo 3-2- Referencia 4.4), identificando las principales familias de fracturamiento para los diferentes afloramientos encontrados en cada una de las zonas.

Teniendo en cuenta las condiciones geológicas de los terrenos que cruzarán los túneles, los inventarios y clases de discontinuidades determinadas, sus disposiciones y modos de ocurrencia, y sus características geomecánicas, entre otros, se procedió a la evaluación de la calidad de la roca del macizo. Para esta evaluación se utilizaron dos sistemas; el Sudafricano, llamado también CSRI (Council of Scientific and Industrial Research of South Africa), clasificación geomecánica propuesta por Bieniawski, (Anexo 3- 2 Referencia 4.5), el cual da un valor de calidad de la masa rocosa RMR (Rock Mass Rating) y el sistema Escandinavo del NGI (Norwegian Geothecnical Institute) o sistema Q (Rock Mass Quality) (Anexo 3- 2 Referencia 4.5) propuesto por Barton, Lien y Lunde. Los resultados obtenidos de índices de calidad de la roca para las diferentes clases de terrenos y para los dos sistemas de clasificación se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 3-26 - Levantamiento Estructural de Discontinuidades

| Abscisa | DIP | DIP/DIR | Tipo |
|---|---|---|---|
| km 11+200 | 35 | 252 | Foliación |
| | 90 | 030 | Diaclasa |
| | 90 | 180 | Diaclasa |
| | 85 | 050 | Diaclasa |
| km 12+000 | 43 | 261 | Diaclasa |
| | 74 | 024 | Diaclasa |
| | 73 | 107 | Diaclasa |
| | 72 | 139 | Diaclasa |
| km 14+100 | 90 | 032 | Diaclasa |
| | 70 | 292 | Diaclasa |
| | 36 | 257 | Foliación |
| | 70 | 105 | Diaclasa |
| | 75 | 15 | Diaclasa |
| km 15+200 | 70 | 190 | Diaclasa |
| | 90 | 213 | Diaclasa |
| | 72 | 253 | Diaclasa |
| | 90 | 148 | Diaclasa |
| | 43 | 133 | Foliación |
| km 16+100 | 86 | 212 | Diaclasa |
| | 37 | 102 | Diaclasa |

| Abscisa | DIP | DIP/DIR | Tipo |
|---|---|---|---|
| | 77 | 323 | Diaclasa |
| | 80 | 280 | Diaclasa |

Fuente: Integral 2.000

Mediante el programa Unwedge de Rocscience se puede realizar el análisis estereográfico de las diversas discontinuidades en el macizo rocoso con el fin de observar las posibles cuñas de roca que pueden formarse durante la excavación del túnel y así prevenir accidentes, sobreexcavaciones y realizar una excavación segura. Se trae como ejemplo el análisis en la abscisa Km 12+000 del túnel Santa Elena.

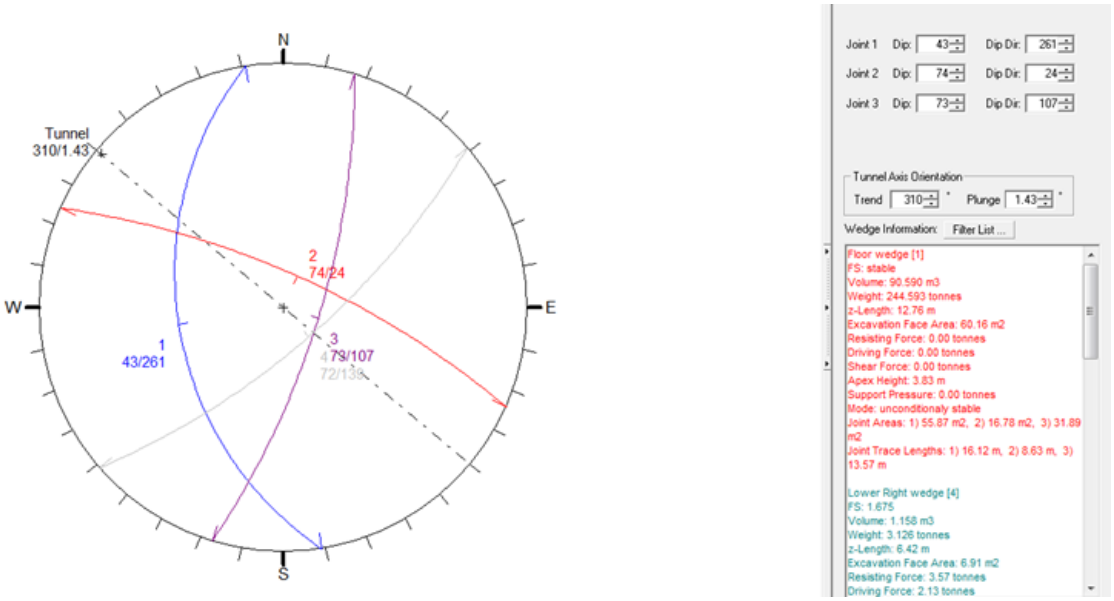



Figura 3-5 - Análisis estereográfico de las discontinuidades en Km12+000 del Túnel Santa Elena

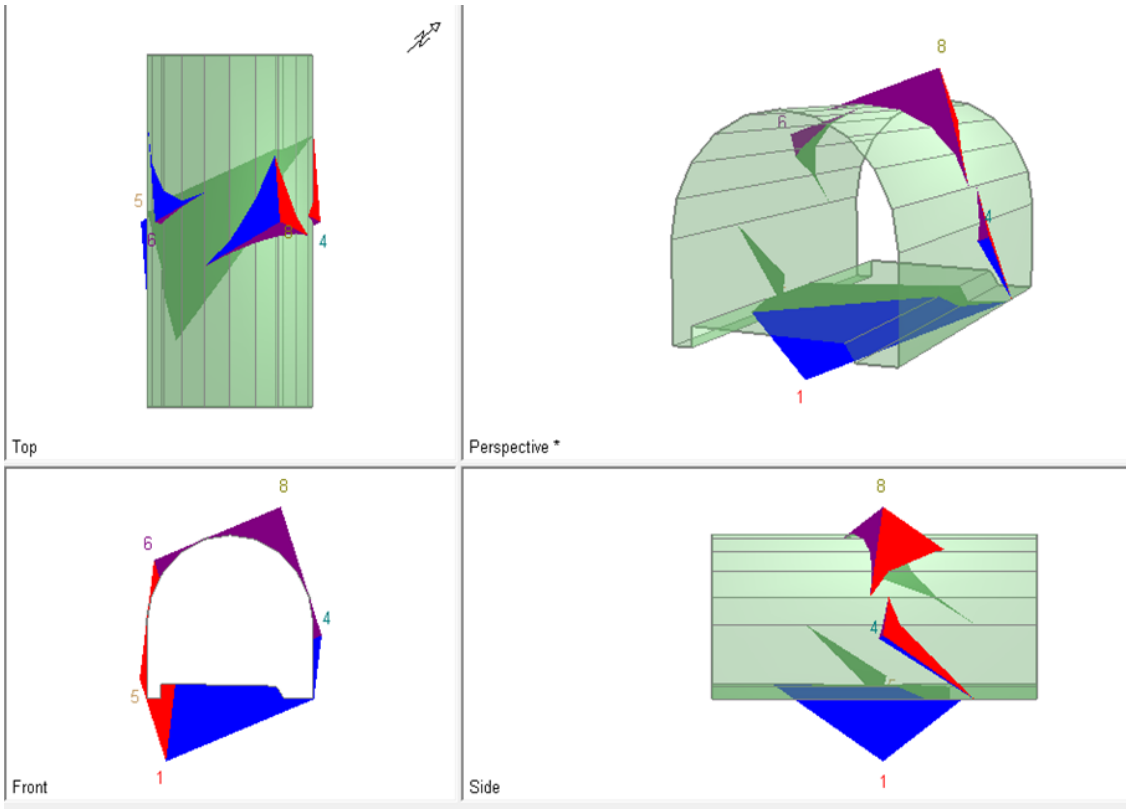



Figura 3-6 - Representación gráfica de las posibles cuñas en el túnel Santa Elena en el Km12+000

Todo lo anterior va respaldado con un análisis geotécnico de estabilidad y sus respectivos factores de seguridad a nivel cuantitativo y probabilístico.

Tabla 3-27 - Sectorización Geotécnica del Túnel El Seminario

| Roca tipo | Abscisado | Q | RMR |
|---|---|---|---|
| D | 5+545 - 5+700 | 1-4 | 45-55 |
| E | 5+473 - 5+545 | 0,1-1 | 25-45 |
| | 5+700 - 5+726 | 0,1-1 | 25-45 |
| F | 5+300 - 5+473 | 0,01-0,1 | 5-25 |
| | 5+726 - 5+742 | 0,01-0,1 | 5-25 |
| G1 | 5+137 - 5+300 | <0.01 | <5 |
| | 5+742 - 5+763 | <0.01 | <5 |
| G2 | 5+080 - 5+137 | <0.01 | <5 |
| | 5+763 - 5+866 | <0.01 | <5 |

Fuente: Integral 2.009

Q Índice de calidad de Barton
RMR Índice de calidad de Bieniawski

Tabla 3-28 - Sectorización Geotécnica del Sistema Túnel de Santa Elena

| Roca tipo | Abscisa | | Longitud (m) | Q | RMR | Deformación Esperada (cm) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| B | 10+495 | 11+412.5 | 917.5 | 10 – 40 | 65-75 | 1 |
| | 12+297.5 | 12+752.5 | 455 | 10 – 40 | 65-75 | 1 |
| | 12+797.5 | 13+762.5 | 965 | 10 – 40 | 65-75 | 1 |
| | 13+777.5 | 14+820 | 1042.5 | 10 – 40 | 65-75 | 1 |
| | 14+820 | 15+132.5 | 312.5 | 10 – 40 | 65-75 | 1 |
| | 15+147.5 | 15+532.5 | 385 | 10 – 40 | 65-75 | 1 |
| | 15+657.5 | 16+660 | 1002.5 | 10 – 40 | 65-75 | 1 |
| | 17+320 | 17+502.5 | 182.5 | 10 – 40 | 65-75 | 1 |
| | 17+597.5 | 18+120 | 522.5 | 10 – 40 | 65-75 | 1 |
| C | 10+440 | 10+495 | 55 | 4 – 10 | 55-65 | 2 |
| | 11+427.5 | 12+282.5 | 855 | 4 – 10 | 55-65 | 2 |
| | 15+547.5 | 15+642.5 | 95 | 4 – 10 | 55-65 | 2 |
| | 16+660 | 16+882.5 | 222.5 | 4 – 10 | 55-65 | 2 |
| | 16+897.5 | 17+320 | 422.5 | 4 – 10 | 55-65 | 2 |
| | 17+517.5 | 17+582.5 | 65 | 4 – 10 | 55-65 | 2 |
| | 18+120 | 18+440 | 320 | 4 – 10 | 55-65 | 2 |
| D | 10+330 | 10+440 | 110 | 1 – 4 | 45-55 | 1 |
| | 12+767.5 | 12+782.5 | 15 | 1 – 4 | 45-55 | 1 |
| | 18+440 | 18+517 | 77 | 1 – 4 | 45-55 | 1 |
| E | 11+412.5 | 11+417.5 | 5 | 0,1 – 1 | 25-45 | 10 |
| | 11+422.5 | 11+427.5 | 5 | 0,1 – 1 | 25-45 | 10 |
| | 12+282.5 | 12+287.5 | 5 | 0,1 – 1 | 25-45 | 10 |
| | 12+292.5 | 12+297.5 | 5 | 0,1 – 1 | 25-45 | 10 |
| | 12+752.5 | 12+757.5 | 5 | 0,1 – 1 | 25-45 | 10 |
| | 12+762.5 | 12+767.5 | 5 | 0,1 – 1 | 25-45 | 10 |
| | 12+782.5 | 12+787.5 | 5 | 0,1 – 1 | 25-45 | 10 |
| | 12+792.5 | 12+797.5 | 5 | 0,1 – 1 | 25-45 | 10 |
| | 13+762.5 | 13+767.5 | 5 | 0,1 – 1 | 25-45 | 10 |
| | 13+772.5 | 13+777.5 | 5 | 0,1 – 1 | 25-45 | 10 |
| | 15+132.5 | 15+137.5 | 5 | 0,1 – 1 | 25-45 | 10 |
| | 15+142.5 | 15+147.5 | 5 | 0,1 – 1 | 25-45 | 10 |
| | 15+532.5 | 15+537.5 | 5 | 0,1 – 1 | 25-45 | 10 |
| | 15+542.5 | 15+547.5 | 5 | 0,1 –1 | 25-45 | 10 |
| | 15+642.5 | 15+647.5 | 5 | 0,1 –1 | 25-45 | 10 |
| | 15+652.5 | 15+657.5 | 5 | 0,1 – 1 | 25-45 | 10 |
| | 16+882.5 | 16+887.5 | 5 | 0,1 – 1 | 25-45 | 10 |
| | 16+892.5 | 16+897.5 | 5 | 0,1 – 1 | 25-45 | 10 |
| | 17+502.5 | 17+507.5 | 5 | 0,1 – 1 | 25-45 | 10 |
| | 17+512.5 | 17+517.5 | 5 | 0,1 – 1 | 25-45 | 10 |
| | 17+582.5 | 17+587.5 | 5 | 0,1 – 1 | 25-45 | 10 |
| | 17+592.5 | 17+597.5 | 5 | 0,1 – 1 | 25-45 | 10 |

| Roca tipo | Abscisa | | Longitud (m) | Q | RMR | Deformación Esperada (cm) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| F | 11+417.5 | 11+422.5 | 5 | 0,01 – 0,1 | 5-25 | 20 |
| | 12+287.5 | 12+292.5 | 5 | 0,01 – 0,1 | 5-25 | 20 |
| | 12+757.5 | 12+762.5 | 5 | 0,01 – 0,1 | 5-25 | 20 |
| | 12+787.5 | 12+792.5 | 5 | 0,01 – 0,1 | 5-25 | 20 |
| | 13+767.5 | 13+772.5 | 5 | 0,01 – 0,1 | 5-25 | 20 |
| | 15+137.5 | 15+142.5 | 5 | 0,01 – 0,1 | 5-25 | 20 |
| | 15+537.5 | 15+542.5 | 5 | 0,01 – 0,1 | 5-25 | 20 |
| | 15+647.5 | 15+652.5 | 5 | 0,01 – 0,1 | 5-25 | 20 |
| | 16+887.5 | 16+892.5 | 5 | 0,01 – 0,1 | 5-25 | 20 |
| | 17+507.5 | 17+512.5 | 5 | 0,01 – 0,1 | 5-25 | 20 |
| | 17+587.5 | 17+592.5 | 5 | 0,01 – 0,1 | 5-25 | 20 |

Fuente: Integral 2.009

#### *3.2.2.1.2.2 Características de resistencia del macizo rocoso*

Las características de resistencia del macizo rocoso fueron estimadas siguiendo la metodología de Hoek y Brown (Referencia 4.6), con base en las siguientes tres propiedades del macizo: la resistencia a la compresión simple, el GSI (Geological Strenght Index), que es una variación del índice RMR y el parámetro *m* de resistencia de Hoek y Brown, para el material intacto, que se denomina *mi.*

Las envolventes calculadas siguiendo este criterio de Hoek y Brown y el de Mohr Coulomb describen la resistencia al corte del material en función del esfuerzo normal en la superficie de corte. Los parámetros de resistencia obtenidos para la condición de macizo inalterado fueron los siguientes: Gabro de San Diego, c= 0,27 MPa y $\phi$= 59.3° para el horizonte IIA; Anfibolita, c= 3,4 MPa y $\phi$= 53º para el horizonte III y c= 2,6 MPa y $\phi$= 48.9 para el horizonte IIB; Stock de Samarcanda, c= 3,80 MPa y $\phi$= 56º para el horizonte III y c= 2,6 MPa y $\phi$= 48,9 para el horizonte IIB. Los parámetros para la condición de macizo inalterado son aplicables al caso de las excavaciones subterráneas donde los procesos de excavación afectan en menor grado la roca por el confinamiento que brinda el macizo a la zona de la obra.

Las características de deformabilidad se estimaron mediante la correlación empírica entre el módulo de deformación estático y el índice GSI con base en datos de Serafín y Pereira, 1983, teniendo en cuenta el valor de la resistencia a la compresión simple de acuerdo con Hoek ,1996 (Anexo 3-2-Referencia 4.6). Los módulos de deformación de la anfibolita obtenidos para los horizontes IIB y III fueron de 7,7 GPa y 23,5 GPa, respectivamente; para el Stock de Samarcanda los módulos de deformación obtenidos para los horizontes IIB y III fueron de 7,7 GPa y 31,1 GPa; y finalmente, para el Gabro de San Diego 2,6 GPa.

Con base en la información recolectada se estimaron los parámetros de resistencia al corte de las discontinuidades, de acuerdo con el criterio de falla de Barton (Anexo 3-2-Referencia 4.7), y se calculó la envolvente de resistencia al corte en la discontinuidad en función del esfuerzo normal que actúa en la misma superficie. También se estimaron los parámetros de Mohr - Coulomb, cohesión, c y ángulo de fricción $\phi$.

### 3.2.2.2 Evaluación de laderas de las vías de acceso

Para el desarrollo de éste subcapítulo se evaluó el estado de laderas a lo largo de los corredores de las vías proyectadas, se identificaron los sitios críticos asociados a zonas que potencialmente pudieran presentar problemas de inestabilidad, y se obtuvo información para el diseño de los taludes en función de las pendientes recomendadas y de la necesidad de tratamientos específicos en los sitios críticos, buscando mejorar las condiciones de estabilidad de la vía. Para lo anterior, se llevaron a cabo las siguientes actividades: exploraciones de campo, ensayos de laboratorio, evaluación de resultados, definición de parámetros y sectorización geotécnica de los corredores viales.

Se realizó entonces la complementación de estudios geotécnicos[4] para las diversas zonas viales así:

- Informe I-2284-TO-12-Rev0 : Se presenta el detalle de estudio de la vía oriental comprendida entre el portal oriental del túnel Santa Elena y el empalme con la Variante de la vía Las Palmas a la altura de la Glorieta de Sajonia.
- Informe I-2284-TO-10-Rev1 : Se presenta el detalle de estudio de la vía a cielo abierto occidental entre el portal Norte del Túnel Seminario y el portal occidental del Túnel Santa Elena.
- Informe I-2284-TO-07-Rev0 : En el cual se hace un diagnóstico de los puentes propuestos por Integral, se recomiendan cambios sustantivos en el diseño con el fin de que los apoyos de los puentes no queden interviniendo los cauces de las quebradas que cruza para generar el menor impacto ambiental posible; dicho informe sirvió como insumo para el análisis de riesgo de las estructuras a lo largo del corredor vial.

Como respuesta a la Resolución 456 de 2.012, se realizó el Estudio de Gestión del Riesgo Geoambiental de la vía occidental a cielo abierto[5] (Anexo 3-2), orientados a precisar las situaciones a las que estarían expuestas las obras del proyecto de conexión, en lo que se refiere a muros, puentes y taludes, con respecto a las condiciones de amenazas por procesos de remoción.

Como punto de partida en los análisis de riesgos se verifican los antecedentes de las problemáticas de movimientos de masa en la región, con base en información secundaria, seguidamente se verifican las condiciones de las obras con respecto a las características geológicas, geomorfológicas y de procesos del entorno, para luego aplicar la metodología de evaluación y finalmente establecer las recomendaciones más pertinentes que garanticen unas condiciones seguras de estabilidad para las obras

La metodología adoptada en la evaluación del nivel de riesgo, considera dos elementos básicos, que conllevan una evaluación porcentual y de ponderación, uno es determinar los principales factores de riesgo que se tienen en la zona de estudio, por efectos del desarrollo de procesos de remoción y/o erosión, y el otro es considerar que variables motivan el desarrollo de dichos factores, para finalmente, establecer una calificación que determina el nivel de riesgo de la obra proyectada, según las condiciones del entorno.
Para la evaluación de las condiciones de riesgos se identificaron ocho (8) factores básicos, a los cuales se les determinó un grado porcentual de participación en la posible participación del desarrollo del evento, los cuales se describen a continuación.

[4] Inteinsa 2.012
[5] Gica 2.013

- Fenómenos de remoción en masa: este factor contiene tres variables de evaluación, donde se hace alusión sobre la presencia en el sitio de interés, si es activo, o está en algún proceso de reactivación, y si existen evidencias de procesos de erosión lamiar o concentrada, su estado y actividad.
- Localización del proceso de erosión y/o remoción: hace referencia a la distancia con respecto a la obra proyectada, que se tiene con el proceso de erosión y/o remoción identificado. Se tomaron tres variables, uno si está a menos de 10 m, entre 10 m y 20 m y mayor a 20 m.
- Pendiente: se refiere a la situación del grado o nivel de inclinación que tiene el terreno en el sector de interés, donde se proyecta la obra, para lo cual se evalúan tres situaciones, uno si es mayor a 30º, otra si está entre 15º y 30ºm y la tercera es si es menor a los 15º.
- Unidad litológica: en este caso se evalúa el tipo de material donde se proyecta la obra, de tal forma que se consideran tres escenarios, uno es sobre macizos rocosos fracturados; el otro sobre suelos residuales y saprolíticos; y el tercero en depósitos de vertiente.
- Grado de fracturación del macizo: hace referencia si en el sector de interés aflora el macizo litológico, y si el grado de fracturación es alto o bajo y si se tienen evidencias de desplazamientos recientes.
- Grado de humedad del suelo: este factor se relaciona con las condiciones de agua en el suelo, de acuerdo con tres variables de evaluación, uno si está seco, otro si se evidencian situaciones de humedad pero sin escurrimiento y el último si hay evidencias de flujos.
- Localización con respecto a quebradas: este factor califica tres variables, según su ubicación con respecto a la zona de retiro, uno dentro de la zona activa, el otro a menos de 10 m y el tercero a más de 10 m.
- Cobertura vegetal: se refiere a la condición del tipo de cobertura en la zona, una es que se tengan bosques secundarios o plantados, otro es la presencia de rastrojos bajos y/o altos, y por último situaciones de suelo con poca cobertura o presencia de pastos.

#### 3.2.2.2.1 Exploraciones de campo

Dentro de las actividades de campo llevadas a cabo para la evaluación de laderas y taludes se encuentran:

**Levantamiento de las características geotécnicas de laderas.** Se hizo un levantamiento de los corredores identificando, entre otros aspectos, usos del suelo, condiciones de humedad, disposición del drenaje de la ladera, antiguos movimientos en masa, deslizamientos activos, zonas de reptación y procesos erosivos que pudieran afectar la operabilidad de las vías.

Para la descripción de los perfiles de meteorización en etapas anteriores se empleó la clasificación de Dearman. Las características de cada uno de los horizontes se describen en la siguiente tabla:

Tabla 3-29 - Evaluación de Laderas y Taludes

| Horizonte de meteorización | Características |
|---|---|
| VI | Zona de eluviación e iluviación. La zona de eluviación es la que ha sido empobrecida por la infiltración de agua, la cual transporta, suelo abajo, materiales en suspensión o solución. La zona de iluviación es la zona de deposición de los materiales sólidos que han sido transportados de la zona de eluviación. El horizonte de iluviación está alterado hasta tal punto que existe muy poca indicación del material materno y ninguna de la estructura original de la masa rocosa. |

| Horizonte de meteorización | Características |
|---|---|
| V | Este horizonte se reconoce por las estructuras originales de la roca, pero a pesar de ser éstas evidentes, el material se tipifica más como un suelo que como una roca. Aunque se comporta como un suelo en muchos aspectos, la persistencia de las estructuras heredadas de la roca madre resulta en planos de debilidad. Saprolito es el término que comúnmente se aplica a esta zona. |
| IV | Horizonte donde el porcentaje de los núcleos de roca varía entre 10% y 50%. |
| III | Transición del saprolito a la roca meteorizada. Se caracteriza por los amplios límites de las propiedades físicas de sus componentes. Varían éstos desde materiales tipificados como suelos, hasta núcleos de roca tipificados como materiales rocosos. Los núcleos de roca comprenden del 50% al 95% del volumen de la zona de transición. |
| II | Roca donde se presenta una notable decoloración y algo de alteración a lo largo de las discontinuidades. |
| I | Roca no meteorizada, donde las discontinuidades exhiben muy poca o ninguna oxidación que pudiera ser atribuida a procesos de meteorización. |

Fuente: Inteinsa 2.012

**Exploración de campo.** En la vía de acceso occidental, dada la cantidad de registros de exploración encontrados en esta zona del proyecto, esta actividad tuvo como objetivo complementar la información contenida en los estudios previos que fueron realizados por Consultoría Colombiana Ltda. en los años 1984 y 1986, (Anexo 3-2-Referencias 4.13, 4.14 y 4.15). Adicionalmente, se utilizó la base de datos desarrollada por Integral S.A. para el proyecto "Microzonificación Sísmica de Medellín" y la exploración realizada en el estudio ejecutado por INTEGRAL en el 2002 consistente en nueve apiques, identificados como AO-AP-01 a AO-AP-09 y una trinchera TW-TR-01 localizada en el área de excavación del portal occidental. En el tramo oriental no se realizaron apiques en el año 2000, para la caracterización de los sitios de corte, teniendo en cuenta que solamente hacia la zona del portal se localizarán cortes de importancia. En dicho sector se realizó una perforación para la caracterización de estos materiales, identificada como A0-TE-01. Adicionalmente se realizaron 3 perforaciones para el diseño de las fundaciones de la estructura proyectada en la glorieta de Sajonia las cuales permitieron caracterizar los materiales de la zona.

La exploración del subsuelo para esta etapa se efectuó en los lugares seleccionados dependiendo del objetivo buscado para cada uno de los sondeos y consistió en perforaciones con taladro rotatorio, penetraciones estándar y líneas de refracción sísmica. Se ejecutaron tres perforaciones en dos sitios de puentes de la vía occidental: AO-VW-P-01 en la quebrada Chupadero (km 8+100), AO-VW-P-02 (km 8+345) y AO-VW-P-03 (km 8+420) en la quebrada Mediagua. Se ejecutaron cuatro penetraciones estándar en la vía de acceso occidental: AO-VW-SPT-1A a AO-VW-SPT-4 en los sitios de terraplenes, cortes de mayor altura y antiguos deslizamientos, y cuatro penetraciones en la vía de acceso oriental: AO-VE-SPT-5 a AO-VE-SPT-8 en los sitios de cortes de mayor altura y en zona cerca de la quebrada La Salazar, que bordea el alineamiento de la vía.

Los registros donde se describen los trabajos de exploración realizados se presentan en el Anexo 3-2. La ubicación de estos sondeos se presenta en el plano AO-VI-GO-002.

En las siguientes tablas se presentan los valores obtenidos del número de golpes del ensayo de penetración estándar "**$N_{spt}$** corregido", al igual que los valores de los módulos de elasticidad y del ángulo de fricción interna del suelo, determinados mediante las siguientes correlaciones matemáticas:

Para el cálculo de la resistencia efectiva de los suelos ($\varnothing_{eq}$), se utilizó la expresión de Kishida, expuesta en la Referencia 4.18.

$$\phi_{eq} = 15 + (12{,}5N_{45})^{0,5}$$

Para el cálculo de los módulos de elasticidad, se utilizaron las siguientes correlaciones, según el tipo de suelo (Referencia 4.18):

Arena limosa: $E = 300(N_{55} + 6)$

Arena gravosa y gravas: $E = 1200(N_{55} + 6)$

Tabla 3-30 Corrección del SPT y estimativo de E y de  a partir del Nspt para la penetración SPT-1A

| De | a | PROF (m) | NSPT |  (kN/m³) |  (kPa) | u (kPa) | ' (kPa) |  (°) | Es (kPa) | Descripción del suelo |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0,00 | 0,45 | 0,23 | 6 | 18 | 4,05 | 0,00 | 4,05 | 28 | 5044 | Capa orgánica |
| 0,45 | 0,90 | 0,68 | 7 | 18 | 12,15 | 0,00 | 12,15 | 27 | 4718 | |
| 1,40 | 1,85 | 1,63 | 14 | 18 | 29,25 | 0,00 | 29,25 | 30 | 6249 | Depósito |
| 1,85 | 2,30 | 2,08 | 22 | 18 | 37,35 | 0,00 | 37,35 | 33 | 8185 | |

Nivel freático =no se detectó

Tabla 3-31 Corrección del SPT y estimativo de E y de  a partir del Nspt para la penetración SPT-1B

| De | a | PROF (m) | NSPT |  (kN/m³) |  (kPa) | u (kPa) | ' (kPa) |  (°) | Es (kPa) | Descripción del suelo |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0,00 | 0,45 | 0,23 | 7 | 18 | 4,05 | 0,00 | 4,05 | 29 | 5585 | Capa orgánica |
| 0,45 | 0,90 | 0,68 | 14 | 18 | 12,15 | 0,00 | 12,15 | 32 | 7636 | |
| 1,40 | 1,85 | 1,63 | 17 | 18 | 29,25 | 0,00 | 29,25 | 32 | 7202 | Depósito |
| 1,85 | 2,10 | 1,98 | 70 | 18 | 35,55 | 0,00 | 35,55 | 45 | 22506 | |

Nivel freático =no se detectó

Tabla 3-32 Corrección del SPT y estimativo de E y de  a partir del Nspt para la penetración SPT-2

| De | a | PROF (m) | NSPT |  (kN/m³) |  (kPa) | u (kPa) | ' (kPa) |  (°) | Es (kPa) | Descripción del suelo |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0,00 | 0,45 | 0,23 | 5 | 18 | 4,05 | 0,00 | 4,05 | 27 | 4503 | Capa orgánica |
| 0,45 | 0,90 | 0,68 | 3 | 18 | 12,15 | 0,00 | 12,15 | 23 | 3050 | Depósito |
| 1,40 | 1,85 | 1,63 | 9 | 18 | 29,25 | 0,00 | 29,25 | 27 | 4660 | |
| 1,85 | 2,30 | 2,08 | 17 | 18 | 37,35 | 0,00 | 37,35 | 31 | 6734 | Residual |
| 2,80 | 3,25 | 3,03 | 11 | 18 | 54,45 | 0,00 | 54,45 | 27 | 4525 | Zona |
| 3,25 | 3,70 | 3,48 | 15 | 18 | 62,55 | 0,00 | 62,55 | 28 | 5281 | brechosa |
| 4,20 | 4,65 | 4,43 | 18 | 18 | 79,65 | 0,00 | 79,65 | 30 | 5979 | Residual |
| 4,65 | 5,10 | 4,88 | 24 | 18 | 87,75 | 0,00 | 87,75 | 31 | 10427 | |

| De | a | PROF (m) | NSPT | □ (kN/m³) | □v (kPa) | u (kPa) | □v' (kPa) | □ (°) | Es (kPa) | Descripción del suelo |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 5,10 | 5,55 | 5,33 | 15 | 18 | 95,85 | 0,00 | 95,85 | 28 | 8137 | Zona |
| 5,55 | 6,00 | 5,78 | 19 | 18 | 103,95 | 0,00 | 103,95 | 29 | 8890 | brechosa |
| 6,00 | 6,45 | 6,23 | 19 | 18 | 112,05 | 0,00 | 112,05 | 30 | 9229 | |
| 6,95 | 7,40 | 7,18 | 22 | 18 | 129,15 | 0,00 | 129,15 | 30 | 9618 | |
| 7,40 | 7,85 | 7,63 | 25 | 18 | 137,25 | 0,00 | 137,25 | 31 | 10124 | Residual |
| 7,85 | 8,30 | 8,08 | 31 | 18 | 145,35 | 0,00 | 145,35 | 33 | 11225 | |
| 8,30 | 8,75 | 8,53 | 23 | 18 | 153,45 | 0,00 | 153,45 | 30 | 9443 | |
| 8,75 | 9,20 | 8,98 | 18 | 18 | 161,55 | 0,00 | 161,55 | 28 | 8342 | |
| 9,20 | 9,65 | 9,43 | 29 | 18 | 169,65 | 0,00 | 169,65 | 31 | 10365 | |
| 9,65 | 10,10 | 9,88 | 59 | 18 | 177,75 | 0,00 | 177,75 | 38 | 15848 | |
| 10,10 | 10,45 | 10,28 | 73 | 18 | 184,95 | 0,00 | 184,95 | 41 | 18886 | |

Nivel freático =no se detectó

Tabla 3-33 Corrección del SPT y estimativo de E y de ϕ a partir del Nspt para la penetración SPT-3

| De | a | PROF (m) | NSPT | γ (kN/m³) | σV (kPa) | u (kPa) | σV' (kPa) | ϕ (°) | Es (kPa) | Descripción del suelo |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0,00 | 0,45 | 0,23 | 2 | 18 | 4,05 | 0,00 | 4,05 | 22 | 2881 | Capa Orgánica |
| 0,45 | 0,90 | 0,68 | 3 | 18 | 12,15 | 0,00 | 12,15 | 23 | 3050 | |
| 1,40 | 1,85 | 1,63 | 7 | 18 | 29,25 | 0,00 | 29,25 | 26 | 4024 | Depósito |
| 1,85 | 2,30 | 2,08 | 7 | 18 | 37,35 | 0,00 | 37,35 | 25 | 3832 | |
| 2,80 | 3,25 | 3,03 | 4 | 18 | 54,45 | 0,00 | 54,45 | 22 | 2791 | |
| 3,25 | 3,70 | 3,48 | 4 | 18 | 62,55 | 0,00 | 62,55 | 22 | 2728 | |
| 4,20 | 4,65 | 4,43 | 5 | 18 | 79,65 | 0,00 | 79,65 | 23 | 2961 | |
| 4,65 | 5,10 | 4,88 | 3 | 18 | 87,75 | 0,00 | 87,75 | 21 | 5503 | |
| 5,60 | 6,05 | 5,83 | 3 | 18 | 104,85 | 0,00 | 104,85 | 21 | 5443 | Residual |
| 6,05 | 6,50 | 6,28 | 3 | 18 | 112,95 | 0,00 | 112,95 | 21 | 5497 | |
| 7,00 | 7,45 | 7,23 | 5 | 18 | 130,05 | 0,00 | 130,05 | 22 | 5892 | |
| 7,45 | 7,90 | 7,68 | 4 | 18 | 138,15 | 0,00 | 138,15 | 21 | 5649 | |
| 8,40 | 8,85 | 8,63 | 5 | 18 | 155,25 | 0,00 | 155,25 | 22 | 5804 | |
| 8,85 | 9,30 | 9,08 | 5 | 18 | 163,35 | 0,00 | 163,35 | 22 | 5778 | |
| 9,80 | 10,25 | 10,03 | 25 | 18 | 180,45 | 0,00 | 180,45 | 30 | 9688 | |
| 10,25 | 10,70 | 10,48 | 21 | 18 | 188,55 | 0,00 | 188,55 | 29 | 8810 | |

Nivel freático =no se detectó

Tabla 3-34- Corrección del SPT y estimativo de E y de □ a partir del Nspt para la penetración SPT-4

| De | a | PROF (m) | NSPT | g - (kN/m3) | sV - (kPa) | u - (kPa) | sV' - (kPa) | f - (°) | Es (kPa) | Descripción del suelo |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 0,45 | 0,23 | 2 | 18 | 4,05 | 0 | 4,05 | 22 | 2881 | Capa orgánica |
| 0,95 | 1,4 | 1,18 | 11 | 18 | 21,15 | 0 | 21,15 | 29 | 5698 | Depósito |
| 1,4 | 1,85 | 1,63 | 17 | 18 | 29,25 | 0 | 29,25 | 32 | 7202 | |

| De | a | PROF (m) | NSPT | g - (kN/m3) | sv - (kPa) | u - (kPa) | sv' - (kPa) | f - (º) | Es (kPa) | Descripción del suelo |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 2,35 | 2,80 | 2,58 | 5 | 18 | 46,35 | 0 | 46,35 | 23 | 3129 | |
| 2,80 | 3,25 | 3,03 | 4 | 18 | 54,45 | 0 | 54,45 | 22 | 2791 | |
| 3,75 | 4,20 | 3,98 | 11 | 18 | 71,55 | 0 | 71,55 | 26 | 4186 | Residual |
| 4,20 | 4,65 | 4,43 | 6 | 18 | 79,65 | 0 | 79,65 | 23 | 3193 | |
| 5,15 | 5,60 | 5,38 | 15 | 18 | 96,75 | 0 | 96,75 | 28 | 8124 | |
| 5,60 | 6,05 | 5,83 | 12 | 18 | 104,85 | 0 | 104,85 | 26 | 7374 | |
| 6,55 | 7,00 | 6,78 | 14 | 18 | 121,95 | 0 | 121,95 | 27 | 7946 | |
| 7,00 | 7,45 | 7,23 | 19 | 18 | 130,05 | 0 | 130,05 | 29 | 8948 | |
| 7,95 | 8,40 | 8,18 | 17 | 18 | 147,15 | 0 | 147,15 | 28 | 8303 | Saprolito |
| 8,40 | 8,85 | 8,63 | 13 | 18 | 155,25 | 0 | 155,25 | 26 | 7409 | |
| 8,85 | 9,30 | 9,08 | 19 | 18 | 163,35 | 0 | 163,35 | 28 | 8517 | |
| 9,30 | 9,75 | 9,53 | 23 | 18 | 171,45 | 0 | 171,45 | 29 | 9189 | |
| 9,75 | 10,2 | 9,98 | 21 | 18 | 179,55 | 0 | 179,55 | 29 | 8711 | |

Nivel freático =no se detectó

Tabla 3-35 - Corrección del SPT y estimativo de E y de  a partir del Nspt para la penetración SPT-5

| De | a | PROF (m) | NSPT | g - (kN/m3) | sv - (kPa) | u - (kPa) | sv' - (kPa) | f - (º) | Es (kPa) | Descripción del suelo |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1,00 | 1,45 | 1,23 | 12 | 18 | 22,05 | 0 | 22,05 | 30 | 5996 | Residual IB |
| 1,45 | 1,90 | 1,68 | 14 | 18 | 30,15 | 0 | 30,15 | 30 | 6201 | |
| 2,50 | 2,95 | 2,73 | 38 | 18 | 49,05 | 0 | 49,05 | 37 | 11661 | Residual IB-IC |
| 2,95 | 3,40 | 3,18 | 69 | 18 | 57,15 | 0 | 57,15 | 44 | 18517 | |
| 4,45 | 4,90 | 4,68 | 41 | 18 | 84,15 | 0 | 84,15 | 37 | 11031 | |
| 5,50 | 5,95 | 5,73 | 62 | 18 | 103,05 | 0 | 103,05 | 40 | 14356 | Residual IC |
| 5,95 | 6,40 | 6,18 | 57 | 18 | 111,15 | 0 | 111,15 | 40 | 14300 | |
| 7,00 | 7,45 | 7,23 | 91 | 18 | 130,05 | 0 | 130,05 | 45 | 20425 | |
| 7,45 | 7,90 | 7,68 | 91 | 18 | 138,15 | 0 | 138,15 | 45 | 19912 | |

Nivel freático =no se detectó

Tabla 3-36 - Corrección del SPT y estimativo de E y de  a partir del Nspt para la penetración SPT-6

| De | a | PROF (m) | NSPT | g - (kN/m3) | sv - (kPa) | u - (kPa) | sv' - (kPa) | f - (º) | Es (kPa) | Descripción del suelo |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1,00 | 1,45 | 1,23 | 12 | 18 | 22,05 | 0 | 22,05 | 30 | 5996 | Depósito |
| 1,45 | 1,90 | 1,68 | 24 | 18 | 30,15 | 0 | 30,15 | 35 | 9345 | |
| 2,50 | 2,95 | 2,73 | 57 | 18 | 49,05 | 0 | 49,05 | 42 | 16592 | |
| 2,95 | 3,40 | 3,18 | 62 | 18 | 57,15 | 0 | 57,15 | 43 | 16821 | |

| De | a | PROF (m) | NSPT | g - (kN/m3) | sv - (kPa) | u - (kPa) | sv' - (kPa) | f - (º) | Es (kPa) | Descripción del suelo |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 4,00 | 4,45 | 4,23 | 40 | 18 | 76,05 | 0 | 76,05 | 37 | 11323 | |
| 4,45 | 4,90 | 4,68 | 59 | 18 | 84,15 | 0 | 84,15 | 41 | 15084 | Residual |
| 5,50 | 5,95 | 5,73 | 72 | 18 | 103,05 | 0 | 103,05 | 42 | 16381 | |
| 5,95 | 6,40 | 6,18 | 78 | 18 | 111,15 | 0 | 111,15 | 45 | 23045 | |
| 7,00 | 7,45 | 7,23 | 77 | 18 | 130,05 | 0 | 130,05 | 43 | 21610 | |
| 7,45 | 7,90 | 7,68 | 70 | 18 | 138,15 | 0 | 138,15 | 42 | 19661 | |
| 8,50 | 8,95 | 8,73 | 56 | 18 | 157,05 | 0 | 157,05 | 38 | 15975 | |
| 8,95 | 9,40 | 9,18 | 86 | 18 | 165,15 | 0 | 165,15 | 43 | 21533 | |

Nivel freático =no se detectó

Tabla 3-37 - Corrección del SPT y estimativo de E y de  a partir del Nspt para la penetración SPT-7

| De | a | PROF (m) | NSPT | g - (kN/m3) | sv - (kPa) | u - (kPa) | sv' - (kPa) | f - (º) | Es (kPa) | Descripción del suelo |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1,00 | 1,45 | 1,23 | 29 | 18 | 22,05 | 0 | 22,05 | 38 | 11939 | Capa Orgánica |
| 1,45 | 1,90 | 1,68 | 59 | 18 | 30,15 | 0 | 30,15 | 45 | 20348 | |
| 2,50 | 2,95 | 2,73 | 59 | 18 | 49,05 | 0 | 49,05 | 43 | 17111 | |
| 2,95 | 3,40 | 3,18 | 62 | 18 | 57,15 | 0 | 57,15 | 43 | 16821 | |
| 4,00 | 4,45 | 4,23 | 60 | 18 | 76,05 | 0 | 76,05 | 42 | 16085 | |
| 4,45 | 4,90 | 4,68 | 79 | 18 | 84,15 | 0 | 84,15 | 45 | 19587 | Depósito |
| 5,50 | 5,95 | 5,73 | 73 | 18 | 103,05 | 0 | 103,05 | 42 | 16584 | |
| 5,95 | 6,40 | 6,18 | 76 | 18 | 111,15 | 0 | 111,15 | 44 | 22578 | |
| 7,00 | 7,45 | 7,23 | 50 | 18 | 130,05 | 0 | 130,05 | 38 | 15715 | |
| 7,45 | 7,90 | 7,68 | 40 | 18 | 138,15 | 0 | 138,15 | 35 | 13292 | |
| 8,50 | 8,95 | 8,73 | 77 | 18 | 157,05 | 0 | 157,05 | 42 | 20166 | |
| 8,95 | 9,40 | 9,18 | 72 | 18 | 165,15 | 0 | 165,15 | 41 | 18809 | |
| 9,40 | 9,80 | 9,60 | 96 | 18 | 172,8 | 0 | 172,8 | 45 | 23046 | |

Nivel freático =no se detectó

Tabla 3-38 - Corrección del SPT y estimativo de E y de  a partir del Nspt para la penetración SPT-8

| De | a | PROF (m) | NSPT | g - (kN/m3) | sv - (kPa) | u - (kPa) | sv' - (kPa) | f - (º) | Es (kPa) | Descripción del suelo |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0,00 | 0,45 | 0,23 | 17 | 18 | 4,05 | 0,00 | 4,05 | 37 | 10991 | Capa orgánica |
| 0,45 | 0,90 | 0,68 | 23 | 18 | 12,15 | 0,00 | 12,15 | 37 | 11387 | |
| 0,90 | 1,35 | 1,13 | 10 | 18 | 20,25 | 0,00 | 20,25 | 29 | 5392 | |
| 1,35 | 1,80 | 1,58 | 14 | 18 | 28,35 | 0,00 | 28,35 | 30 | 6298 | Lleno |
| 1,80 | 2,25 | 2,03 | 8 | 18 | 36,45 | 0,00 | 36,45 | 26 | 4144 | |

| De | a | PROF (m) | NSPT | g - (kN/m3) | sv - (kPa) | u - (kPa) | sv' - (kPa) | f - (°) | Es (kPa) | Descripción del suelo |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 2,25 | 2,70 | 2,48 | 5 | 18 | 44,55 | 0,00 | 44,55 | 23 | 3152 | |
| 3,20 | 3,65 | 3,43 | 10 | 18 | 61,65 | 0,00 | 61,65 | 26 | 4137 | |
| 3,65 | 4,10 | 3,88 | 8 | 18 | 69,75 | 0,00 | 69,75 | 24 | 3559 | |
| 4,60 | 5,05 | 4,83 | 5 | 18 | 86,85 | 0,00 | 86,85 | 23 | 5979 | |
| 5,05 | 5,50 | 5,28 | 10 | 18 | 94,95 | 0,00 | 94,95 | 25 | 7037 | Aluvial |
| 5,75 | 6,20 | 5,98 | 41 | 18 | 107,55 | 0,00 | 107,55 | 35 | 13501 | |
| 6,20 | 6,65 | 6,43 | 16 | 18 | 115,65 | 2,25 | 113,40 | 28 | 8511 | |
| 7,15 | 7,60 | 7,38 | 10 | 18 | 132,75 | 11,75 | 121,00 | 25 | 7055 | |
| 7,60 | 8,05 | 7,83 | 9 | 18 | 140,85 | 16,25 | 124,60 | 25 | 6803 | Residual |
| 8,55 | 9,00 | 8,78 | 3 | 18 | 157,95 | 25,75 | 132,20 | 21 | 5450 | |
| 9,00 | 9,45 | 9,23 | 25 | 18 | 166,05 | 30,25 | 135,80 | 31 | 10150 | |
| 9,95 | 10,4 | 10,18 | 19 | 18 | 183,15 | 39,75 | 143,40 | 29 | 8972 | |
| 10,4 | 10,85 | 10,63 | 27 | 18 | 191,25 | 44,25 | 147,00 | 32 | 10659 | |

Nivel freático =6,20 m

**Líneas de refracción sísmica y tomografía eléctrica:** En la vía de acceso occidental se vio la necesidad de implementar un programa de exploración indirecta con el fin de complementar el conocimiento sobre la estratigrafía en varios sitios del alineamiento. Esta exploración se realizó a partir de ensayos de refracción sísmica que determinan el espesor de los estratos de los diferentes materiales en función de la velocidad de propagación de onda compresiva por cada uno de estos.

La investigación inicialmente estuvo conformada por once líneas de 55 m de longitud, cada una con 12 geófonos espaciados cada 5 m, para lo cual se empleó un sismógrafo digital computarizado marca Geometrics ES-3000 el cual determina el tiempo de viaje de la onda compresiva entre la fuente y cada uno de los geófonos.

Las líneas se ubicaron en sitios de quebradas y en el último sector desde el km 9+020 hasta el km 9+800 donde se pretendía verificar la estratigrafía que por los estudios anteriores es la zona de ladera rocosa. En el plano AO-VI-GO-002 se presenta la localización en planta de estas líneas.

A continuación se presentan los resultados obtenidos en cada sitio:

En el km 8+168, ubicado en la margen derecha de la quebrada Chupadero, se detectó un primer estrato con una velocidad de 500 m/s que corresponde a un depósito, y de ahí hasta el final hasta 20 m, una velocidad entre 600 m/s y 1.000 m/s correspondiente al suelo residual de anfibolita. En la margen izquierda de la misma quebrada se encontró un depósito con una velocidad de 500 m/s hasta 6 m aproximadamente y luego el residual de anfibolita, encontrando la transición IC-IIA a 15 m de profundidad con una velocidad entre 1.000 m/s y 1.500 m/s y de ahí en adelante la roca (horizonte IIA).

En la margen izquierda de la quebrada Mediagua se detectó un primer estrato con una velocidad de 500 m/s a 800 m/s que corresponde a un depósito, hasta 12 m aproximadamente, luego el residual de anfibolita hasta 25 m, detectando el horizonte IC-IIA desde los 15 m. En la margen

derecha se encontró el mismo depósito hasta los 12 m y luego el residual de anfibolita hasta los 25 m con velocidades entre 1.000 m/s y 1.800 m/s sin llegar a roca.

En el km 9+020 se encontró el primer estrato correspondiente a suelo residual hasta 8 m con una velocidad entre 500 m/s y 800 m/s, luego la transición IC-IIA hasta los 12 m con velocidad entre 1.000 m/s y 1.500 m/s y de ahí en adelante el horizonte de roca IIA.

Desde el km 9+650 hasta el km 9+800 se detectó un espesor de suelo de 5 m (horizonte IC) con velocidades hasta 700 m/s, luego la transición IC-IIA hasta los 10 m con velocidades hasta 1.500 m/s y de ahí el horizonte IIA de roca.

En la quebrada La Aguadita, en la margen izquierda se encontró el suelo hasta 8 m con velocidades hasta 800 m/s, a los 10 m se detectó la transición IC-IIA y desde los 15 m el estrato de roca con una velocidad desde 2.000 m/s hasta 5.000 m/s. En la margen derecha, el estrato de suelo hasta 9 m con velocidades entre 500 m/s y 800 m/s, y luego el horizonte IC-IIA hasta los 25 m con una velocidad máxima de 1.500 m/s.

Posteriormente y con el fin de dar respuesta de la Resolución 456 de 2.012, se realizaron 4082.5 m de exploración geofísica[6], distribuidos en 3105 m de líneas de refracción sísmica para 34 puntos de apoyos para puentes, 805 m de líneas de refracción sísmica para 14 muros y 172.5 m de líneas de tomografía eléctrica para taludes; el detalle de ésta información se encuentra en el Anexo 3-2 - Informe de exploración anexo de la vía occidental a cielo abierto por ULLOA y DIEZ.

| PLAN DE TRABAJO ENSAYOS VÍA OCCIDENTAL | | | | | | | Fecha de Ejecución |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Item | Sitio | No. | Abscisa | Longitud | Observación | |
| PUENTES | 1 | Puente Caunces (K6+902) | LS1 | K6+902 | 57,5 | Perpendicular al eje | 28-may |
| | 2 | | LS2 | K6+902 | 115 | Entre Estribos | 28-may |
| | 3 | Puente k7+080 | LS3 | K7+110 | 57,5 | Perpendicular al eje | 27-may |
| | 4 | | LS4 | K7+080 | 115 | Entre Estribos | 28-may |
| | 5 | | LS5 | K7+190 | 115 | Entre Estribos | 27-may |
| | 6 | Puente k7+372 | LS6 | K7+400 | 57,5 | Perpendicular al eje | 27-may |
| | 7 | | LS7 | K7+372 | 115 | Entre Estribos | 26-may |
| | 8 | | LS8 | K7+372 | 115 | Entre Estribos | 26-may |
| | 9 | PUENTE QUEBRADA PASTORA | LS9 | K7+607 | 57,5 | Perpendicular al eje | 25-may |
| | 10 | | LS10 | K7+667 | 57,5 | Perpendicular al eje | 25-may |
| | 11 | | LS11 | K7+572 | 115 | Entre Estribos | 26-may |
| | 12 | | LS12 | K7+572 | 115 | Entre Estribos | 25-may |
| | 13 | PUENTE Q. EL CHUPADERO | LS13 | K8+160 | 57,5 | Perpendicular al eje | 24-may |
| | 14 | | LS14 | K8+160 | 115 | Entre Estribos | 24-may |
| | 15 | PUENTE QUEBRADA MEDIAGUA | LS15 | K8+345 | 57,5 | Perpendicular al eje | 24-may |
| | 16 | | LS16 | K8+420 | 57,5 | Perpendicular al eje | 23-may |
| | 17 | | LS17 | K8+345 | 115 | Entre Estribos | 24-may |
| | 18 | | LS18 | K8+345 | 115 | Entre Estribos | 23-may |

[6] ULLOA y DIEZ (2.013)

| PLAN DE TRABAJO ENSAYOS VÍA OCCIDENTAL | | | | | | | Fecha de Ejecución |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Item | Sitio | No. | Abscisa | Longitud | Observación | |
| | 19 | PUENTE QUEBRADA LA ESPADERA | LS19 | k6+065 | 57,5 | Perpendicular al eje | 22-may |
| | 20 | | LS20 | k9+215 | 57,5 | Perpendicular al eje | 22-may |
| | 21 | | LS21 | k9+065 | 115 | Entre Estribos | 22-may |
| | 22 | | LS22 | k9+065 | 115 | Entre Estribos | 22-may |
| | 23 | | LS23 | k9+065 | 115 | Entre Estribos | 22-may |
| | 24 | PUENTE Q. LA BOCANA | LS24 | K10+010 | 57,5 | Perpendicular al eje | 18-may |
| | 25 | | LS25 | K10+010 | 115 | Entre Estribos | 20-may |
| | 26 | | LS26 | K10+010 | 115 | Entre Estribos | 20-may |
| | 27 | VIADUCTO 510 m - LUCES DE 40 m | LS27 | K9+350 | 57,5 | Estribo perpendicular al Eje | 22-may |
| | 28 | | LS28 | K9+350 | 115 | Por el eje | 21-may |
| | 29 | | LS29 | K9+460 | 115 | Por el eje | 21-may |
| | 30 | | LS30 | K9+570 | 115 | Por el eje | 21-may |
| | 31 | | LS31 | K9+680 | 115 | Por el eje | 20-may |
| | 32 | | LS32 | K9+790 | 115 | Por el eje | 20-may |
| | 33 | | LS33 | K9+550 | 57,5 | Perpendicular al eje | 21-may |
| | 34 | | LS34 | K9+850 | 57,5 | Estribo perpendicular al Eje | 21-may |
| MUROS | 1 | M1 | LSM1 | k6+834 | 57,5 | Perpendicular al eje | 29-may |
| | 2 | | LSM2 | k6+868 | 57,5 | Perpendicular al eje | 29-may |
| | 3 | M2 | LSM3 | k6+874 | 57,5 | Paralela al eje | 29-may |
| | 4 | M3 | LSM4 | k7+046 | 57,5 | Paralela al eje | 29-may |
| | 5 | M4 | LSM5 | k7+215 | 57,5 | Paralela al eje | 27-may |
| | 6 | M5 | LSM6 | k7+340 | 57,5 | Paralela al eje | 26-may |
| | 7 | M6 | LSM7 | k7+498 | 57,5 | Paralela al eje | 26-may |
| | 8 | M7 | LSM8 | k7+555 | 57,5 | Paralela al eje | 26-may |
| | 9 | M8 | LSM9 | K7+705 | 57,5 | Paralela al eje | 26-may |
| | 10 | M10 | LSM10 | k8+685 | 57,5 | Paralela al eje | 23-may |
| | 11 | M11 | LSM11 | k8+872 | 57,5 | Paralela al eje | 23-may |
| | 12 | M13 | LSM12 | k9+280 | 57,5 | Paralela al eje | 22-may |
| | 13 | M16 | LSM13 | k10+162 | 57,5 | Paralela al eje | 18-may |
| | 14 | M9 | LSM14 | k7+900 | 57,5 | Paralela al eje | 24-may |
| TALUDES | 1 | T1 | LST1 | k6+640 | 57,5 | Perpendicular ladera | 29-may |
| | 2 | T2 | LST2 | k7+290 | 57,5 | Perpendicular ladera | 27-may |
| | 3 | T3 | GEOL1LST3 | k7+550 | 50 | Perpendicular ladera | 25-may |
| | 4 | T4 | GEO2LST4 | k7+760 | 50 | Perpendicular ladera | 25-may |
| | 5 | T6 | GEO3LST6 | k8+760 | 50 | Perpendicular ladera | 23-may |

| PLAN DE TRABAJO ENSAYOS VÍA OCCIDENTAL | | | | | | | Fecha de Ejecución |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Item | Sitio | No. | Abscisa | Longitud | Observación | |
| | 6 | T7 | LST7 | k9+870 | 57,5 | Perpendicular ladera | 21-may |

#### 3.2.2.2.2 Ensayos de laboratorio

Con el propósito de obtener información sobre las propiedades físicas y mecánicas de los suelos y rocas recuperados en las perforaciones y penetraciones, se llevaron a cabo los siguientes ensayos de laboratorio: granulometría, límites de consistencia, humedad natural, peso específico, compresión triaxial, compresión simple, compactación, etc. Los resultados de los ensayos realizados en esta etapa, los ejecutados en el estudio de 2000 por Integral S.A. se muestran en las siguientes tablas:

Tabla 3-39 - Resultados de los Ensayos de Laboratorio Realizados en este Estudio

| MUESTRA NÚMERO | PROF. ( m ) | HUMEDAD NATURAL ( % ) | LL ( % ) | LP ( % ) | IP ( % ) | RETENIDO #4 (CASCAJO) ( % ) | DE #4 A #200(ARENA) ( % ) | PASA # 200(FINOS) ( % ) | DENSIDAD HÚMEDA ( kN/m$^3$ ) | DENSIDAD SECA ( kN/m$^3$ ) | ESFUERZO MÁXIMO (kPa) | MÓDULO DE ELASTICIDAD (kPa) | GRUPO USCS |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 3(SPT-1A) | 0,90 | 44,9 | 62 | 44 | 18 | 0,2 | 15,6 | 84,2 | 16,8 | 11,6 | 137,2 | 2940 | MH |
| 6(SPT-1A) | 2,30 | 38,3 | | | | | | | | | | | |
| 4B(SPT-1B) | 1,40 | 39,0 | 49 | 34 | 15 | 1,0 | 23,7 | 75,3 | | | | | ML |
| 3(SPT-2) | 0,90 | 35,0 | 66 | 33 | 33 | 1,1 | 17,0 | 81,9 | 18,2 | 13,5 | 223,1 | 3028 | MH |
| 7(SPT-2) | 2,80 | 37,6 | 52 | 31 | 21 | 4,9 | 23,4 | 71,7 | | | | | MH |
| 12(SPT-2) | 5,10 | 29,8 | | | | | | | | | | | |
| 15(SPT-2) | 6,45 | 24,1 | 32 | 23 | 9 | 0,0 | 22,9 | 77,1 | 19,7 | 15,9 | 132,9 | 3200 | CL |
| 17(SPT-2) | 7,40 | 41,4 | | | 0 | | | 100,0 | | | | | |
| 21(SPT-2) | 9,20 | 29,9 | 41 | 22 | 19 | 13,4 | 20,7 | 65,9 | | | | | CL |
| 9(SPT-3) | 3,70 | 75,9 | 82 | 54 | 28 | 0,2 | 10,2 | 89,6 | 16,0 | 9,1 | 55,4 | 1750 | MH |
| 13(SPT-3) | 5,60 | 79,7 | | | 0 | | | 100,0 | | | | | |
| 16(SPT-3) | 7,00 | 66,2 | 61 | 42 | 19 | 1,1 | 8,8 | 90,1 | | | | | MH |
| 21(SPT-3) | 9,30 | 72,2 | 66 | 33 | 33 | 1,6 | 19,6 | 78,8 | 14,1 | 8,2 | 41,6 | 1270 | ML |
| 4(SPT-4) | 1,40 | 15,0 | 31 | 26 | 5 | 14,4 | 52,0 | 33,6 | | | | | SM |
| 8(SPT-4) | 3,25 | 45,1 | 47 | 37 | 10 | 0,0 | 15,8 | 84,2 | 16,3 | 11,2 | 114,9 | 3400 | ML |
| 13(SPT-4) | 5,60 | 46,0 | 44 | 36 | 8 | 0,9 | 17,1 | 82,0 | | | | | ML |
| 17(SPT-4) | 7,45 | 36,5 | 41 | 31 | 10 | 0,0 | 19,6 | 80,4 | 18,0 | 13,2 | 101,7 | 2180 | ML |
| 21(SPT-4) | 9,30 | 37,0 | 42 | 36 | 6 | 0,0 | 14,5 | 85,5 | | | | | ML |
| 3(SPT-5) | 1,90 | 45,0 | 51 | 43 | 8 | 1,0 | 59,1 | 39,9 | | | | | SM |
| 12(SPT-5) | 6,40 | 39,0 | 48 | 41 | 7 | 1,0 | 40,5 | 58,5 | | | | | ML |
| 2(SPT-6) | 1,45 | 67,0 | | | | | | | | | | | |
| 6(SPT-6) | 3,40 | 56,0 | 51 | 44 | 7 | 14,2 | 23,6 | 62,2 | 15,0 | 9,6 | | | MH |
| 8(SPT-6) | 4,45 | 41,0 | | | | | | | | | | | |
| 11(SPT-6) | 5,95 | 42,0 | 52 | 46 | 6 | 1,6 | 15,9 | 82,5 | | | | | MH |
| 12(SPT-6) | 6,40 | 41,8 | 51 | 46 | 5 | 7,1 | 19,8 | 73,1 | 16,8 | 11,9 | 138,5 | 6435 | MH |
| 6(SPT-7) | 3,40 | 39,2 | 56 | 44 | 12 | 12,7 | 17,2 | 70,1 | 18,0 | 12,9 | 84,4 | 1350 | MH |
| 15(SPT-7) | 7,90 | 41,5 | 57 | 45 | 12 | 16,2 | 18,5 | 65,3 | 17,7 | 12,5 | 94,1 | 3860 | MH |
| 10(SPT-8) | 4,10 | 23,0 | | | NP | 0,0 | 6,9 | 93,1 | 12,7 | 10,3 | 55,5 | 1743 | ML |
| 12(SPT-8) | 5,05 | 29,0 | 30 | 23 | 7 | 0,0 | 35,5 | 64,5 | | | | | ML |

| MUESTRA NÚMERO | PROF. ( m ) | HUMEDAD NATURAL ( % ) | LL ( % ) | LP ( % ) | IP ( % ) | RETENIDO #4 (CASCAJO) ( % ) | DE #4 A #200(ARENA) ( % ) | PASA # 200(FINOS) ( % ) | DENSIDAD HÚMEDA ( kN/m³ ) | DENSIDAD SECA ( kN/m³ ) | ESFUERZO MÁXIMO (kPa) | MÓDULO DE ELASTICIDAD (kPa) | GRUPO USCS |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 14(SPT-8) | 5,75 | 19,0 | | | | | | | | | | | |
| 19(SPT-8) | 8,05 | 58,5 | 49 | 37 | 12 | 3,0 | 15,3 | 81,7 | 15,8 | 10,0 | 18,0 | 357 | ML |
| 20(SPT-8) | 8,55 | 67,0 | | | | | | | | | | | |
| 25(SPT-8) | 10,85 | 43,3 | 46 | 36 | 10 | 0,2 | 25,9 | 73,9 | 18,4 | 12,8 | 95,4 | 1962,0 | ML |

Tabla 3-40 - Resultados de los Ensayos de Laboratorio Realizados por Integral en el estudio del 2000 tramo acceso occidental

| SONDEO | ABSCISA | PROF. (m) | W NAT % | ARENAS P-4 % | ARCILLA-LIMO P-200 % | ENSAYOS DE LABORATORIO | | | | | | | | | CLASIF. (USCS) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | LL % | LP % | IP % | γd kN/m³ | CBR % | Gs | qu kPa | c' kPa | ϕ' (°) | |
| A0-AP-01 | km5+980 | 1,0-1,25 | 27,8 | 100 | 57 | 41 | 24 | 17 | 13,39 | 6,20 | | | | | CL |
| | | 2,00 | 28,7 | 98 | 62 | 38 | 29 | 9 | | | | | | | ML |
| A0-AP-02 | km6+220 | 1,0-1,25 | 42,9 | 100 | 87 | 61 | 36 | 25 | 11,40 | 2,10 | | | | | MH |
| | | 1,75-2,0 | 35,4 | 100 | 75 | 43 | 31 | 12 | 13,61 | | 2,76 | | 0 | 37,8 | ML |
| A0-AP-03 | km6+620 | 1,0-1,25 | 43,9 | 100 | 94 | 62 | 40 | 22 | 12,03 | 8,30 | | | | | MH |
| | | 1,50-1,75 | 41,6 | 100 | 75 | 65 | 39 | 26 | 11,22 | | 2,69 | | 23,98 | 28,5 | MH |
| A0-AP-04 | km6+820 | 1,10-1,35 | 31,1 | 100 | 93 | 60 | 41 | 19 | 12,61 | 5,40 | | | | | MH |
| | | 2,00 | 32,8 | 99 | 80 | 47 | 35 | 12 | | | | | | | ML |
| | | 2,10-2,35 | 38,3 | | | | | | 13,08 | 5,90 | | | | | |
| A0-AP-05 | km7+790 | 1,35-1,60 | 38,1 | 96 | 58 | 63 | 46 | 17 | 12,18 | | 2,97 | | 14,57 | 41 | MH |
| | | 2,10-2,35 | | 97 | 81 | 56 | 40 | 16 | | | | | | | MH |
| | | 2,40-2,50 | 41,9 | 97 | 86 | 57 | 41 | 16 | | | | | | | MH |
| A0-AP-06 | km7+310 | 2,55-2,70 | 33,0 | 89 | 65 | 40 | 30 | 10 | 13,80 | 0,80 | | | | | ML |
| | | 1,30 | 37,8 | 98 | 60 | 38 | 24 | 14 | | | | | | | CL |
| A0-AP-07 | km8+460 | 2,35-2,50 | 55,4 | 96 | 82 | 58 | 33 | 25 | 11,06 | 4,20 | | | | | MH |
| | | 1,50 | 54,9 | 100 | 91 | 65 | 34 | 31 | | | | | | | MH |
| A0-AP-08 | km8+920 | 1,40 | 42,3 | 97 | 80 | 54 | 35 | 19 | | | | | | | |

| SONDEO | ABSCISA | PROF. (m) | W NAT % | ARENAS P-4 % | ARCILLA-LIMO P-200 % | ENSAYOS DE LABORATORIO | | | | | | | | | CLASIF. (USCS) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | LL % | LP % | IP % | $\gamma d$ kN/m$^3$ | CBR % | Gs | qu kPa | c' kPa | $\phi$' (º) | |
| | | 2,10-2,25 | 37,4 | 94 | 68 | 55 | 34 | 21 | 13,32 | 2,70 | | | | | MH |
| | | 2,70 | 38,7 | 69 | 95 | 56 | 33 | 23 | | | | | | | MH |
| A0-AP-09 | km9+220 | 2,20 | 52,8 | 90 | 75 | 48 | 35 | 13 | | | | | | | ML |
| TW-TR-01 | km10+360 | 2,50-2,80 | 34,5 | 68 | 48 | 52 | 31 | 21 | | | | | | | GM |

#### 3.2.2.2.3 Análisis de resultados y estimación de parámetros

##### *3.2.2.2.3.1 Vía de acceso occidental*

Según la clasificación unificada de suelos USCS en este sector predominan suelos residuales conformados por limos de baja y alta plasticidad (ML y MH), aunque en algunos sectores aparecen arenas correspondientes al horizonte de meteorización IC.

Se presentan también depósitos de vertiente los cuales se caracterizan por ser muy heterogéneos y presentar humedades muy altas. Los materiales que predominan están entre limos y arenas, con presencia de gravas en una proporción inferior al 30 %, y algunos fragmentos de roca. La alta humedad encontrada en estos materiales hace prever tanto una baja resistencia al corte como una baja capacidad de carga, por lo que en caso de colocar llenos sobre estos coluviones, se podrían generar asentamientos excesivos que provocarían así fisuramientos y desniveles indeseables en la calzada de la vía.

Debido al amplio rango en el que varían los parámetros de resistencia obtenidos en los ensayos de compresión triaxial, se consideraron parámetros conservadores en el cálculo de la estabilidad de los taludes.

De los ensayos de compactación realizados sobre muestras tomadas en el acceso occidental de la vía, se determinó que la humedad natural de los suelos muestreados en su mayoría es superior a la óptima. Esto es importante para establecer la densidad máxima a lograr en los terraplenes conformados con los materiales provenientes de las explanaciones de la vía considerando la humedad natural de los mismos. Igualmente, esto hace considerar un factor de expansión y compactación alto al realizar un balance de los materiales sobrantes de las excavaciones que deben ser dispuestos en los sitios de depósito.

Luego de la evaluación del riesgo de las diversas estructuras de la vía, tomamos la decisión de modificar la configuración de los puentes con el fin de que no se intervengan los cauces de las quebradas que cruza y disminuir el riesgo frente a eventos de remoción de masa, deslizamientos, avenidas torrenciales y avalanchas; así pues cada puente quedó con una configuración especial donde priman los viaductos con grandes luces y apoyos en zonas de riesgo bajo. Así mismo para aquellos apoyos que inevitablemente presentaron evaluación de riesgo medio o alto, se proponen las respectivas obras de protección y refuerzo.

##### *3.2.2.2.3.2 Vía de acceso oriental*

Los sitios de corte de importancia dentro de este tramo están ubicados entre las abscisas km 18+517 y km 19+125, y están conformados en su mayoría por suelos residuales de anfibolita constituidos por limoarcillosos y limoarenosos con humedades promedio de 40%, límites líquidos de 57 %, e índices de plasticidad de 12%. Adicionalmente existe un pequeño porcentaje de estos taludes en los cuales los cortes no se realizarán sobre suelos residuales sino que serán sobre roca fracturada y meteorizada.

#### 3.2.2.2.4 Sectorización geotécnica del corredor vial

##### *3.2.2.2.4.1 Vía de acceso occidental*

Considerando aspectos como geomorfología, perfiles de meteorización, características de los suelos, condiciones de drenaje, cobertura vegetal, usos del suelo, procesos erosivos y estabilidad de las laderas, el corredor del acceso occidental de la vía fue dividido en cuatro sectores homogéneos, los cuales se describen a continuación.

**Sector 1, km 6+000 a km 7+150.** El comienzo de este sector está a la salida del túnel El Seminario, y finaliza en un carreteable destinado para la explotación de madera localizado en la parte alta del barrio Los Caunces.

Los terrenos cruzados por el alineamiento están constituidos en su mayoría por el gabro de San Diego. Se encuentran espesores de suelo residual variando entre 3 m y 12 m clasificados como suelos limoarenosos y arenolimosos. En varias zonas se encuentra el saprolito a poca profundidad, presentando espesores hasta de 15 m. No se observan afloramientos de la roca en la zona de influencia de la vía. Además, se presentan depósitos de vertiente del tipo flujo que cubren parcialmente el paleorelieve modelado sobre los suelos presentes, dentro de los que se destacan los localizados discontinuamente en la quebrada Los Caunces.

La inclinación de la ladera varía entre 5° y 25°, clasificándose como una topografía que va desde plana a ondulada, lo que favorece en algunos sitios la formación de pequeños empozamientos de agua. La vegetación predominante se compone de maleza con presencia de algunos arbustos, y a partir de la abscisa km 6+100 por bosques de pinos.

Se encuentran cauces medianamente profundos, sin aguas permanentes y con el lecho cubierto por vegetación. Como cruce importantes se cuenta la quebradas Los Caunces (km 6+930). Entre la quebrada Los Caunces y Cuchillón a unos 200 m ladera arriba desde la vía occidental proyectada se encuentra una zona de inestabilidad en reptación que ha sido tratada con trinchos y algunos drenajes por el Municipio de Medellín.

Considerando que la altura de los cortes para la conformación de la vía es inferior a 10 m, se espera que el material excavado en este tramo estará compuesto en un 90% por material común y un 10% por roca.

**Sector 2, km 7+150 a km 7+680.** Este sector inicia en un carreteable destinado para la explotación de madera en la parte alta del barrio Los Caunces y termina en el Seminario Redemptoris Mater.

Los terrenos atravesados por la vía en este sector pertenecen a la zona de cabalgamiento con intrusiones del Stock de San Diego al comienzo de este sector. Localmente se encuentran depósitos de vertiente cubriendo la ladera, siendo el más significativo de estos el localizado entre las abscisas km 7+100 y km 7+600 donde se observa una alta humedad manifestada por numerosos arroyos corriendo por cauces poco definidos. Esta característica es favorecida por la irregularidad del terreno que dificulta el rápido drenaje de la ladera.

Los suelos residuales se clasifican como limoarenosos, limoarcillosos y arcillolimosos, presentando espesores variables hasta 8 m. El saprolito se encuentra a poca profundidad y puede alcanzar un espesor hasta de 25 m.

La inclinación del terreno varía entre 15° y 45°, y se clasifica entre moderada y empinada. La ladera tiene apariencia estable; sin embargo, se observan algunas cicatrices posiblemente de tipo erosivo. También se encuentra socavación de orillas, pequeños desprendimientos y cárcavas. La vegetación es abundante y se compone principalmente de maleza y de árboles destinados a la explotación maderera.

Se encuentran cauces medianamente profundos, sin aguas permanentes y con el lecho cubierto por vegetación. Como cruce importante se cuentan la quebrada La Pastora (km 7+595).

Considerando la altura de los cortes para la conformación de la vía, se espera que el material excavado en este tramo estará en una proporción roca - material común de 15% - 85%.

**Sector 3, km 7+680 a km 9+200.** Este sector está comprendido entre el seminario Arquidiocesano, cerca de la quebrada La Pastora, y termina en el costado derecho de la quebrada La Espadera.

Los terrenos cruzados por el alineamiento están en su totalidad dentro de la zona de cabalgamiento, y presentan depósitos de vertiente localizados de menor extensión con respecto a los descritos en tramos anteriores, medidos en el sentido del alineamiento. Estos depósitos se clasifican como coluviones y flujos, siendo la mayoría de estos últimos de poco espesor.

Igualmente, el perfil de meteorización no está tan desarrollado como en los primeros sectores. El horizonte correspondiente al suelo residual tiene un espesor inferior a cinco metros, y se clasifican principalmente como limoarenosos y limoarcilosos. En general, el espesor del saprolito es inferior a 15 m y se clasifica principalmente como un suelo limoarenoso y arenolimoso. .

Entre las abscisas km 7+850 y km 8+405 se observa gran cantidad de bloques en superficie, la pendiente en este tramo varía entre 20º y 30º, clasificándose como moderada. La continuidad se interrumpe por los cauces de las quebradas Chupadero (km 8+175) y Mediagua (km 8+405), los cuales corresponden a cauces profundos, de alta pendiente longitudinal y con caudales pequeños pero permanentes. En este tramo predominan los bosques de pinos para la explotación maderera.

La pendiente de la ladera aumenta considerablemente a partir de la abscisa km 8+500, variando entre 30º y 45º donde es clasificada como empinada. Existen numerosas cicatrices de movimientos anteriores poco profundos en su mayoría, asociados a la alta pendiente de la ladera; sin embargo, éstos ya se encuentran estabilizados. La vegetación se compone de maleza y bosques destinados a la explotación maderera. El cauce más importante pertenece a la quebrada La Espadera (km 9+195), la cual tiene un caudal alto. En el costado izquierdo de esta quebrada se encuentra un coluvión con una alta concentración de humedad limitado por escarpes afectados ligeramente por procesos erosivos del tipo cárcavas.

Considerando la altura de los cortes para la conformación de la vía, se espera que el material excavado en este tramo estará en una proporción roca - material común de 35% - 65%.

**Sector 4, km 9+200 a km 10+360 (Portal Occidental).** Este sector se localiza en la parte alta de la ladera de la vía a Santa Elena, entre las quebradas La Espadera y La Aguadita.

El alineamiento transcurre por la zona de cabalgamiento, en terrenos escarpados (inclinaciones entre 40º y 60º) donde es mínimo el desarrollo de suelo. El espesor de suelo residual no supera los 8 m y es común ver frentes de roca que va de moderadamente meteorizada a roca sana

presentando discontinuidades bastante abiertas lo que ha generado la caída de los bloques observados en superficie.

La humedad de la ladera es mínima debido al alto declive y al drenaje natural compuesto por caños, que aunque son poco profundos, son numerosos. Existen pocas zonas que presentan inestabilidades, éstas poseen dimensiones mínimas y muy superficiales, y están asociadas principalmente a la tala de los árboles, la fuerte pendiente y al fracturamiento de la roca.

La vegetación se compone básicamente por bosques de pinos destinados a la explotación maderera.

Las corrientes de agua más importantes encontradas en el acceso occidental de la vía se encuentran en este sector, y son las quebradas La Bocana (km 10+050) y La Aguadita (km 10+260), todas ellas con caudales altos.

Considerando la altura de los cortes para la conformación de la vía, se espera que el material excavado en este tramo estará en una proporción roca - material común de 85% - 15%.

Toda esta información geotécnica de la vía occidental a cielo abierto se encuentra detalladamente en el informe de INTEINSA I-2284-TO-10-Rev1 que hace parte integral del complemento de estos estudios.

#### *3.2.2.2.4.2 Vía de acceso oriental*

En esta vía de acceso desde el punto de vista geotécnico se identifica un solo sector. Esta zona se caracteriza por presentar un relieve de vertientes moderadas a suaves, con declives entre 10º y 30º, constituido por suelos residuales y roca meteorizada provenientes de la Anfibolita de Medellín y del Batolito Antioqueño. Los suelos pueden alcanzar espesores hasta de 20 m y están conformados por materiales limo arenosos y limo arcillosos en los cuales no se evidencian procesos de inestabilidad.

Hacia el inicio de este sector se concentran los cortes más altos, los cuales pueden alcanzar alturas hasta de 30 m, luego a partir del km 19+161, se localizará un viaducto en la zona de la glorieta de Sajonia y luego el empalme con la carretera actual donde los cortes se reducen al mínimo.

Considerando la altura de los cortes para la conformación de la vía, se espera que el material excavado en este tramo esté compuesto en un 80% por material de suelo y un 20% por roca.

##### *3.2.2.2.4.2.1 Evaluación de estabilidad, inclinación y tratamiento de taludes*

El objetivo fundamental del análisis de estabilidad realizado fue dimensionar desde el punto de vista de inclinaciones y bermas, los taludes de corte de la vía. Para esto se dividieron los taludes en dos grupos de acuerdo al comportamiento y los tipos de falla generados, los conformados en suelo y los compuestos por roca.

El análisis de estabilidad se realizó por medio del programa SLIDE (Anexo 3-2-Referencia 4.25), el cual empleando el método básico de las dovelas y el equilibrio de fuerzas mediante las consideraciones del método propuesto por Bishop, establece las superficies potenciales de falla del terreno. Se realizaron análisis estáticos y seudoestáticos de las secciones de la vía donde se encontraron los cortes mayores en cada uno de los sectores homogéneos desde el punto de vista geotécnico. Las inclinaciones recomendadas se definieron buscando que los factores de seguridad

calculados fueran iguales o superiores a 1,3 para un análisis estático y fueran iguales o superiores a 1,0 para un caso seudoestático. Para definir la geometría de los taludes rocosos, se consideraron los perfiles de meteorización y las características y disposición de las discontinuidades presentes en el macizo.

Con respecto a los terraplenes, sólo se hacen recomendaciones, para definir su pendiente en función de la altura, puesto que en estas vías se encuentran en muy poca cantidad y de muy poca altura. Es importante señalar que los materiales empleados para conformar los llenos deben cumplir con la normatividad INVIAS 2007, la fundación deberá presentar buenas condiciones de apoyo y se deberán seguir los métodos constructivos exigidos por la misma normatividad. Las inclinaciones recomendadas para los terraplenes bajo condiciones normales son los siguientes:

Tabla 3-41 Inclinaciones recomendadas para los terraplenes

| Altura de terraplenes (m) | Talud recomendado |
|---|---|
| 0 - 5 | 1,5H : 1,0V |
| 5 - 10 | 2,0H : 1,0V |
| 10 - 15 | 2,5H : 1,0V |

Los taludes en suelo a su vez fueron divididos en dos grupos, taludes en suelo residual y cortes en depósitos de vertiente. En general, se buscó que los taludes en estos materiales tuvieran inclinaciones 0,75H y 1,0 H : 1,0V; para los cortes de mayor altura se consideró la conformación de bermas, ubicadas en la transición suelo roca(Horizonte IC-IIA).

En los depósitos de vertiente se consideró que el comportamiento mecánico era determinado por las propiedades de la matriz ya que mantienen una proporción mayor haciendo que los fragmentos de roca no entren en contacto entre sí. Por las condiciones de compacidad suelta observadas en los depósitos de vertiente, se consideraron parámetros de resistencia bajos en los análisis de estabilidad, comparados con los empleados para el suelo residual y el saprolito.

Los taludes de corte recomendados pueden variarse dependiendo de las características de los materiales encontrados durante las excavaciones. Cuando el espesor de suelo o depósitos de vertiente y en general, materiales con bajas condiciones de estabilidad sean menores a los estimados, se localizarán bermas intermedias en la transición con los estratos más competentes, con la posibilidad de variar las pendientes de los taludes inferiores dependiendo de la calidad del material subyacente y así reducir los volúmenes de excavación. Al hacer esto, el ancho de la berma deberá ajustarse para llegar al borde interno de la banca de la vía. Este procedimiento se seguirá indicando más adelante como el concepto de la berma móvil.

Las inclinaciones de los taludes recomendados en el último sector, en roca son de 0,25H:1,0V con el refuerzo y recubrimientos requeridos, y en el estrato superficial de suelo en este sector, con inclinaciones 1,0H:1,0V con el tratamiento indicado más adelante. En este sentido se debe mencionar que es recomendable la conformación de una berma en la transición suelo –roca (IC-IIA), cuya posición varía fuertemente en el sentido horizontal, por lo que ésta se debe escalonar en tramos de longitud construible por la maquinaria y que se permita captar el agua, disipar su velocidad (entre niveles) y entregarla adecuadamente a la base del talud. Lo que se pretende es realizar bermas a diferentes alturas desde la base del talud para garantizar siempre que queden en el horizonte IC-IIA y no a una altura constante desde la pata del talud ya que en algunos tramos la berma quedaría en el suelo, y esto desfavorece las condiciones de estabilidad del talud.

## 3.2.3 Suelos

### 3.2.3.1 Fisiografía

Para el área de influencia del proyecto se establecieron las siguientes categorías fisiográficas, considerando la escala del estudio: Provincia fisiográfica, Región Climática, Unidad Climática, Gran Paisaje y Paisaje[7].

#### 3.2.3.1.1 Provincia fisiográfica

Corresponde a una región natural en la que se pueden presentar una o más unidades climáticas, en el área de estudio se localiza la provincia fisiográfica Flanco occidental de la Cordillera Central. (Hermelin Arbaux, 2003).

#### 3.2.3.1.2 Región climática

Terrenos cuya temperatura anual promedio y condiciones de humedad, son lo suficientemente homogéneas como para reflejarse en una geogénesis particular y por consiguientes, en su cobertura vegetal.

Corresponde a los pisos térmicos altitudinales basados en la altura sobre el nivel del mar y la temperatura media anual.

#### 3.2.3.1.3 Unidad climática

Asociada a la región climática, se define la Provincia climática que se determina por la disponibilidad de humedad de acuerdo con el método de Lang donde:

$$IH = \frac{Precipitación\ Promedio\ Anual}{Temperatura\ Promedio\ Anual}$$

Si Ih varía de 0 a 60, se considera la provincia climática como seca y si es mayor de 60, lluviosa.

Según la estación pluviométrica de la vereda Mazo la precipitación promedio anual es de 1855 mm y la temperatura promedio anual según POMCA de la quebrada Santa Elena es de 14,5°C, por tanto el Ih es de 127 y se ubica en la región climatológica media asociada a la unidad climática lluviosa

#### 3.2.3.1.4 Gran Paisaje

Corresponde a la unidad genética de relieve o ambiente morfogenético, que, de acuerdo con la estructura de este sistema de clasificación fisiográfica, debe estar cubierta jerárquicamente por una unidad climática.

El gran paisaje comprende complejos de paisajes con relaciones de afinidad de tipo climático, geogenético, litológico y topográfico (Villota, 1997).

La zona del proyecto se encuentra en la transición entre el Valle del Valle de Aburrá y el Altiplano del oriente Antioqueño.

[7] Serrato Álvarez, 2009

#### 3.2.3.1.5 Paisaje fisiográfico

Es la unidad fisiográfica fundamental de los levantamientos semidetallados, en este nivel se definen las clases de suelos, con características y propiedades comunes cada una de estas unidades se determinan en las asociaciones de los suelos.

Tabla 3-42 - Categorías fisiográficas del área de estudio

| Provincia Fisiográfica | Región Climática | Provincia Climática | Gran Paisaje | Paisaje o unidad de suelos |
|---|---|---|---|---|
| Flaco occidental de la cordillera central | Media | Iluviosa | Altiplano | Asociación Guadua |
| | | | | Asociación Rionegro |
| | Media | Iluviosa | Montañoso | Asociación Tequendamita |
| | | | | Asociación Niquia |

Fuente: Consorcio Siga-Plyma

#### 3.2.3.1.6 Asociaciones

Las asociaciones se consideraron como unidades de mapeo básicas para la caracterización de los suelos del área de estudio. En ellas se incluyen dos o más clases de suelos, correspondientes a diferentes unidades taxonómicas.

Se delimitaron inicialmente sobre cartografía de acuerdo con la información del Estudio de Suelos del Departamento de Antioquia (IGAC, 2007) y sus límites se ajustaron posteriormente a la escala de estudio con la información obtenida en los recorridos de campo y en la consignada en los estudios de impacto ambiental 2000, 2009 y su complemento en el 2012.

### 3.2.3.2 Área de Influencia Directa Puntual

A continuación se presentan las los suelos del área de influencia directa puntual con sus respectivas áreas en cada una de las obras:

Tabla 3-43 - Unidades de suelos en el área de influencia directa puntual

| SIMB_SUELO | Unidad de Suelos | Obra | Área ($m^2$) | Porcentaje |
|---|---|---|---|---|
| RNa | Asociación Rionegro | Vía acceso oriental | 8770,3 | 1% |
| NQf3 | Asociación Niquía | Vía a cielo abierto occidental, Portal Sur, Norte Túnel Seminario y Zona de depósito | 573419,6 | 75% |
| TEe2 | Asociación Tequendamita | Portal oriental Túnel Santa Elena, vía acceso oriental | 106555,7 | 14% |
| TEf1 | Asociación Tequendamita | Portal occidental túnel de Santa Elena | 66527,5 | 9% |
| 2308 | Municipio de Medellín | Intercambio Baltimore | 4432,6 | 1% |
| TOTAL | | | 759705,8 | 100% |

Fuente: Consorcio Siga-Plyma

#### 3.2.3.2.1 Asociación Rionegro (RN).

Está localizada en la Cordillera Central en los Municipios de Rionegro, La Ceja, El Retiro, Marinilla, El Carmen de Viboral, San Pedro de los Milagros y la parte alta Bello, entre los 2000 y 2500 msnm. El clima es frío tropical húmedo y corresponde a la zona de vida Bosque Húmedo Montano Bajo (bh-MB).Tiene una extensión total de 13.396,84 hectáreas que representan el 0.21% del área total del Departamento de Antioquia.

Lo suelos están fisiográficamente localizados sobre diferentes niveles de terrazas y en abanicos-terrazas, por el cambio de dirección de las corrientes y excavación de los cauces. El relieve varía entre inclinado y plano en las cimas, y fuertemente inclinado a escarpado en los taludes; las pendientes son generalmente cortas, rectas y ligeramente convexas. En el área del proyecto varían entre el 3% y el 7%.

Los suelos se han desarrollado a partir de aluviones heterogéneos y heterométricos y de cenizas volcánicas. Son moderadamente profundos a profundos, limitados por el nivel freático y ligera toxicidad de las plantas por aluminio. Las obras del proyecto que se encuentran en esta unidad no se evidencia erosión.

En el área comprendida por el proyecto se encuentran dos fases por pendiente símbolos del IGAC: RNa (0-3%) y RNb (3-7%).

La asociación la forman los suelos Hidric Fulvudands (40%), Typic Fulvudands (35%), como inclusiones se encuentran los suelos: Hidric Melanudands (10%), Pachic Melanudands (10%) y Typic Placuadands (5%).

Suelos profundos, drenaje natural imperfecto a moderado, texturas medias a moderadamente gruesas, reacción muy fuerte a fuertemente ácida, fertilidad baja a moderada. Erosión ligera.

Los suelos ácidos con altas concentraciones de aluminio disponible, se presentan en los lugares donde han existido cultivos pesados o se ha requerido el uso de fertilizantes de nitrógeno. Como es el caso del sector oriental del proyecto, en donde se encuentran en la vereda La Convención del Rionegro. La toxicidad del aluminio es considerada como una de las principales causas de improductividad o de la limitación de cultivos en suelos ácidos[8].

#### 3.2.3.2.2 Asociación Niquía (NQ).

Está asociación presenta poca área en el Departamento de Antioquia, la mayoría de los suelos se encuentran en sectores de la Cordillera Central, al oriente de los Municipios de Medellín, Bello, Envigado, Itagüí, Sabaneta y al occidente del Retiro, en clima templado y húmedo, correspondiente a la zona de vida de bosque húmedo premontano (bh-PM), en alturas entre 1200 y 2000 msnm. La unidad tiene una extensión de 11.558,54 hectáreas que representan el 0,18% del área total del Departamento de Antioquia.

Los suelos están ubicados fisiográficamente, en las vertientes o laderas de la cordillera, con pequeños coluvios que no son mapeables. El relieve es fuertemente inclinado a muy escarpado; pendientes largas y cortas, rectas, ligeramente convexas, mayores del 50% en el área del proyecto.

Esta Asociación se presenta en la vía a cielo abierto occidental, los portales norte y sur del túnel del seminario y la zona de depósito, su símbolo según el IGAC es (NQ f3).

[8] SAG, 2013

Son suelos derivados de rocas ultrabásicas y serpentinitas, con cenizas volcánicas en las partes más altas; profundos y bien drenados. Presentan erosión por escurrimiento difuso, pequeñas cárcavas y movimientos en masa localizados.

La asociación Niquía está conformada por los suelos Typic Dystrudepts (A224) con una participación del 50%, el Typic Udorthents (A225) con el 30% y el Typic Fulvudands (A226) con el 20%.

Suelos profundos, bien drenados, texturas finas a medias, erosión ligera a severa, fertilidad muy baja a moderada.

#### 3.2.3.2.3 Asociación Tequendamita (TE).

Se localiza en la Cordillera Central, principalmente en las subregiones de Oriente, Valle de Aburrá y Norte; en la subregión del Oriente Antioqueño, en los Municipios de la Ceja, El Retiro, Abejorral, La Unión, Carmen de Viboral, Sonsón y Guarne; entre los 2000 y 3000 msnm. El clima es frío tropical húmedo y muy húmedo, corresponde a las zonas de vida Bosque Húmedo Montano Bajo (bh-MB) y Bosque muy Húmedo Montano Bajo (bmh-MB).

Los suelos ocupan posiciones geomorfológicas de vertientes y cimas de cordilleras, que en algunos sitios tienen forma colinada y pequeños coluvios no mapeables. El relieve va de ligeramente ondulado a ondulado en las partes altas y en las depresiones, y fuertemente inclinado a muy escarpado en las vertientes; las pendientes son generalmente largas, rectas, convexas. En el área del proyecto se presentan pendientes entre el 12 % y el 50%; en algunos sectores supera el 50 %. Estos suelos se encuentran en ambos portales del túnel de Santa Elena.

Son suelos desarrollados a partir de depósitos de cenizas volcánicas sobre roca metamórfica, esquistos y neiss; profundos a moderadamente profundos, limitados por nivel freático, gravilla, piedras, afloramientos rocosos y ligera toxicidad por aluminio; bien a moderadamente drenados en las laderas y con drenaje imperfecto en las depresiones; presentan erosión por escurrimiento difuso, surcos, patas de vaca y movimientos en masa localizados. El grado de erosión en el área del proyecto varía entre ligero y moderado.

En el proyecto Conexión Vial Aburrá-Oriente y sus vías complementarias se encuentra la Asociación con las siguientes fases: Ted2, TEe2, TEf1 y TEf2.

Forman la asociación los suelos Typic Hapludands, 35%; Typic Fulvudands 25%, Hydric Fulvudands, 20%. Hay inclusiones de Andic Dystrudepts, Typic Placudands, Typic Dystrudepts y Thaptic Hapludands en igual proporción del 5%.

Suelos profundo a moderadamente profundos, bien drenados, texturas medias, reacción muy fuerte a fuertemente ácida, fertilidad baja a moderada, erosión ligera a moderada.

### 3.2.3.3 Áreas de influencia Directa Local

En la Tabla 3-44, se presentan las unidades de los suelos del área de Influencia directa local y la vereda en la que se encuentran; las descripciones fueron descritas en el área de influencia directa puntual.

Tabla 3-44 - Unidades de suelos en el área de influencia directa local

| SIMB_SUE | Unidad de suelos | Vereda | Techo | Área (Ha) | % |
|---|---|---|---|---|---|

| SIMB_SUE | Unidad de suelos | Vereda | Techo | Área (Ha) | % |
|---|---|---|---|---|---|
| 2308 | Suelo urbano | Corregimiento de Santa Elena | Techo Túnel Santa Elena | 4,5 | 0% |
| RNa | Asociación Rionegro | Yarumal | Techo Túnel Santa Elena | 4,0 | 0% |
| NQf3 | Asociación Niquía | Las Palmas | Techo Túnel Seminario | 90,2 | 5% |
| TEb | Asociación Tequendamita | El Plan | Techo Túnel Santa Elena | 100,1 | 5% |
| TEd2 | Asociación Tequendamita | El Placer | Techo Túnel Santa Elena | 633,5 | 33% |
| TEe2 | Asociación Tequendamita | Yarumal | Techo Túnel Santa Elena | 148,5 | 8% |
| TEe2 | Asociación Tequendamita | El Llano | Techo Túnel Santa Elena | 21,4 | 1% |
| TEe2 | Asociación Tequendamita | San Ignacio | Techo Túnel Santa Elena | 240,7 | 13% |
| TEf1 | Asociación Tequendamita | Media Luna | Techo Túnel Santa Elena | 111,2 | 6% |
| TEf2 | Asociación Tequendamita | La Quiebra | Techo Túnel Santa Elena | 531,6 | 28% |
| 2308 | Suelo Urbano | Municipio de Medellín | Techo Túnel Seminario | 16,5 | 1% |
| TOTAL | | | | 1902,3 | 100% |

Fuente: Consorcio Siga-Plyma

### 3.2.3.4 Área de influencia Indirecta

En la Tabla 3-45, se presentan los porcentajes y las áreas de la ocupación de las unidades de suelos en el área de influencia indirecta.

Tabla 3-45 - Unidades de suelos en el área de influencia indirecta

| SIMB_SUE | Asociación | Vereda | Area (Ha) | Porcentaje del área |
|---|---|---|---|---|
| 2308 | Suelo Urbano | Corregimiento de Santa Elena | 4,5 | 0% |
| GDd1 | Asociación Guadua | Playa Rica - Ranchería | 86,6 | 1% |
| GDd1 | Asociación Guadua | La Convención | 89,7 | 2% |
| NQf3 | Asociación Niquía | Piedras Blancas | 88,7 | 1% |
| RNa | Asociación Rionegro | La Convención, Playa Rica- Ranchería | 165,0 | 3% |
| RNb | Asociación Rionegro | Playa Rica - Ranchería | 75,0 | 1% |
| NQf3 | Asociación Niquía | Las Palmas | 629,3 | 11% |
| TEb | Asociación Tequendamita | El Plan | 483,7 | 8% |
| TEd1 | Asociación Tequendamita | El Plan | 45,4 | 1% |
| TEd1 | Asociación Tequendamita | Piedras Blancas | 12,0 | 0% |
| TEd2 | Asociación Tequendamita | Santa Elena, El Placer, El Llano El Cerro | 871,1 | 15% |
| TEe2 | Asociación Tequendamita | Yarumal | 431,9 | 7% |
| TEe2 | Asociación Tequendamita | El Llano | 21,4 | 0% |
| TEe2 | Asociación Tequendamita | San Ignacio | 658,8 | 11% |
| TEf1 | Asociación Tequendamita | Media Luna | 764,3 | 13% |
| TEf2 | Asociación Tequendamita | La Quiebra | 908,8 | 15% |
| 2308 | Suelo urbano | Municipio de Medellín | 631,5 | 11% |
| TOTAL | | | 5967,5 | 100% |

Fuente: Consorcio Siga-Plyma

A continuación se describe la unidad de suelo que hace parte del área de influencia indirecta.

#### 3.2.3.4.1 Asociación Guadua (GD).

Se localiza en la Cordillera Central entre los 2000 y 2500 msnm. El clima es frío tropical húmedo y la zona de vida Bosque Húmedo Montano Bajo (bh-MB). Tiene una extensión total de 118.934,18 hectáreas que representan el 1.88% del área total del Departamento de Antioquia.

Geomorfológicamente ocupa posiciones de colinas disectadas, a veces masivas, con relieve fuertemente ondulado a muy escarpado, en algunas ocasiones ligeramente ondulado con cimas redondeadas y agudas; pendientes generalmente cortas, convexas, cóncavas en las partes inferiores. Las pendientes varían entre el 12% y el 50%.

Los suelos se desarrollaron de cenizas volcánicas y de rocas ígneas (cuarzodioritas). Son profundos a moderadamente profundos, limitados por factores como gravillas, nivel freático y ligera toxicidad por aluminio (esto ocurre en los cultivos agrícolas debido a sus necesidades de disponibilidad de nutrientes y pH neutros). Moderados a bien drenados, con drenaje imperfecto en las áreas más planas; en época de verano aparecen grietas angostas en la superficie.

En el sector oriental del proyecto se encuentra la Asociación con fase por pendiente y por erosión: GDd1, código de la clasificación de unidades del IGAC, 2007.

Se presenta erosión por escurrimiento difuso, terracetas y patas de vaca, además de pequeños movimientos en masa localizados. En el área del proyecto la erosión varía entre ligera y moderada.

Forman la asociación los suelos Typic Hapludans (30%), Typic Fulvudands (25%), Hydric Hapludands ( 25%). Las inclusiones están representadas por los suelos Typic Dystrudepts (10%), Hidric Melanudands (5%) y Typic Placudands (5%).

La fertilidad en los conjuntos varía de baja a muy baja, reacción ligera a muy fuertemente ácida, capacidad de intercambio catiónico muy alta a muy baja; bases totales bajas a muy bajas, saturación de media a muy baja; fósforo bajo; el carbón orgánico decrece regularmente de muy alto a muy bajo y tienen concentraciones de aluminio relativamente altas.

Los suelos ácidos con altas concentraciones de aluminio disponible, se presentan, en los lugares donde han existido cultivos pesados o se ha requerido el uso de fertilizantes de nitrógeno, la toxicidad del aluminio es considerada como una de las principales causas de improductividad o de la limitación de cultivos en suelos ácidos.

En la siguiente figura se presentan las fases por asociación en la zona de influencia del proyecto (ver Anexo 3-16 - Plano AO_EA_LB_001).

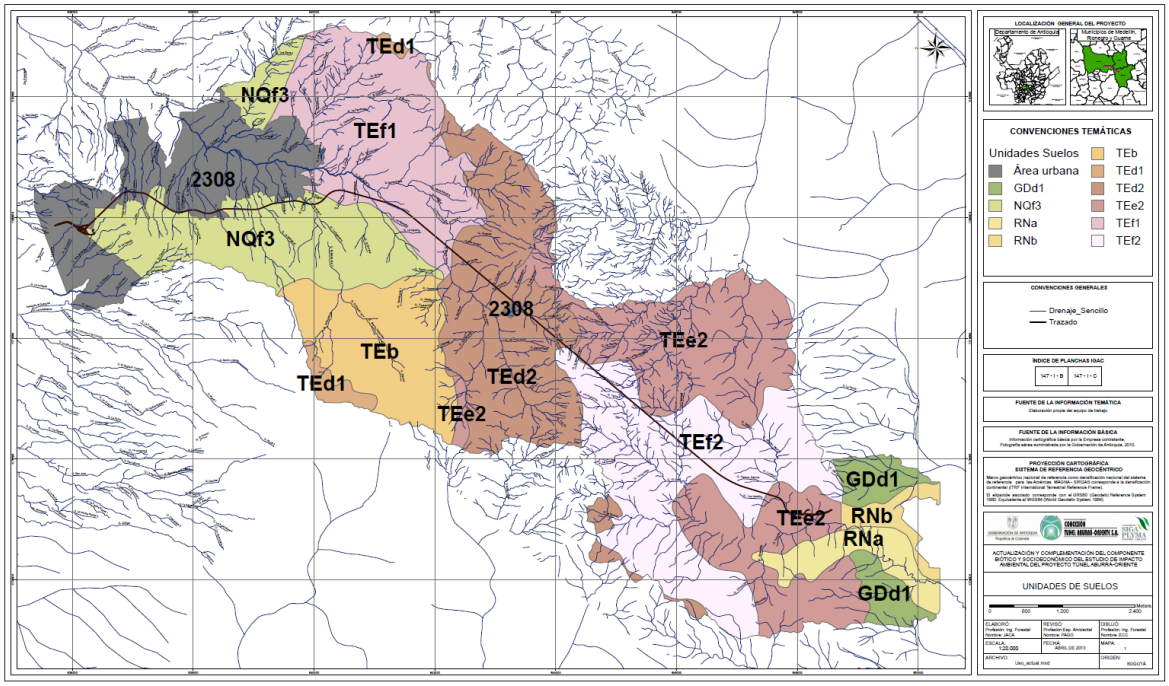



Figura 3-7 Mapa de unidades o asociaciones de suelos en el área de estudio

### 3.2.3.5 Usos del suelo y coberturas vegetales

En la tabla que se muestra a continuación se presentan los usos del suelo y la cobertura vegetal asociada a éstos. Para determinarlos se trabajó con imágenes aéreas del 2010 propiedad de la Gobernación de Antioquia y ajustes con recorridos de campo en el área de influencia directa.

Del análisis de coberturas vegetales se determinaron los siguientes usos para el área de influencia del proyecto (las coberturas vegetales son detalladas en el ítem de ecosistemas terrestres).

Tabla 3-46- Uso del suelo y coberturas vegetales en el área de estudio

| Uso del suelo | Cobertura asociada | Descripción |
|---|---|---|
| Agropecuario | • Pastos limpios.<br>• Cultivos transitorios<br>• Cultivos .permanentes.<br>• Mosaico de pastos y cultivos | Mosaico de pastos y cultivos utilizados para los movimientos comerciales y tradicionales |
| Bosque Protector | • Bosques fragmentados.<br>• vegetación secundaria baja | Se encuentran dispersos en la zona asociados a las márgenes de las quebradas. |
| Plantación Forestal | • Plantaciones forestales | Asociado a predios con fines comerciales. |
| Explotación de Materiales | • Suelos desnudos o degradados | Actividad extractiva para materiales de construcción |
| Urbano rural | • Espacio público<br>• Residencial | Estos suelos se encuentran asociados al centro poblado de Santa Elena, a la infraestructura vial, y a los poblados |

| Uso del suelo | Cobertura asociada | Descripción |
|---|---|---|
| | | del sector Sajonia y las veredas San Ignacio, y El Plan |

Fuente: Consorcio Siga-Plyma

En el uso ***Agropecuario*** se agrupan pastos que se establecen para el sostenimiento de ganadería extensiva, incluso en áreas con pendientes fuertes que son vulnerables a procesos erosivos y movimientos en masa; cultivos comerciales y tradicionales como papa, maíz, frijol, tomate de árbol, etc, se presenta en mediana escala. En esta categoría también se incluyen los mosaicos de pastos con espacios naturales, que se describen en coberturas vegetales. Son áreas en que los pastos se combinan con relictos de arbustos o matorrales.

Como uso ***Bosque Protector*** se consideraron los bosques fragmentados y la vegetación secundaria baja, que se encuentran dispersos en la zona de estudio y están asociados a las márgenes de las quebradas.

El uso ***Plantación forestal*** está representado principalmente por plantaciones forestales de pino, ciprés, eucalipto, las cuales se desarrollan en diferentes predios, con fines de aprovechamiento y de esparcimiento.

El uso ***Explotación de Materiales*** corresponde principalmente a la actividad extractiva de material para construcción, las cuales se encuentra en la parte alta de Santa Elena (vereda El Cerro) y en Rionegro (vereda La Quiebra y Yarumal).

El uso ***Urbano Rural*** se encuentra principalmente en la parte baja y alta de la cuenca de la quebrada Santa Elena y en las márgenes de las carreteras.

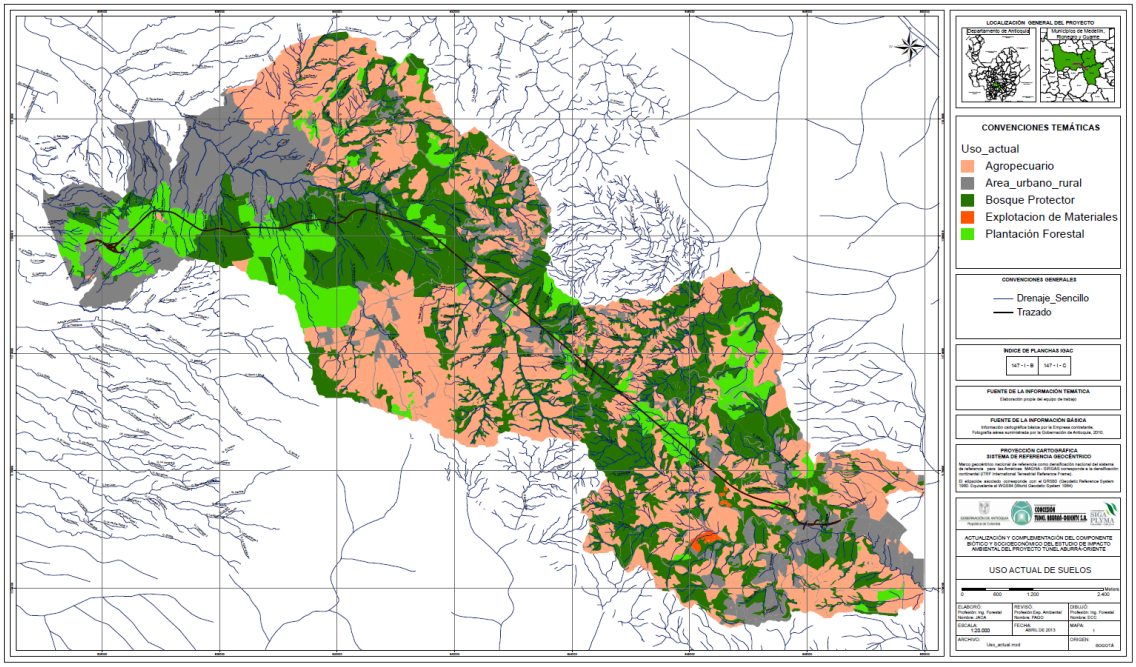



Figura 3-8 - Usos del Suelo

### 3.2.3.6 Uso potencial de suelo

La clasificación de uso del suelo se basa en las propiedades fisicoquímicas del suelo y las características climáticas, especialmente las relacionadas con precipitación. El proceso de evaluación de los suelos se ha realizado siguiendo la "Clasificación de la Capacidad Agrológica de los Suelos" (USDA, 1961), que está basada en varios sistemas de explotación en orden decreciente de intensidad. Estos sistemas son los siguientes:

1. Laboreo continuado.
2. Laboreo ocasional.
3. Pastos.
4. Bosques.
5. Reserva Natural (no aprovechable ni agrícola ni forestalmente).

Los suelos se clasifican en ocho clases agrológicas con limitaciones de utilización crecientes desde la I (la mejor) a la VII (la peor). C, para el área de influencia del proyecto (directa e indirecta) se encuentran las siguientes clases: En la Tabla 3-47, se presentan los usos potenciales por clase agrológica y la descripción de cada una de estas.

Tabla 3-47- Usos potenciales por clase agrológica

| Clase | Descripción de la clase agrológica | subclase | Usos potenciales |
|---|---|---|---|
| II | Esta clase la integran suelos sujetos a limitaciones moderadas en el uso. Presentan un peligro limitado de deterioro. Son suelos buenos. Pueden cultivarse mediante labores adecuadas, de fácil aplicación, presentan pendiente suave, están sujetos a erosión moderada, su profundidad es mediana, pueden inundarse ocasionalmente y pueden necesitar drenaje. Los suelos | 2s-10 | Agricultura con cultivos de clima frío como papa, maíz, fríjol, arracacha, ahuyama y hortalizas; ganadería |

| Clase | Descripción de la clase agrológica | subclase | Usos potenciales |
|---|---|---|---|
| | pueden necesitar prácticas comunes, como cultivo a nivel, fajas, rotaciones encaminadas a la conservación de los mismos, mecanismos de control del agua o métodos de labranza peculiares. Con frecuencia requieren una combinación de estas prácticas. (USDA, 1961). Esta clase se encuentra en las veredas El Plan del municipio de Medellín y los suelos aledaños a la quebrada La Yarumal. | | |
| IV | Suelos con limitaciones permanentes y severas para el cultivo. Son suelos malos. Pueden cultivarse ocasionalmente si se les trata con gran cuidado. Generalmente deben limitarse a cultivos herbáceos. Los suelos de esta clase presentan características desfavorables. Con frecuencia se hallan en pendientes fuertes sometidos a erosión intensa. Su adecuación para el cultivo es muy limitada. Generalmente deben ser dedicados a heno o a pastos, aunque puede obtenerse de ellos una cosecha de grano cada cinco o seis años. En otros casos puede tratarse de suelos someros o moderadamente profundos, de fertilidad baja, o localizados en pendientes (USDA, 1961). Esta clase se encuentra en las veredas El Cerro, El Llano y Santa Elena Central, El Placer y la parte alta de Media Luna del municipio de Medellín, la parte baja la vereda Yarumal y la parte baja de la vereda La Quiebra del municipio de Rionegro. | 4p-10 | Agricultura con cultivos limpios, semilipios y densos, ganadería, sistemas agroforestales |
| | | 4pe-10 | Agricultura con algunos cultivos semilimpios, densos semibosques poco exigentes |
| | | | |
| VI | Los suelos de esta clase deben emplearse para el pastoreo o la silvicultura y su uso entraña riesgos moderados. Se hallan sujetos a limitaciones permanentes, pero moderadas, y no son adecuados para el cultivo. Su pendiente es fuerte, o son muy someros. No se debe permitir que el pastoreo destruya su cubierta vegetal. La tierra de la clase VI es capaz de producir forraje o madera cuando se administra correctamente. Si se destruye la cubierta vegetal, el uso del suelo debe restringirse hasta que dicha cubierta se regenere. (USDA, 1961). Esta clase se encuentra en la vereda San Ignacio del municipio de Guarne, la parte alta de la vereda Yarumal y la parte media de la quebrada La Yarumal. Dentro del Àrea de Influencia Directa se encuentra en el portal Oriental del túnel de Santa Elena. | 6pe-10 | Ganadería extensiva, plantaciones forestales protectoras – productoras, cultivos densos y semibosques |
| VII | Los suelos de esta clase se hallan sujetos a limitaciones permanentes y severas cuando se emplean para pastos o silvicultura. Son suelos situados en pendientes fuertes, erosionados, accidentados, someros, áridos o inundados. Su valor para soportar algún aprovechamiento es mediano o pobre y deben manejarse con cuidado. En zonas de pluviosidad fuerte estos suelos deben usarse para sostener bosques. En otras áreas, se pueden usar para pastoreo; en este último caso debe extremarse el rigor y el cuidado en su manejo (USDA, 1961). Esta clase se encuentra en la cuenca alta de la quebrada Santa Elena incluyendo la Vía a cielo abierto, el túnel del Seminario y el portal Occidental | 7p-10 | Reforestación, vegetación inducida, no aptas para actividades agropecuarias |

| Clase | Descripción de la clase agrológica | subclase | Usos potenciales |
|---|---|---|---|
| | del túnel de Santa Elena y la parte alta de la quebrada La Yarumal | | |

Fuente: Consorcio Siga-Plyma

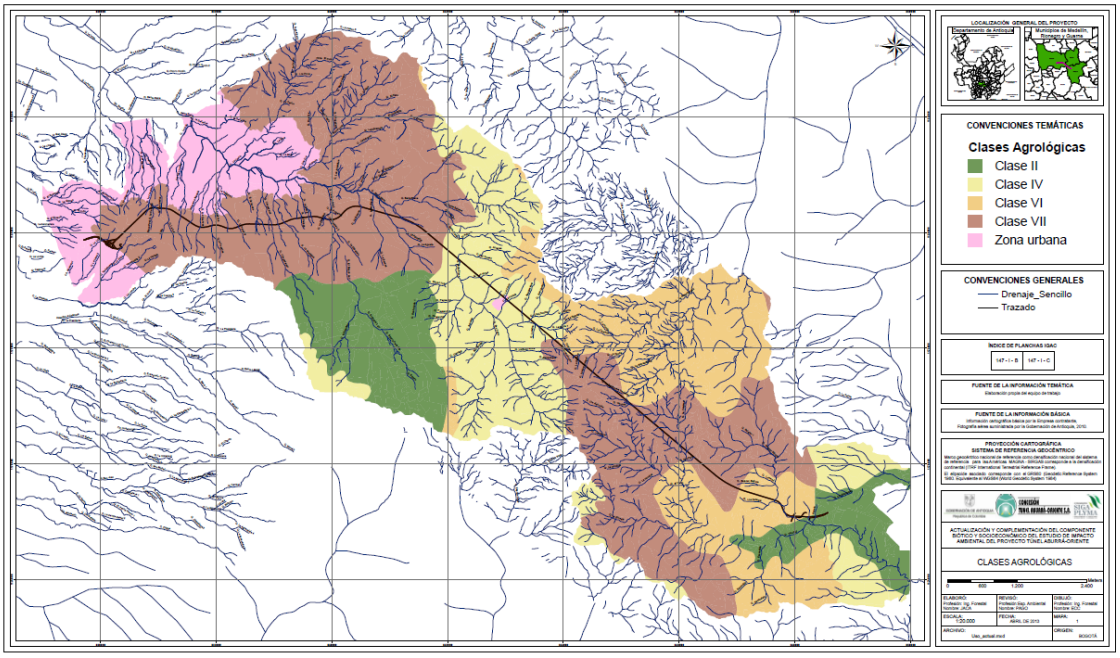



Figura 3-9 Clases agrológicas de los Suelos, Anexo 16. Mapas temáticos clases agrológicas

### 3.2.3.7 Vocación del uso del suelo

La clasificación para determinar las zonas según la vocación del uso del suelo del área de influencia del proyecto, se realizó mediante el estudio detallado de suelos de Antioquia del IGAC de 2007, considerando los aspectos físicos existentes, con el fin de establecer alternativas sostenibles de utilización de la tierra y para conocer su potencial de explotación y las limitaciones de uso.

Su delimitación es esencialmente física y tiene como finalidad agrupar unidades de tierra con limitaciones y vocaciones similares, de tal manera que su uso sea el óptimo de acuerdo con las características intrínsecas de los suelos y con el desarrollo socioeconómico de la zona en estudio.

El mapa de capacidad del uso del suelo del IGAC se presenta a escala 1:100.000.

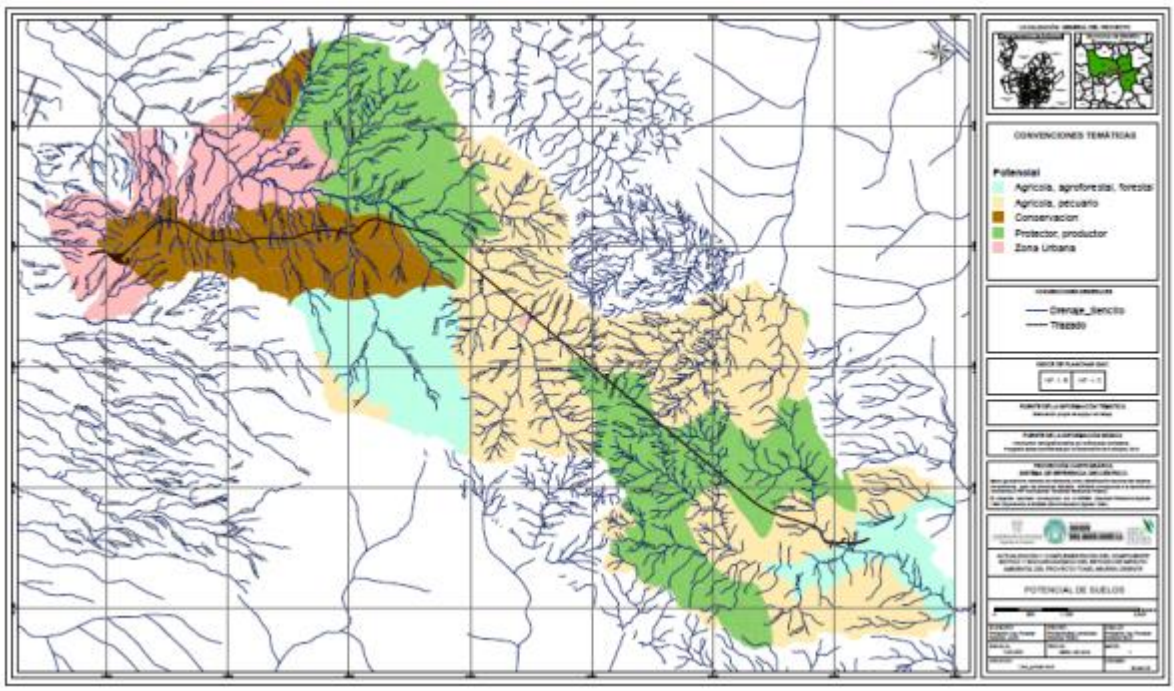



Figura 3-10 - Potencial de suelos

### 3.2.3.8 Conflicto en el uso del suelo

Para determinar los conflictos por usos del suelo se superpusieron los planos de uso del suelo y uso potencial, y se evaluaron las prácticas de manejo y conservación de acuerdo con la presencia o no de éstas y de los requerimientos de implementación de las mismas para mantener el uso actual sin deteriorar el recurso. (Estudio general de suelos departamento de Antioquia, plancha 147, IGAC 2007).

De acuerdo con estos criterios se establecieron cuatro rangos, los cuales se describen en el anexo 3 - 16 (Planos temáticos).

#### 3.2.3.8.1 Sin conflicto (SC):

Los suelos presentan el uso adecuado y no requieren prácticas especiales de manejo. Las características del suelo: pendiente, susceptibilidad a la erosión, profundidad efectiva, drenaje y fertilidad permiten cualquier uso.

En el área de Influencia directa del proyecto estos suelos se encuentran principalmente en las coberturas de bosque natural y vegetación secundaria que se encuentran en la vía a cielo abierto, y en el área de Influencia indirecta en las coberturas boscosas que se encuentran sobre el techo del túnel de Santa Elena y sistemas de producción agroforestal que coinciden con el uso potencial del suelo.

#### 3.2.3.8.2 Conflicto ligero (CL):

Los suelos presentan el uso adecuado para sus características, pero requieren de prácticas sencillas de manejo y de bajo costo como rotación de potreros, trazado de cultivos a través de la

pendiente (con curvas a nivel) y control del aprovechamiento en el caso de las plantaciones, para conservarlo.

En el AID del proyecto estos suelos se localizan en el sector de Santa Elena y con mayor área en la vereda El Llano y El Plan donde predominan los potreros con pastos no manejados y cultivos transitorios de autoconsumo, bien sea por manejo o uso, presenta diferencia con respeto a la vocación.

Se considera conflicto ligero, porque a pesar de la intervención de las zonas boscosas, todavía se conserva parte de éstas asociadas a actividades productivas.

#### 3.2.3.8.3 Conflicto severo (CS):

Estos suelos por sus características exigen estricta selección de usos y requieren prácticas de manejo factibles pero muy costosas. Sin embargo, en éstos se localizan coberturas que no cumplen con la selección estricta.

En el AID del proyecto estos suelos se localizan en las zonas donde se han implementado parcelaciones o viviendas aisladas y que poseen vías de acceso con taludes desnudos sin protección y pastos limpios, en las cuales se requiere del establecimiento de obras especiales como gaviones y drenajes, además de la conformación del terreno, para lograr el establecimiento de la cobertura vegetal.

En la parte del techo del túnel de Santa Elena, que hace parte de la Reserva Forestal Protectora Del Rio Nare, se presenta conflicto debido a que en la parte alta de la cuenca Yarumal, se desarrollan algunas actividades agrícolas y pecuarias.

#### 3.2.3.8.4 Conflicto muy severo (CMS):

Los suelos están restringidos para cualquier uso productivo puesto que sus limitaciones son imposibles de corregir. En ellos se localizan coberturas diferentes a las de protección.

Este tipo de conflicto se presenta en el AID del proyecto en el techo del túnel del seminario y la vía a cielo abierto occidental en el municipio de Medellín, como consecuencia de las actividades extractivas de madera, principalmente de plantaciones forestales (eucaliptos, pinos y ciprés), ejecutadas sin control y posiblemente desconociendo que esta actividad se encuentra restringida en toda esta zona por encontrarse denominada como área de conservación no productiva.

En el sector del techo del túnel de Santa Elena que hace parte de la Reserva Forestal Protectora Del Rio Nare, se presentan tres canteras, de las cuales se extraen materiales de construcción y en las que puede evidenciarse el suelo desprotegido susceptible a la erosión. En esta zona el uso recomendado es protector forestal.

En el Anexo 3-16 de mapas temáticos, en el mapa de Conflictos de usos del suelo, se indica la distribución espacial de éstos.

## 3.2.4 Hidrología

### 3.2.4.1 Introducción

En esta sección se presenta el análisis hidrológico para la zona de estudio. En primer lugar, se realizan el modelo digital del terreno para calcular los parámetros morfométricos, la red de

drenaje de cada una de las cuencas de estudio. Luego se elaboran los mapas de precipitación y evapotranspiración para la estimación de caudales medios, mínimos, máximos y ecológicos. Una vez analizada la hidrología de la zona de estudio, se realiza la evaluación hídrica ambiental, que consiste en la estimación del índice de escacez para las cuencas abastecedoras de los acueductos veredales que se encuentran dentro de la zona del proyecto. Finalmente, se evalúa si dentro de las cuencas abastecedoras, se presentan conflictos de uso del suelo que apunten al detrimento de la oferta del recurso hídrico.

Cabe anotar, que el mapa de conflictos de usos del suelo se elaboró teniendo en cuenta el Plan de Ordenamiento Territorial, documentos de las corporaciones y mediante análisis de imágenes satelitales.

### 3.2.4.2 Generalidades

Las cuencas objeto de análisis y que hacen parte del AID del proyecto son la cuenca Santa Elena, la cuenca Yarumal, la cuenca La cascada y la cuenca Yerbabuena. A continuación, se realiza una breve descripción de cada una de ellas:

#### **3.2.4.2.1** Cuencas en el área de estudio

##### *3.2.4.2.1.1 Cuenca 1 – Quebrada Santa Elena*

La quebrada Santa Elena, tiene un área de 34.30 $Km^2$, la cota mayor es 2806 m.s.n.m y la cota menor es de 1574 m.s.n.m.

Es la cuenca más grande de las ubicadas en el área de influencia directa del proyecto Conexión Vial Aburrá Oriente, de forma ovalada un poco alargada al suroeste, los drenajes son largos y medianamente sinuosos, de patrón dendrítico y media a alta densidad en zonas de mayores pendientes y un poco menos denso y más subparalelo en las zonas de topografía más suave.

La quebrada Santa Elena nace en el cerro del Espíritu Santo, vereda de Santa Elena, en la cota 2.806 m.s.n.m; hacia la cota 2.620 confluye por la margen derecha otro ramal que conforma su cabecera a la cual le llegan otros afluentes por ambas márgenes aumentando así su caudal. Entre sus afluentes se cuentan las quebradas San Juan, El Cerro, Santa Barbará, La Cascada, La Espadera o Bizarro, Los Cauces y La Pastora entre otras corrientes menores. La cuenca de la quebrada Santa Elena limita por el norte con las quebradas El Ahorcado, El Molino y parte de Piedras Blancas; por el oriente con La Cuchilla, La Gulupera (divisoria de aguas de Piedras Blancas, hasta encontrarse con el alto de Santa Bárbara; de allí hasta el alto de las Brisas, punto de intersección de los municipios de Guarne y Rionegro; al sur con el municipio de Rionegro y las quebradas La Presidenta y La Poblada y al occidente con el río Medellín o Aburrá.

El desarrollo histórico de la ciudad está ligado fuertemente a esta cuenca, debido a que era el núcleo urbano de Medellín, donde confluía todo tipo de actividades tales como: minería de oro, lavado de ropa, charcos, toma de agua para acueductos, toma de agua para generación de energía, entre otros.

Su cauce principal tiene un caudal promedio de 653 L/s en el punto 11C.

Dentro del área de influencia del proyecto se encuentran los siguientes afluentes de la Quebrada Santa Elena, los cuales se han venido aforando hace más de 2 años por parte de la Concesión Vial Aburrá Oriente, tal como se evidencia en la siguiente tabla.

Tabla 3-48 - Afluentes de la quebrada Santa Elena y caudal promedio aforado

| Punto | Nombre del cuerpo de agua | Caudal (L/s) |
|---|---|---|
| 10c | Quebrada el placer | 27,26 |
| 11c | Quebrada Santa Elena | 653,38 |
| 12c | Quebrada las antenas | 34,46 |
| 13c | Afluente quebrada las antenas | 6,80 |
| 14c | Afluente de la quebrada el placer | 24,99 |
| 24c | Quebrada Las Torres | 2,78 |
| 15c | Quebrada Las Torres | 10,19 |
| 16c | Quebrada Las Torres | 7,76 |
| 23c | Quebrada Santa Elena, casi en el punto en el que le llega el afluente 16, 20c y 21c | 563,82 |
| 20c | Afluente Quebrada Santa Elena | 58,98 |
| 21c | Afluente Quebrada Santa Elena | 5,27 |
| 9c | Quebrada Santa Teresa | 14,07 |
| | Quebrada La Avícola | |
| 8c | Quebrada San Pedro | 179,15 |
| 19c | Quebrada San Pedro | 12,21 |
| 17c | Afluente Quebrada Santa Elena | 6,72 |
| 18c | Afluente Quebrada Santa Elena | 2,4 |
| 26c | Afluente Quebrada Santa Elena | 97,39 |

Fuente: Elaboración propia Consorcio Siga-Plyma

#### *3.2.4.2.1.2 Cuenca 2 – Quebrada La Yarumal*

La quebrada Yarumal, tiene un área de 15.50 $Km^2$, la cota mayor es 2747 m.s.n.m y la cota menor es de 2124 m.s.n.m.

Cuenca que drena hacia el río Negro. Es una cuenca larga de forma oval, posee un patrón de drenaje subparalelo dendrítico, de tributarios largos en una zona de topografía ondulada a montañosa hacia la parte alta. Dentro de esta quebrada se tiene como fuente importante la Quebrada Salazar, ésta tiene una forma redondeada. Es una corriente de menor jerarquía, con un patrón de drenaje escaso, poco sinuoso para un cauce joven, las formas de las vertientes que drena son onduladas a bajas. Está enmarcada dentro de colinas medias de topes redondeados y lomos largos.

#### *3.2.4.2.1.3 Cuenca 3 - Quebrada La Cascada*

La quebrada La Cascada, tiene un área de 6.20 $Km^2$, la cota mayor es 2735 m.s.n.m y la cota menor es de 2295 m.s.n.m.

Tributaria de la Quebrada La Honda, por su margen izquierda pertenece a la Cuenca La Mosca la cual tiene una forma ovalada alargada hacia el noreste. Es una corriente larga de forma poco sinuosa con algunos tributarios cortos. Posee un patrón de drenaje subdendrítico, su cauce principal mide 7112,6 m. Para la zona del proyecto, se cuentan con aforos que evidencian caudales promedios del orden de 2,9 L/s. La Quebrada La Cascada, es una cuenca pequeña, de topografía ondulada a escarpada, de pocos tributarios con un patrón de drenaje subdendrítico. Su cauce principal presenta un caudal del orden de 0,029 $m^3/s$.

#### *3.2.4.2.1.4 Cuenca 4 - Quebrada Yerbabuena*

La quebrada Yerbabuena, tiene un área de 1.45 $Km^2$, la cota mayor es 1983 m.s.n.m y la cota menor es de 1582 m.s.n.m.

La cuenca de la quebrada La Presidenta o la Yerbabuena, se localiza en la zona suroriental de la ciudad de Medellín. Esta cuenca hidrográfica está constituida por las quebradas: La Poblada, como principal tributaria, y sus afluentes La Loma, La Yerbabuena y La Concha; y las quebradas Sanín o Moná, Chambul o el Chocho, La Escopetería y La Chacona, las cuales confluyen directamente a La Presidenta.

Esta fuente de agua natural nace en la vereda El Llano de Santa Elena, recorre al menos cuatro barrios de la Comuna 14 (El Poblado), su principal característica es que antes de desembocar al río Medellín un fenómeno natural y desviaciones del cauce son los causantes de las inundaciones.

La quebrada Yerbabuena es tributaria de la quebrada La Poblada. Es una corriente larga de forma poco sinuosa, posee un patrón subdéntrico. Su cauce principal presenta un caudal del orden de 0,035 $m^3/s$.

Es una cuenca que corre en el caso particular por los terreno del Seminario Conciliar de Medellín, está compuesta por corrientes de agua bastante intervenidas, debido a las diferentes actividades antrópicas que se desarrollan en el área aledaña, entre las cuales está el vertimiento especialmente de aguas de origen doméstico, deforestación, cambios en el canal debido a la presencia de vías y obras de infraestructura a lo que se suma la desviación de su caudal.

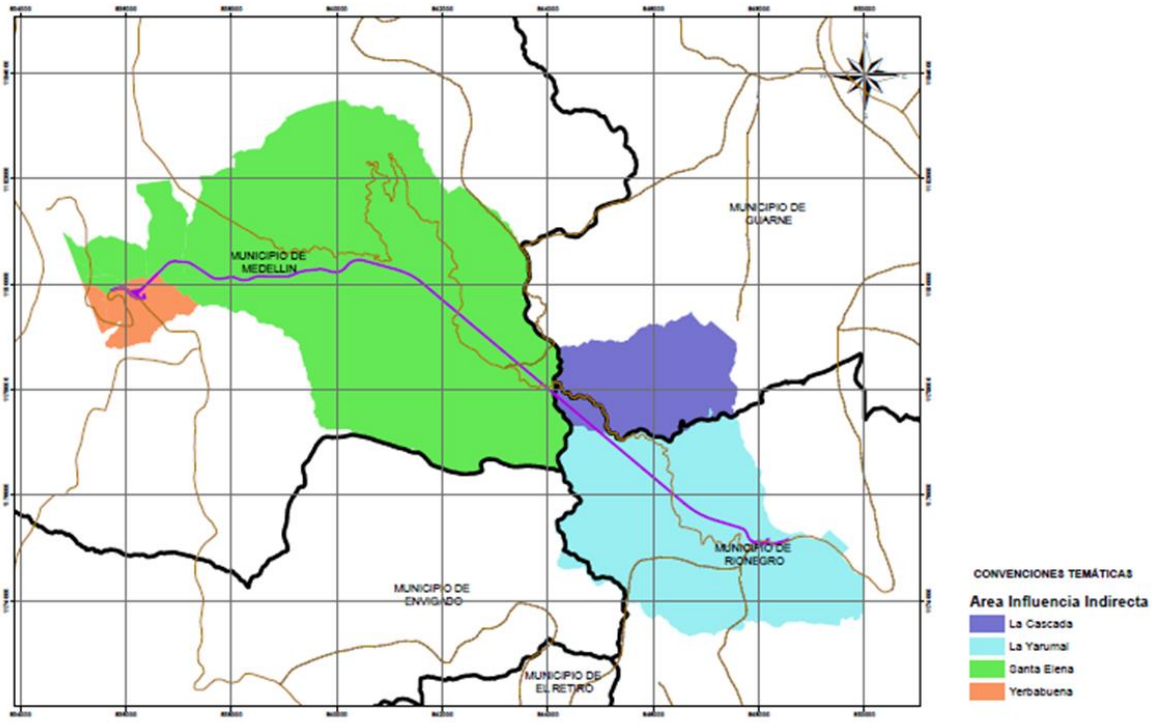



Figura 3-11 - Localización de cuencas en el área de influencia del proyecto (Anexo 3-16 Localización_cuencas)

### 3.2.4.2.2 Fuentes contaminantes

La mayor parte del drenaje de las aguas residuales producidas en el AID del proyecto Conexión Vial Aburra-Oriente, es realizado por redes individuales que generan descargas directas a cielo abierto sobre las fuentes de agua superficial y algunos tratamientos convencionales de tipo individual (pozo séptico+FAFA), que en su mayoría carecen de mantenimiento y revisiones periódicas que optimicen su funcionamiento y garanticen porcentajes de eficiencia de remoción cercanos o superiores al 80% (porcentaje determinado por el Decreto 1594 de 1984). De lo mencionado y de la revisión que se realizó en campo podría afirmarse que la zona comprendida por el área de influencia directa del proyecto carece en su totalidad de redes de alcantarillado que permitan la recolección, transporte y entrega de éstas a sistemas de tratamiento, así como la descarga de efluentes a través de emisarios finales, aumentando los niveles de contaminación por descargas en su mayoría de tipo doméstico.

Haciendo una revisión de los permisos de vertimientos que se tiene en la zona otorgados por las Corporaciones Autónomas Regionales CORNARE y CORANTIOQUIA, se tiene que la primera de éstas registra dos (02) permisos mientras que la segunda registra trescientos diez y nueve (319) permisos, lo que permite determinar que existen trescientos veintiún (321) usuarios que descargan sus aguas después de haber pasado por tratamientos primarios y/o secundarios. Sin embargo, y conociendo la dinámica de la zona, se establece que las principales fuentes contaminantes están constituidas por descargas de aguas residuales de tipo domestico sin tratamiento previo o con tratamientos que no generan porcentajes de remoción óptimos, igualmente y partiendo de la caracterización físico-química de las fuentes del AID del proyecto, se puede establecer que solo algunas corrientes presenta afectación por este tipo de descargas como

las quebradas Yarumal 5 (ICAfa 0,50) Yarumal 4 (ICAfa 0,57), La Matilda (ICAfa 0,69), Confluencia El Yaruma-Las Antenas (ICAfa 0,68), Paysandú (ICAfa 0,69), La Aguadita (ICAfa 0,68), lo cual se constituye en un problema más marcado y de mayor afectación por ser fuentes con baja concentración de oxigeno que minimiza en gran medida su propia autopurificación.

A continuación se relaciona la información de permisos de vertimientos suministrada por CORNARE.

Tabla 3-49 - Permisos de vertimientos otorgados y vigentes por CORNARE

| Generador del vertimiento | Municipio/Vereda | Cuenca, subcuenca o microcuenca | Tipo de A.R de descarga | Sistema de tratamiento | Sitio de descarga | Vigencia del permiso |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Claudia María Gómez Nicholls | Rionegro | Sajonia | Domestica | Trampa de grasas+Tanque septico+FAFA+Pozo de absorción | Fuente de agua superficial | 5 años |
| Concesión túnel aburra | Rionegro | El Yarumo | Domestica | Tanque séptico+FAFA+Campo de infiltración | Suelo | 2 años |

Fuente: Corporación Autónoma Regional de las Cuencas de los Ríos Negro y Nare CORNARE

### 3.2.4.3 Análisis Hidrológico

A continuación se presenta el análisis hidrológico de las cuencas objeto de estudio. Es importante aclarar que este estudio contempla el análisis hidrológico de las fuentes hídricas superficiales de la zona de estudio, complementándose con el estudio de Geodata donde se realiza el estudio de las fuentes subterráneas.

#### 3.2.4.3.1 Sistemas lenticos y lóticos

De acuerdo con la red de drenaje y las salidas de campo, en la zona de estudio no se identifican sistemas lenticos importantes o representativos para el proyecto. En cuanto a los sistemas loticos, estos se describen y analizan más adelante de ese documento.

#### 3.2.4.3.2 Modelo digital del terreno y mapas de precipitación y evapotranspiración

Para realizar los análisis hidrológicos de cada una de las cuencas de la zona de estudio, se realiza lo siguiente:

1) Elaboración del modelo digital del terreno (MDT): Esta actividad permite identificar los parámetros morfométricos de cada una de las cuencas analizadas.
2) Identificación de las propiedades del relieve.
3) Elaboración de mapas de precipitación.
4) Elaboración de mapas de evapotranspiración.

A continuación se presenta el desarrollo de cada una de las actividades mencionadas anteriormente:

#### *3.2.4.3.2.1 Modelo Digital de Terreno (MDT)*

Existen nuevas herramientas que han agilizado el procesamiento y obtención de datos mediante mapas digitales del terreno como es el caso de la obtención de cuencas hidrográficas de una corriente a partir de modelos digitales de elevación (MDE). El software usado para los cálculos, HidroSIG 4.0, fue desarrollado por un grupo interdisciplinario de los posgrados en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos y Sistemas de la Universidad Nacional de Colombia – Sede Medellín. HidroSIG 4.0 es un paquete computacional que modela algunas variables hidrometeorológicas, genera cuencas y con el uso de diferentes algoritmos obtiene el balance hidrológico a largo plazo (caudales medios). El software HidroSIG 4.0 es de uso público, es decir, se encuentra disponible gratuitamente en la página de la universidad Nacional de Colombia.

El modelo de elevación digital es fundamental en la extracción de los parámetros morfológicos que definen las cuencas objeto de análisis. Además, mediante metodologías de regionalización de características medias, del MDE se pueden extraer campos de variables climáticas como temperatura y evapotranspiración, los cuales son indispensables en la determinación de los caudales medios cuando la información en las cuencas analizadas es escasa debido a la falta instrumentación o a la mala calidad de los posibles datos disponibles.

El MDE utilizado en la estimación de los diferentes campos morfoclimáticos, se obtuvo gratuitamente de la misión SRTM-2 (Shuttle Radar Topography Mission). El MDE posee una resolución de pixeles cuadrados de 30.6 x 30.6 metros y con base en la información cartográfica del IGAC y los algoritmos implementados en HidroSIG 4.0 fue procesado con el objetivo de obtener la información más confiable de la zona, además eliminar las zonas planas y los sumideros y realizar la extracción automática de cuencas. En la Figura 3.1 se presenta el Modelo Digital del Terreno elaborado para la zona de estudio.

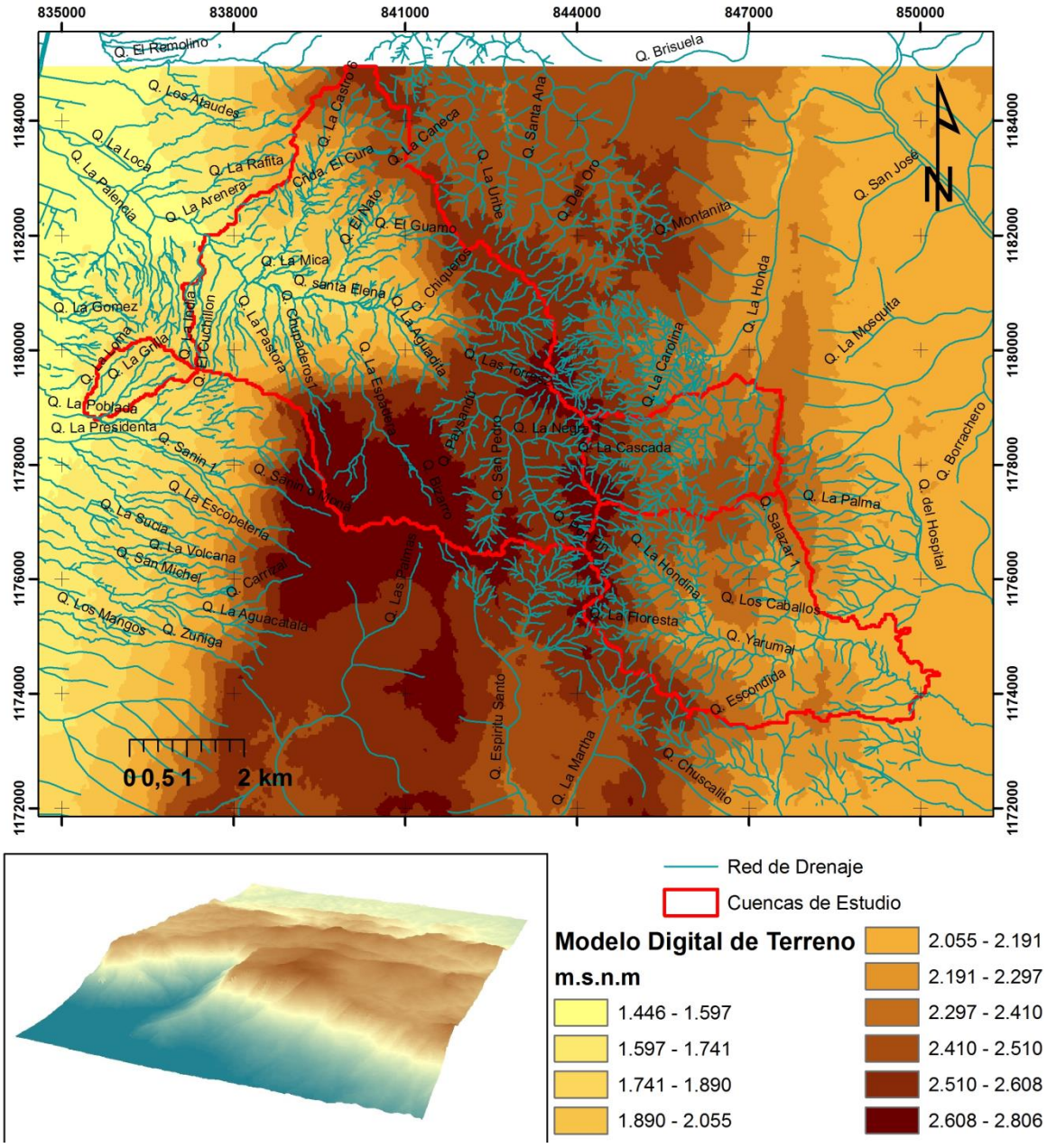



Figura 3-12 - Modelo Digital de Elevación (MDE)

### 3.1.1.1.1 Parámetros morfométricos de las cuencas de estudio

Una cuenca puede concebirse, desde un punto de vista hidrológico, como un área que vierte agua hacia un punto de desagüe durante el período de precipitación y post-precipitación; o, desde el hidro-geográfico, como la superficie que ocupa un curso de agua superficial y sus afluentes (Soczynska, 1991, citado por Pesce, 2011). De cualquier manera es una fuente de agua aprovechable.

- **Área de drenaje.** Queda establecida a partir de la delineación de la cuenca y se expresa en hectáreas o kilómetros cuadrados. El área de drenaje y la localización espacial son dos parámetros útiles para evaluar en forma preliminar las dimensiones territoriales de la cuenca hidrográfica y esbozar características generales de la misma, tales como zonalidad climática, topografía del territorio que ocupa, áreas protegidas o no incluidas, entre otras. El área de una cuenca afecta en forma directa la magnitud de la tormenta y la escorrentía fluvial, de tal modo que el máximo flujo de descarga por unidad de área es inversamente proporcional al tamaño de la misma. (Chorley, 1971, citado por Pesce, 2011).
- **Morfometría lineal.** Las propiedades morfométricas simples de una cuenca hídrica y del diseño de su red de drenaje, además de aportar datos numéricos concretos, permite utilizar éstos para establecer razones e índices más complejos con el propósito de padronizar la forma de la cuenca en relación a figuras geométricas. Las propiedades simples incluyen: longitud del cauce principal, longitud máxima entre los extremos de la cuenca, longitud máxima entre el extremo de la cuenca y el desagüe (en este caso ambos parámetros son iguales), ancho máximo de la cuenca, ancho medio (cociente entre el área de la cuenca y la longitud máxima de la misma), y perímetro
- **Forma de la cuenca.** Según Pesce (2011), citando a Soczynska (1991), son:
- **Factor forma.** Definido como el cociente entre el ancho medio de la cuenca, Am, y el largo máximo de la misma, Lm, pretende parametrizar la cuenca de tal manera que a través del mismo se obtenga una aproximación a su forma geométrica.
- **Razón de circularidad.** Propuesta por Miller en 1953, es el cociente entre el área de la cuenca (A) y el área de un círculo que tiene un perímetro igual al perímetro de la cuenca (P). Los valores oscilan entre 0–1 y cuanto más tiende a la unidad la forma de la cuenca es más circular.
- **Razón de elongación.** Propuesto por Schumm en 1956, se determina a partir del cociente entre el diámetro de un círculo de área igual a la de la cuenca y el largo máximo (Lm) de la misma.
- **Índice de compacidad.** Formulado por Gravelius en 1914, se obtiene a partir del cociente entre el perímetro de la cuenca (P) y el perímetro de un círculo de área igual al área de la cuenca. Cuando más tienda el valor de este índice a la unidad, se considera que la cuenca tiene tendencia a la circularidad y por lo tanto es más compacta.

  Los índices y razones numéricas que se establecen a partir de la patronización de la forma de la cuenca podrían considerarse indicadores primarios que permiten formular hipótesis sobre las respuestas hidrológicas a los distintos eventos de tormenta y el comportamiento esperado del caudal.

  Ward y Robinson (2000), citados por Pesce (2011), encontraron que las cuencas más alargadas tienden a una respuesta más difusa en comparación con las respuestas de tormentas de caudales altos en cuencas compactas. Pues, la escorrentía que drena todos los límites de una cuenca compacta, tiene distancias similares de trayecto desde todos los cuadrantes y llega al colector principal al mismo tiempo; en cuencas de forma alargada al agua le cuesta bastante más circular desde la parte alta de la cuenca hasta el final. Por su parte, Senciales (1999), en trabajos morfométricos desarrollados en España, demostró que los menores valores de la razón de elongación se dan en áreas de baja pendiente y con tendencia a la meandrización en los cauces fluviales. Gregory y Walling (1973), por su parte, encontraron que cuanto más circular tienda a ser la forma de una cuenca más retardo existe entre el momento de la

precipitación y el momento de crecida en la desembocadura, pero al mismo tiempo, más acusada y súbita es la misma crecida y por lo tanto más alto el riesgo de inundación.

- **Densidad de la red de drenaje.** Cociente entre la longitud de los cauces que conforman el sistema fluvial de la cuenca, expresados en kilómetros y el área total de la unidad hidroespacial expresada en kilómetros cuadrados. Esta medida de la textura del territorio de la cuenca, expresa el equilibrio entre el poder erosivo del caudal y la resistencia a la erosión expresada por las características geoecológicas del territorio de la cuenca. Sus valores están controlados por: la litología del sustrato; la permeabilidad del suelo y su capacidad de infiltración; y la cobertura vegetal y tipo de la misma, características que deben evaluarse en forma global, ya que una alta densidad de drenaje expresa materiales geológicos friables, suelos relativamente impermeables o escasa cobertura vegetal. Constituye por lo tanto un indicador del potencial de erosividad intrínseco al territorio en estudio.

En la siguiente tabla se muestran las propiedades morfométricas de las cuencas de estudio.

Tabla 3-50 - Parámetros morfométricos de las cuencas de estudio

| PARAMETROS | UNIDADES | CUENCAS | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | SANTA ELENA | YARUMAL | LA CASCADA | YERBABUENA |
| Área de drenaje | [Km$^2$] | 34.30 | 15.50 | 6.20 | 1.45 |
| Longitud Total corrientes | [Km] | 1332.50 | 602.10 | 242.00 | 57.20 |
| Cota mayor cuenca | [m.s.n.m] | 2806.00 | 2747.00 | 2735.00 | 1983.00 |
| Cota menor río | [m.s.n.m] | 1574.00 | 2124.00 | 2295.00 | 1582.00 |
| Longitud cauce al centroide | [Km] | 5.25 | 5.61 | 2.31 | 1.08 |
| Perímetro | [Km] | 36.60 | 26.30 | 14.40 | 7.20 |
| Pendiente cuenca | [%] | 30.60 | 27.20 | 24.80 | 23.30 |
| Pendiente cauce principal | [%] | 11.10 | 7.00 | 9.57 | 16.04 |
| Longitud Cauce principal | [Km] | 11.10 | 8.90 | 4.60 | 2.50 |
| Longitud de la cuenca | [Km] | 8.60 | 6.60 | 3.40 | 1.78 |
| Ancho de la cuenca | [Km] | 4.00 | 2.33 | 1.80 | 0.83 |

| PARAMETROS | UNIDADES | Cuencas | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | SANTA ELENA | YARUMAL | LA CASCADA | YERBABUENA |
| Factor de Forma | [adimensional] | 0.46 | 0.36 | 0.54 | 0.46 |
| Razón de Circularidad | [adimensional] | 0.32 | 0.28 | 0.38 | 0.35 |
| Razón de Elongación | [adimensional] | 0.769 | 0.673 | 0.827 | 0.762 |
| Coeficiente de compacidad | [adimensional] | 1.750 | 1.870 | 1.619 | 1.674 |
| Densidad de drenaje | [Km/Km$^2$] | 38.848 | 38.845 | 39.032 | 39.448 |
| Desnivel de la cuenca | [m] | 1232.00 | 623.00 | 440.00 | 401.00 |

Cook & Doornkamp (1974) sostienen que la dinámica erosiva de la red hidrográfica es el resultado de un sistema de transferencia de materia y energía cuyo grado de eficiencia se refleja en la disposición de la red de drenaje. Los valores de densidad de drenaje encontrados son altos, lo que refleja un poder erosivo alto de las corrientes.

Las cuencas de estudio son ovaladas, lo cual ratifica los factores de circularidad y elongación, lo que indicaría que el tiempo que tarda en llegar la onda de crecida a la desembocadura es poco, pero, al mismo tiempo, los caudales pico no son tan pronunciados. Gregory y Walling (1973), citado por González (2004), señalaron que cuanto más ovalada es una cuenca menos retardo existe entre el momento precipitación y el momento de crecida en la desembocadura, pero al mismo tiempo, menos acusada y súbita es la misma crecida, y por tanto menos alto el riesgo de inundaciones.

### Propiedades Lineales de la Red de Drenaje

A continuación, se presentan las propiedades lineales de la red de drenaje de cada una de las cuencas estudiadas.

- **Jerarquización de la red de drenaje superficial.** Se subdividen los distintos cursos de agua que integran la red de drenaje superficial en segmentos de cauce clasificados en función del orden de magnitud de los mismos, siguiendo la clasificación propuesta por Strahler (1964). La jerarquización de cursos fluviales, junto con la determinación de segmentos y la localización geográfica de nudos fluviales (externos e internos) permite: evaluar los cursos de agua que mantienen caudal en forma permanente.
- **Orden de corriente.** En general, mientras mayor sea el grado de corriente, mayor será la red y su estructura más definida. Un mayor orden indica en general la presencia de controles estructurales del relieve y mayor posibilidad de erosión o bien, que la cuenca podría ser más antigua (en determinados tipos de relieve).
- **Tiempo de concentración.** La definición que aparece reseñada con mayor frecuencia en la literatura, alude al tiempo transcurrido entre el final del hietograma de excesos y el final del escurrimiento directo. Sin embargo, otros autores reportan el Tc como el tiempo comprendido entre el centroide del hietograma de excesos y el punto de inflexión sobre la curva de recesión del hidrograma de escurrimiento directo. También, se ha definido como el tiempo que demora en viajar una gota de agua desde el punto más remoto hasta el punto de interés, que corresponde al lapso entre el final de la lluvia y el momento en que cesa el escurrimiento superficial.
- Para su cálculo se han definido varias fórmulas. Para la determinación del tiempo de concentración de la cuenca se utilizaron 5 de las más reconocidas; se promediaron tres valores de las ecuaciones más aproximadas (eliminando el mayor y el menor valor).

  Las fórmulas utilizadas fueron:

  Témez (1978)

$$Tc = 0{,}3\left(\frac{L}{S_0^{0{,}25}}\right)^{0{,}75}$$

Dónde: L, longitud del cauce principal en kilómetros; So, diferencia de cotas escalado por L, en %

Williams (1922) $$Tc = \frac{L * A^{0,4}}{D * S_0^{0,2}}$$

Dónde: A, área de la cuenca en millas cuadradas; L, distancia en línea recta desde el sitio de interés al punto más alto, en millas; So, diferencia de cotas entre los puntos más extremos dividida por L, en %; y D, diámetro de una cuenca circular en millas cuadradas.

Kirpich (1990) $$Tc = 0{,}066 * \left( \frac{L}{\sqrt{S_0}} \right)^{0,77}$$

Dónde: L, longitud del cauce principal, desde el sitio de aforo hasta la divisoria (Km); y So, diferencia de cotas entre los puntos más extremos en m/m.

Johnstone y Cross (1949) $$Tc = 5\left( \frac{L}{\sqrt{S_0^{0,5}}} \right)$$

Dónde: L, longitud del cauce principal en millas; y So, pendiente del canal en pies/milla.

California Culverts Practice (1942) $$Tc = 0{,}01\left( \frac{L^3}{H} \right)^{0,385}$$

Dónde: L, longitud del canal principal en kilómetros; H, diferencia de cotas entre el punto de interés y la divisoria en metros.

Zuluaga et al. (1981) $$Tc = 0{,}658\left( \frac{L}{S_0} \right)^{0,671}$$

Dónde: L, longitud del drenaje principal en Km; y So, pendiente del cauce principal en %.

En la siguiente tabla se muestran los valores encontrados para las propiedades lineales de la red de drenaje de las cuencas de estudio:

Tabla 3-51 - Propiedades lineales de la red de drenaje de las cuencas de estudio

| PARAMETROS | Cuencas | | | |
|---|---|---|---|---|
| | SANTA ELENA | YARUMAL | LA CASCADA | YERBABUENA |
| Pendiente cauce principal (%) | 11.10 | 7.00 | 9.57 | 16.04 |
| Longitud Total corrientes (Km) | 1332.50 | 602.10 | 242.00 | 57.20 |
| Tiempo de concentración (min) | 73.62 | 70.41 | 38.39 | 21.07 |
| Orden de la cuenca | 4 | 3 | 3 | 2 |

### Propiedades del Relieve

Las cuencas con mayores pendientes tienen una escorrentía más veloz y sus hidrógramas, por tanto, tienden a responder más rápidamente a la precipitación, incrementando los caudales punta (Sherman, 1932; Horton, 1945; Strahler, 1964). En la figura 3.2, se muestra el mapa de pendiente de la zona de estudio.

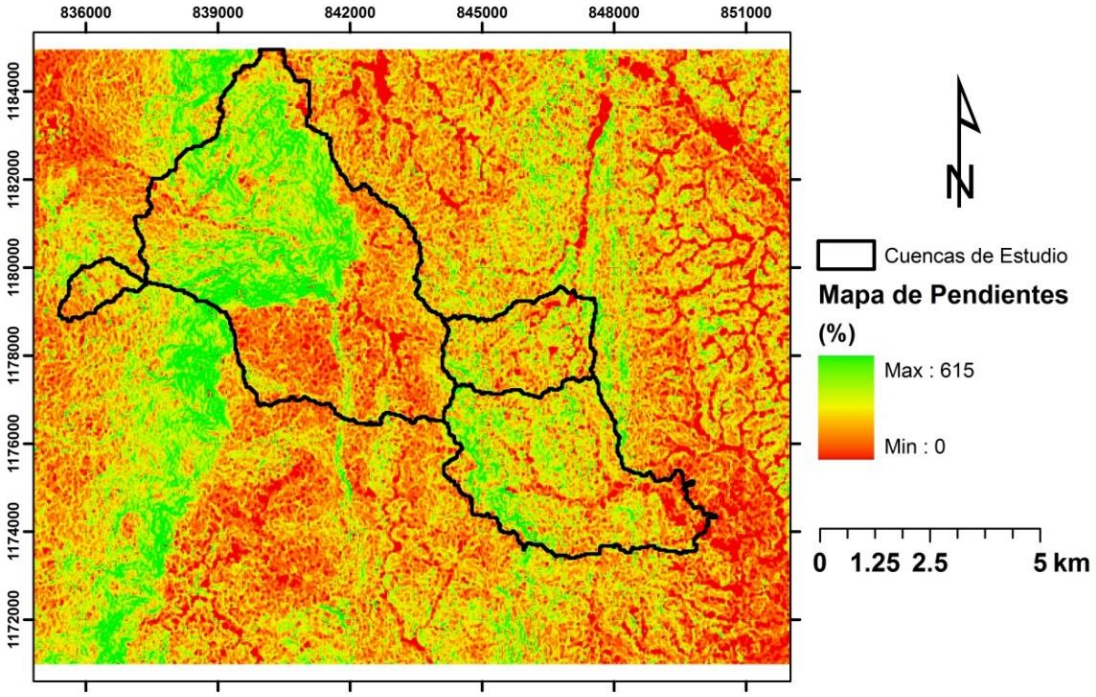



Figura 3-13 - Mapa de Pendientes.

En la siguiente tabla, se muestran los valores encontrados para las propiedades de relieve de las cuencas estudiadas.

Tabla 3-52 - Propiedades de Relieve, áreas de las cuencas estudiadas

| Parámetro | Cuenca | | | |
|---|---|---|---|---|
| | La Cascada | Yarumal | Santa Elena | La Yerbabuena |
| Pendiente Media (%) | 24.8 | 27.2 | 30.6 | 23.3 |
| Pendiente Mínima (%) | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| Pendiente Máxima (%) | 104.7 | 363.2 | 288 | 150.5 |

| Parámetro | Cuenca | | | |
|---|---|---|---|---|
| | La Cascada | Yarumal | Santa Elena | La Yerbabuena |
| Elevación Media (m.s.n.m) | 2446.35 | 2337.52 | 2326.08 | 1755.9 |

| Parámetro | Cuenca | | | |
|---|---|---|---|---|
| | La Cascada | Yarumal | Santa Elena | La Yerbabuena |
| Orden de la Cuenca | 4 | 5 | 5 | 3 |
| Pendiente Media (%) | 24.8 | 27.2 | 30.6 | 23.3 |
| Cota mayor cuenca (m.s.n.m) | 2735.00 | 2747.00 | 2806.00 | 1983.00 |
| Cota menor río (m.s.n.m) | 2295.00 | 2124.00 | 1574.00 | 1582.00 |
| desnivel de la cuenca (m) | 440 | 623 | 1232 | 401 |

Del análisis morfométrico de la cuenca y la red de drenaje se desprende que la rapidez en la concentración de las aguas se ve favorecida especialmente por las pendientes, más que por los índices de compacidad y elongación.

La densidad de drenaje indica una amplia cobertura vegetal y litología más o menos dura, además de unas altas tasas de infiltración y alimentación del flujo subsuperficial, que favorece el incremento del tiempo de concentración y el atenuamiento de caudal punta.

### Precipitación

Para obtener la información de precipitación se realizó una búsqueda de las estaciones representativas en la zona de estudio.

Las estaciones de las cuales se obtuvieron datos se presentan en la siguiente tabla, las estaciones ubicadas dentro de la zona de estudio son las estaciones Santa Elena y Aeropuerto José María Córdova. Adicionalmente, se utilizó la información que se encuentra en la cartilla hidrometeorológica de Empresas Públicas de Medellín (EPM) para complementar la información con la cual se obtuvo el mapa de precipitación.

Tabla 3-53 - Estaciones utilizadas para construir del mapa de precipitación de la zona de estudio

| NOMBRE | CODIGO | ESTE | NORTE | RESOLUCION | FECHA DE REGISTRO | PRECIPITACION MEDIA MULTIANUAL (mm/año) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| APTO OLAYA HERRERA | 2701507 | 832709.84 | 1179873.19 | Diaria | Enero de 1994 a Diciembre de 2012 | 1858.5 |
| SANTA ELENA | 2701810 | 840697.79 | 1177226.94 | Diaria | Enero de 1993 a Diciembre de 2013 | 3019.7 |
| APTO JOSE MARIA CORDOVA | 2308520 | 850748.57 | 1174075.58 | Diaria | Enero de 1993 a Diciembre de 2014 | 2117.5 |
| LA SELVA | 2308504 | 851974.97 | 1169982.97 | Diaria | Enero de 1993 a Diciembre de 2015 | 2127.67 |
| LA SEVERA | 2308022 | 847700.00 | 1184120.00 | Promedio de precipitación Total anual | --- | 1781.8 |
| LA MOSCA | 2308026 | 847000.00 | 1189300.00 | Promedio de precipitación Total anual | --- | 1851.2 |

| NOMBRE | CODIGO | ESTE | NORTE | RESOLUCION | FECHA DE REGISTRO | PRECIPITACION MEDIA MULTIANUAL (mm/año) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| MAZO | 2701034 | 841940.00 | 1184200.00 | Promedio de precipitación Total anual | --- | 1902.6 |
| VASCONIA | 2308024 | 844895.00 | 1178000.00 | Promedio de precipitación Total anual | --- | 2293 |

Las estaciones que se muestran en la tabla anterior se encuentran próximas a la zona de estudio y por lo tanto la caracterización de su comportamiento es el mejor indicador del comportamiento de la zona de análisis.

En la siguiente figura se muestra el mapa de precipitación y la ubicación de las estaciones utilizadas para la validación de este.

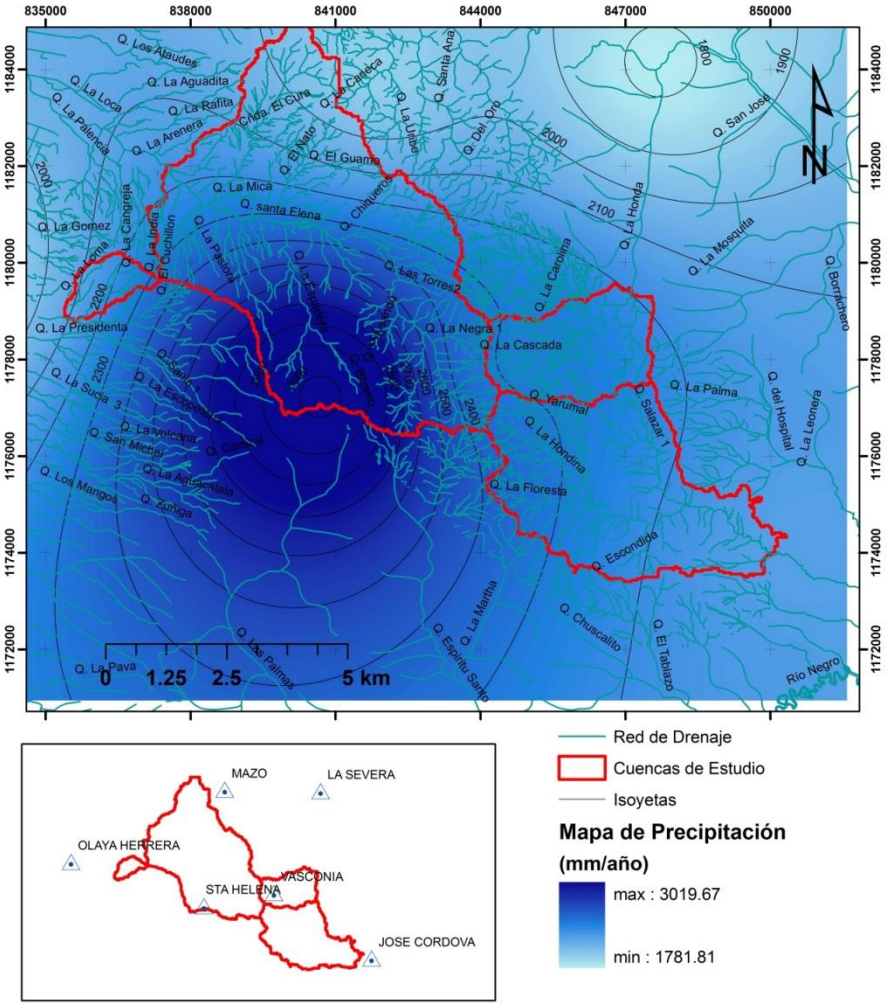



Figura 3-14 - Mapa de precipitación de la zona de estudio.

Se puede observar la variación de la precipitación en la zona de interés, la cual va desde un máximo de 3019.7 mm/año en la centro de la zona de estudio, disminuyendo hasta un valor de 1781.8 mm/año en la zona noreste.

En las figuras a continuación relacionadas, se muestra la variación mensual multianual de precipitación en las estaciones más cercanas a la zona de estudio. Como se puede notar el comportamiento es netamente bimodal en todas las estaciones, con los valores mínimos de precipitación presentándose en el mes de enero. Se observa un leve veranillo entre los meses de junio y agosto y los dos picos de máxima precipitación en los meses de marzo - mayo, septiembre - noviembre. El comportamiento observado establece homogeneidad en régimen hidrológico entre las estaciones, las cuales se encuentran en vertientes diferentes de la zona analizada.

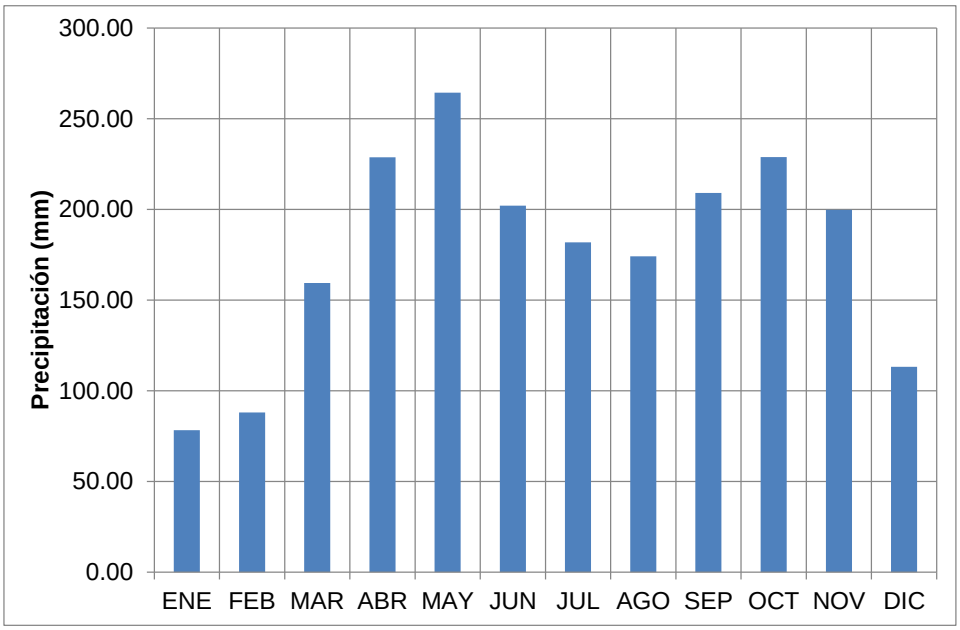



Figura 3-15 - Variación mensual multianual de precipitación estación La Selva (2308504).

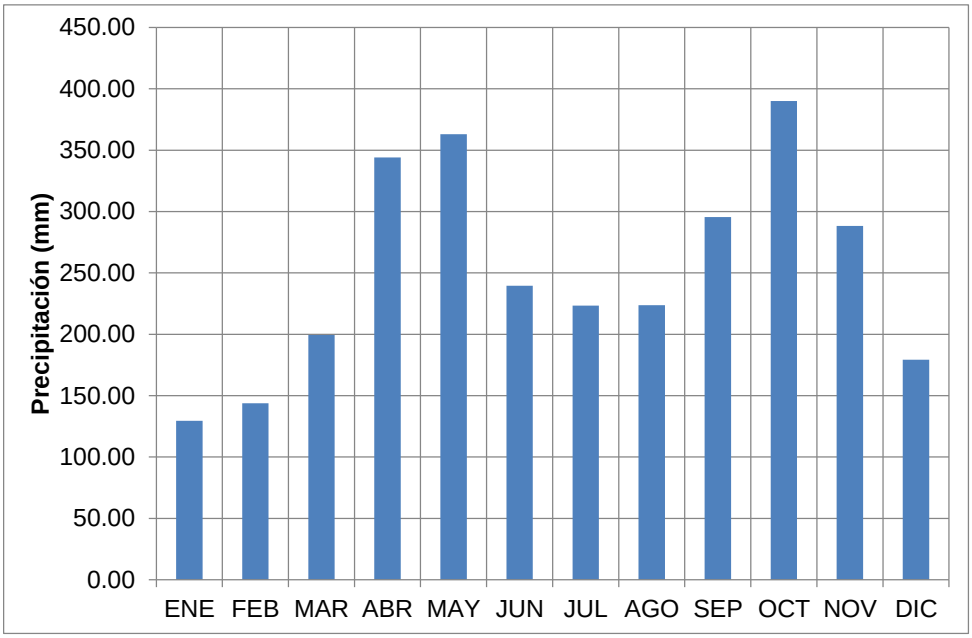



Figura 3-16 - Variación mensual multianual de precipitación Santa Elena (2701810).

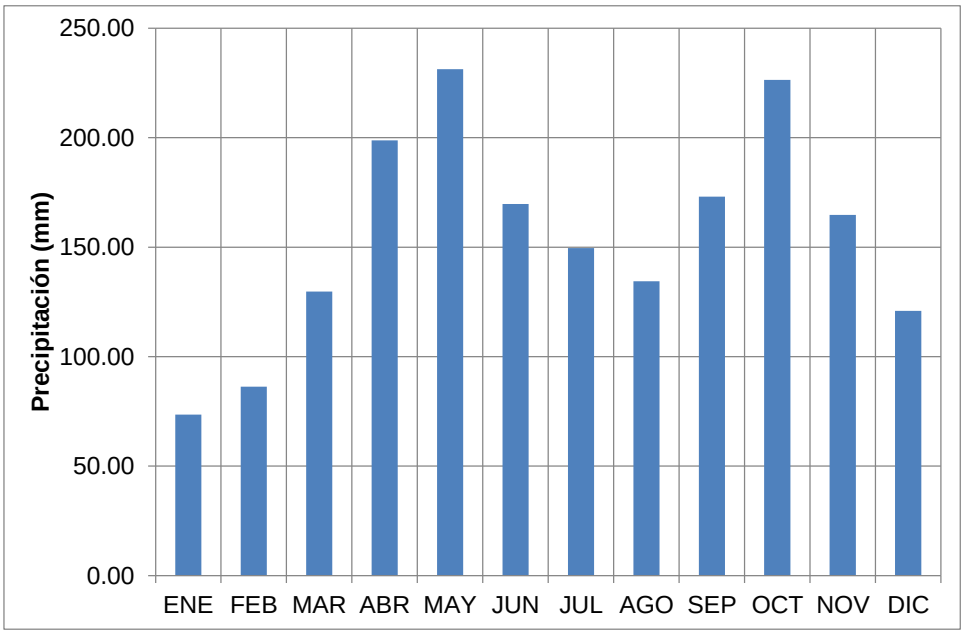



Figura 3-17 - Variación mensual multianual estación Apto Olaya Herrera (2701507).

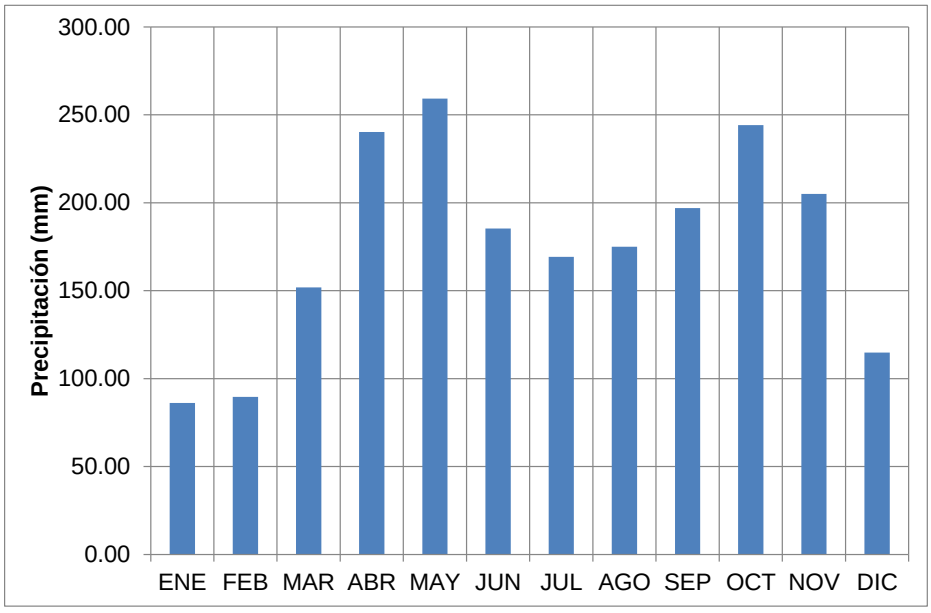



Figura 3-18 - Variación mensual multianual estación Apto José María Córdova (2308520).

## Evapotranspiración

La evapotranspiración depende fundamentalmente de condiciones climáticas que a su vez son función de las características físicas de la atmósfera que se encuentra cerca al suelo y a la vegetación, además depende de la calidad del agua y área de la superficie del agua.

En la determinación de esta variable existen varios métodos empíricos, la mayoría de ellos basados en fórmulas que han sido obtenidas en condiciones climáticas diferentes a las tropicales, sin embargo, debido a la escasa información en las cuencas de nuestra región, han sido ampliamente utilizado en nuestro medio. Se utilizaron dos metodologías; Turc y Cenicafé (UNAL, 2000), las cuales dependen principalmente de la elevación, precipitación y temperatura.

En la siguiente figura se muestra el campo de temperatura obtenido mediante estimación indirecta según la ecuación propuesta por Cenicafé (Chávez y Jaramillo, 1998) y el campo de evapotranspiración obtenida mediante Turc. En la metodología propuesta por Cenicafé, para estimar la temperatura, se regionaliza esta variable con la altura sobre el nivel del mar a partir de registros de temperatura media mensual en superficie para diferentes regiones geográficas en el país, en este caso la región que cubre la zona de interés corresponde a la región andina.

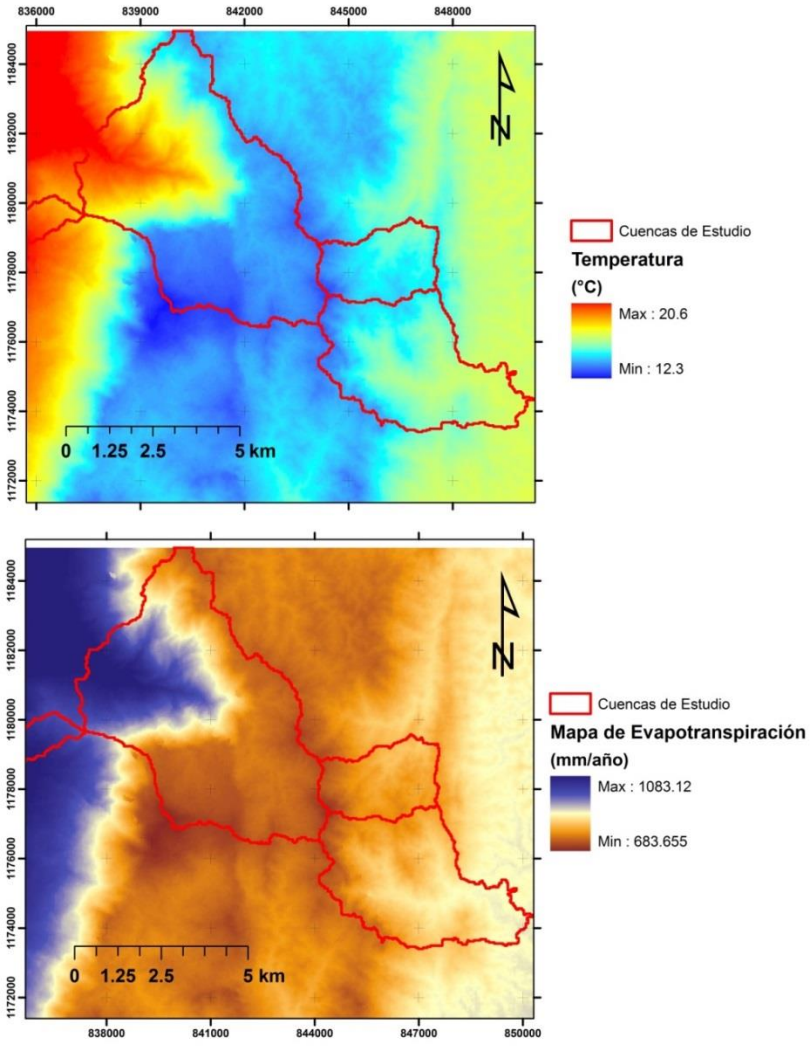



Figura 3-19 - Campos de Temperatura y Evapotranspiración

Como es de notar la temperatura posee un valor mínimo de 12.3°C en la zona del valle de San Nicolás y máxima de 20.6°C en el cañón de la quebrada la Santa Elena, a la entrada al valle de

Aburrá y al igual que la evapotranspiración, es máxima en las zonas más cercanas al nivel del mar. Es importante tener en cuenta los alcances de la metodología implementada, ya que son estimaciones ampradas en la poca información climatológica disponible en la zona. Sin embargo, las estimaciones obtenidas son concordantes con las variables medias esperadas en las zonas estudiadas. La temperatura media del municipio de Rionegro es de 17°C a una altura media de 2130 m.s.n.m[9]. La temperatura media estimada en la cota 2130 m.s.n.m es 16.4°C, lo cual ratifica que las estimaciones son concordantes con los valores reportados y los métodos son aceptables, por lo tanto la metodología puede ser aplicable.

### 3.2.4.3.3 Caudales base para el estudio

Dado que sobre las corrientes de estudio no existen mediciones directas de caudales, éstos fueron inferidos a partir de mediciones realizadas sobre la quebrada Piedras Blancas en la estación limnigráfica Piedras Blancas de Empresa Públicas de Medellín. Lo anterior se realizó debido a que la cuenca de la quebrada Piedra Blancas se encuentra muy cerca de las cuencas de estudio tan cómo se presenta en la siguiente figura

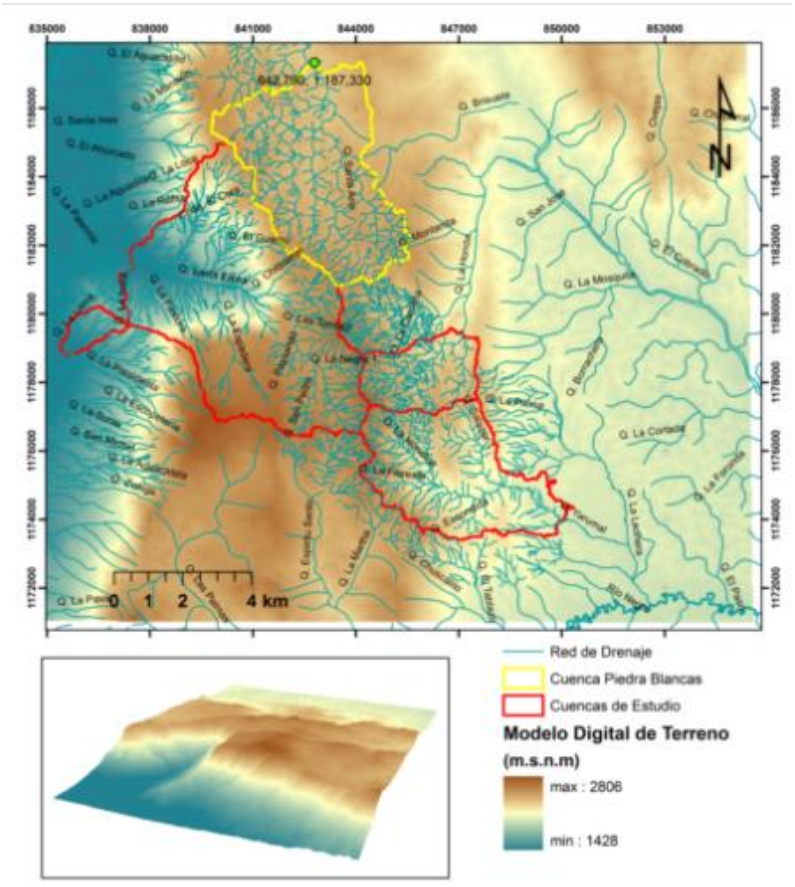



Figura 3-20 - Variación interanual de los caudales medios, máximos y mínimos estación Piedras Blancas.

[9] (http://www.rionegro.gov.co/datos-del-Municipio-de-Rionegro visitada el 03/07/2013)

Adicionalmente, el ciclo anual de caudales presenta similitudes con el ciclo anual de precipitación de las estaciones en la zona de estudio, obtenidos en las estaciones meteorológicas del IDEAM, lo cual se muestra en la figura.

En la siguiente figura se presenta la variación intranual de caudales medios mensuales el sitio Piedras Blancas sobre la quebrada Piedras Blancas y los respectivos valores extremos máximos y mínimos en la estación, para el período 1993 a 2012.

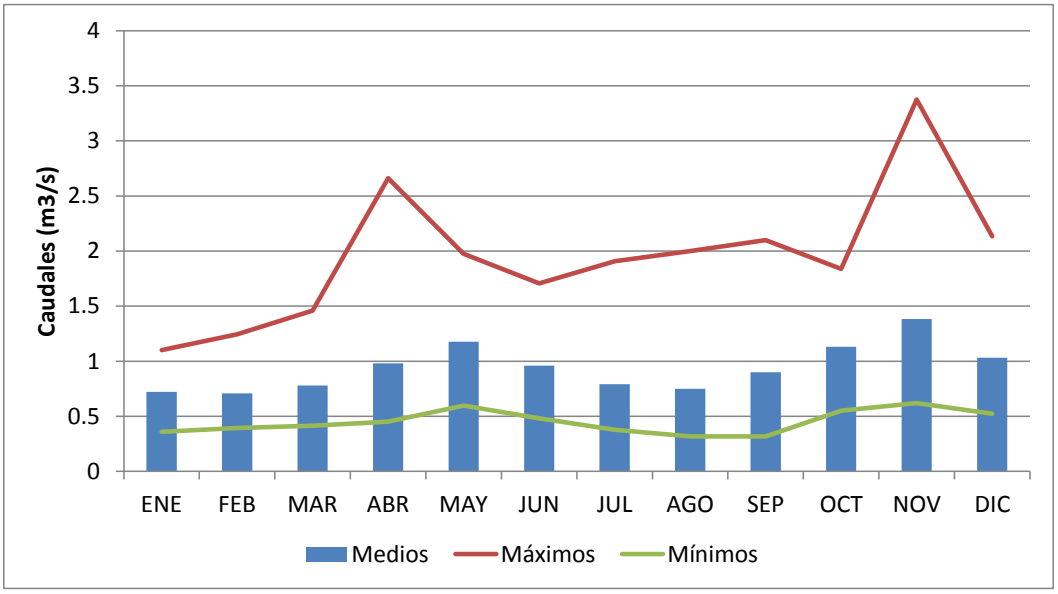



Figura 3-21 - Variación interanual de los caudales medios, máximos y mínimos estación Piedras Blancas

Se resalta el carácter bimodal del comportamiento de los caudales mensuales multianuales medidos en la estación limnigráfica Piedras Blancas. La quebrada Piedras Blancas está caracterizado por altos aportes de caudal en los meses de mayo y noviembre y veranos marcados en los meses de marzo y agosto. Por ser una quebrada de montaña presenta dispersión marcada entre los valores históricos de caudales mensuales máximos y mínimos.

En la siguiente tabla se presenta el comportamiento adimensional esperado de las corrientes de las cuencas de estudio, según la información trasladada de la quebrada Piedras Blancas, según la información de la estación Piedras Blancas. El rendimiento estimado para la estación Piedras Blancas es de 45 l/s/km2, valor esperado en las cuencas del valle de San Nicolás, el cual es obtenido después de dividir el caudal medio (943l/s) entre el área de la cuenca (21 km2).

Tabla 3-54 - Ciclo anual de caudales adimensionales de la estación Piedras Blancas

| | ENE | FEB | MAR | ABR | MAY | JUN | JUL | AGO | SEP | OCT | NOV | DIC |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Q/Qmed Piedras Blancas | 0.77 | 0.75 | 0.83 | 1.04 | 1.25 | 1.02 | 0.84 | 0.80 | 0.95 | 1.20 | 1.47 | 1.09 |

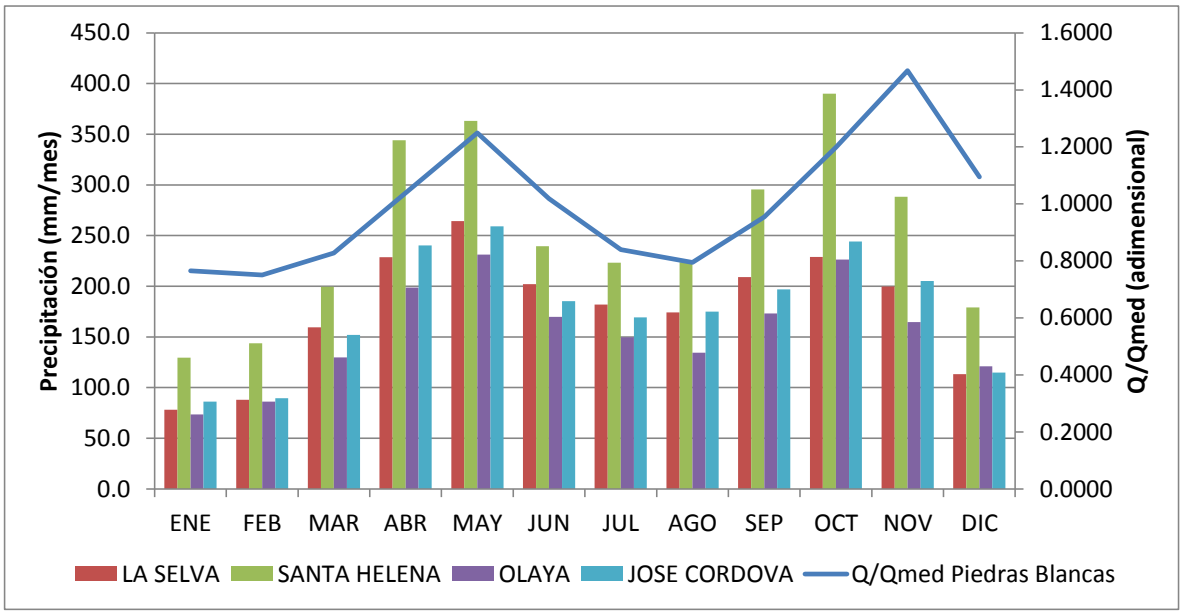



Figura 3-22 - Comportamiento adimensional esperado en las cuencas de estudio

Debido a la similitud hidrológica entre las estaciones de precipitación, la cual se muestra en la Figura 3.10, se asume que la curva adimensional representa adecuadamente la hidrología en la zona de estudio.

#### *3.2.4.3.3.1 Caudales medios*

El caudal medio puede ser estimado siguiendo el principio del balance hidrológico en el largo plazo en el volumen de control suelo-atmósfera, el cual asume que la cantidad de agua almacenada en el suelo es aproximadamente constante o que el cambio es despreciable respecto a otras variables. Así, la escorrentía se puede expresar como la diferencia, también en largo plazo, de los campos promedios de evaporación y evapotranspiración.

El caudal medio en algún sitio específico de análisis se define como la escorrentía “R” multiplicada por el área “A” de la cuenca de drenaje y “R” se supone como escorrentía superficial debido a la dificultad de estimar el flujo neto del agua subterránea (Poveda et al, 2007).

La siguiente figura muestra un esquema del volumen de control donde se indican las variables del sistema. Las variables P, E, F y R tienen dimensiones de longitud por unidad de tiempo, o caudal por unidad de área; mientras que W y S tienen dimensiones de longitud, o sea, volumen por unidad de área.

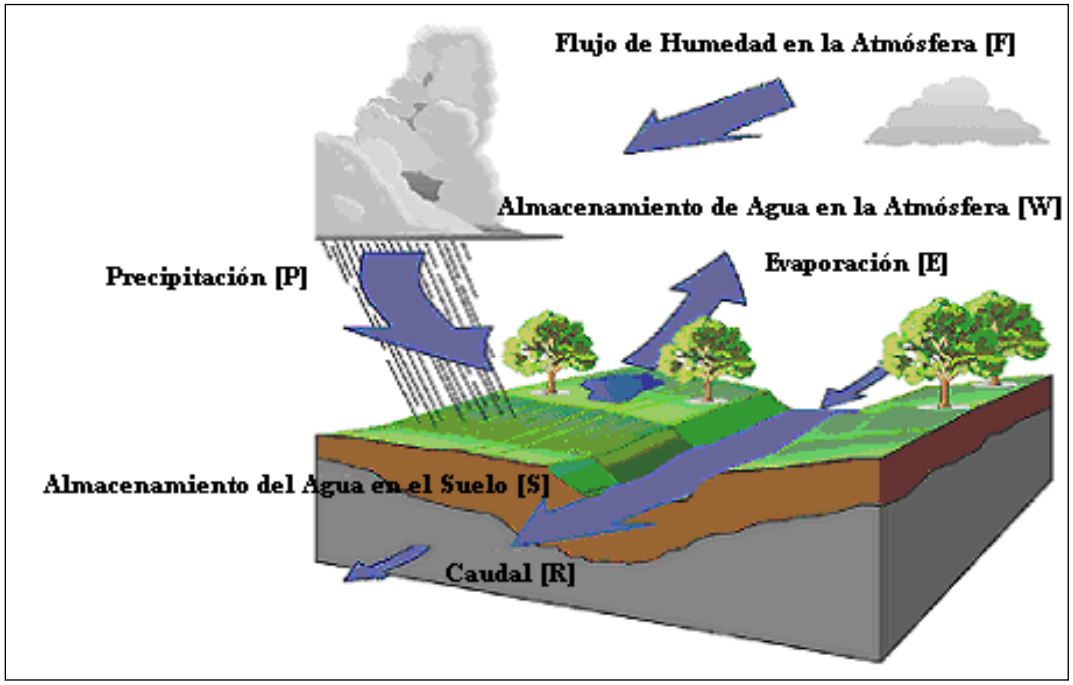



Figura 3-23 - Esquema del balance hidrológico sobre una cuenca (tomado de UNAL, 2005).

Al realizar el balance de masa en el volumen de control mostrado en la Figura anterior tanto para la columna atmosférica como para la columna del suelo y considerando la integración sobre un intervalo suficientemente largo en el tiempo, el cambio de las cantidades almacenadas E y S respecto al tiempo son insignificantes y por lo tanto se cumple que F = R, es decir el influjo atmosférico es igual al promedio de largo plazo de la escorrentía neta R. La ecuación que define por lo tanto el caudal medio es Q = (P - E) x A.

En la siguiente tabla se presenta el cálculo de los caudales medios para las cuencas principales, es decir, para las cuencas Yerbabuena, Santa Elena, Yarumal y la cascada.

Tabla 3-55 - Caudales medios para las cuencas Principales de la zona de estudio

| CUENCA | Precipitación media (mm/año) | Evapotranspiración media (mm/año) | Área ($km^2$) | Q medio ($m^3/s$) | Q medio (l/s) | Rendimiento ($l/s/km^2$) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Yerbabuena | 2178.79 | 988.38 | 1.4 | 0.0523 | 52.34 | 37.75 |
| Santa Elena | 2392.73 | 813.98 | 34.3 | 1.7171 | 1717.12 | 50.06 |
| Yarumal | 2243.8 | 803.05 | 15.5 | 0.7081 | 708.13 | 45.69 |
| La Cascada | 2271.64 | 771.63 | 6.2 | 0.2949 | 294.90 | 47.56 |

Acorde con el estudio de Geodata, la evapotranspiración media en la cuenca de la Q. Santa Elena es de unos 900 mm/año. De la tabla anterior se puede apreciar como el rendimiento de las cuencas que se encuentran en el valle de San Nicolás presentan, en promedio, 45.27l/s/$km^2$, valor característico de las cuencas de esta zona.

### *3.2.4.3.3.2 Caudales mínimos.*

Con la información secundaria con la que se contaba, se realizó el cálculo de los caudales mínimos, mediante dos metodologías distintas, con el fin de poder comparar los resultados. Las

metodologías empleadas son: METODO I y METODO III de regionalización de características medias para todo el departamento de Antioquia (EPM, 2005).

$$Qtr = \mu + K_{tr} * \sigma$$

Donde μ y δ se calcularon mediante dos métodos:

### METODO I: regionalización para todo el departamento de Antioquia

Este modelo fue ajustado teniendo en cuenta 30 cuencas hidrográficas que cuentan con estaciones hidrométricas instaladas por Empresas Públicas de Medellín o por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales en el departamento, con registros de caudales de más de 15 años de longitud, con tamaños de drenaje desde 3.5 $Km^2$, en la quebrada Chorrillos (sector de Piedras Blancas) hasta 29630 $Km^2$ en el río Cauca; precipitaciones medias anuales entre 1700 y 5000 mm; y longitudes de drenaje entre 2.1 y 742.8 Km. La media y la desviación estándar de los caudales mínimos, de acuerdo con este método, se estiman de la siguiente forma:

$$\mu = 0.01114 * A^{1.087}$$

$$\sigma = 0.002948 * A^{1.087}$$

### METODO IIIA: regionalización para todo el departamento de Antioquia

Este modelo fue ajustado teniendo en cuenta 77 cuencas hidrográficas que cuentan con estaciones hidrométricas instaladas por EE.PP.M o por el IDEAM en muchos ríos y quebradas de Antioquia, con registros de caudales de más de 15 años de longitud, con tamaños de drenaje desde 3.5 $Km^2$, en la quebrada Chorrillos (sector de Piedras Blancas) hasta 6093 $Km^2$ en el río Nechí; pendientes promedias de la corriente principal entre 0.59 y 18.27% precipitaciones medias anuales entre 1500 y 6200 mm; y longitudes de drenaje entre 2.1 y 846 Km. La media y la desviación estándar de los caudales mínimos, de acuerdo con este método, se estiman de la siguiente forma

$$\mu = 10^{-5.281} * A^{0.903} * Pma^{1.086}$$

$$\sigma = 10^{-5.257} * A^{0.944} * Pma^{0.9027}$$

Para el cálculo de caudales mínimos, se escogió la distribución de probabilidad Gumbel, ya que es la más recomendada para el cálculo de valores extremos.

El factor de frecuencia ($K_{Tr}$) de la distribución tipo Gumbel, para eventos mínimos se calcula como:

$$K_{Tr} = -\frac{\sqrt{6}}{\pi}\left(0{,}5772 + Ln\left(Ln\left(Tr\right)\right)\right)$$

Donde Tr es el periodo de retorno considerado

A continuación se muestra el resultado de los caudales mínimos para las cuencas principales, calculados con los métodos descritos anteriormente.

Tabla 3-56 - Caudales mínimos para las cuencas principales, calculado por el Método I y el Método III de la revista hidrometeorológica de EPM.

| Periodo de Retorno | Caudales mínimos (m³/s) | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Yerbabuena MI | Yerbabuena MIII | Santa Elena MI | Santa Elena MIII | Yarumal MI | Yarumal MIII | Cascada MI | Cascada MIII |
| 2 | 0.01470 | 0.03006 | 0.47575 | 0.53961 | 0.20064 | 0.24615 | 0.07410 | 0.10949 |
| 5 | 0.01257 | 0.03004 | 0.40677 | 0.45196 | 0.17155 | 0.20707 | 0.06336 | 0.09285 |
| 10 | 0.01138 | 0.03003 | 0.36837 | 0.40316 | 0.15535 | 0.18531 | 0.05738 | 0.08359 |
| 20 | 0.01027 | 0.03002 | 0.33245 | 0.35751 | 0.14020 | 0.16496 | 0.05178 | 0.07493 |
| 50 | 0.00963 | 0.03002 | 0.31154 | 0.33094 | 0.13138 | 0.15312 | 0.04853 | 0.06988 |
| 100 | 0.00909 | 0.03001 | 0.29404 | 0.30871 | 0.12400 | 0.14321 | 0.04580 | 0.06566 |
| 500 | 0.00809 | 0.03000 | 0.26190 | 0.26787 | 0.11045 | 0.12500 | 0.04079 | 0.05791 |

De la tabla anterior podemos apreciar que para una época de estiaje en las cuencas, el caudal de los ríos es muy bajo, incluso por efectos de infiltración del agua en el suelo, se podría está hablando de corrientes que se secan en algunas épocas del año. Esta escasez de agua es una problemática actual de las comunidades de esta zona.

#### *3.2.4.3.3.3 Caudales Máximos*

**Regionalización de las características medias**

Con base en las características geomorfológicas de una cuenca se pueden inferir algunos aspectos de la respuesta hidrológica. La cuenca puede verse como el filtro que transforma lluvia en escorrentía. Se puede afirmar que existen relaciones entre las variables hidrológicas y los parámetros morfométricos, las cuales pueden dar una orientación cualitativa del comportamiento general de esas variables.

Una vez conocidas estas características medias, se pueden estimar y usar distribuciones de probabilidad de valores extremos, para definir caudales máximos asociados a diferentes períodos de retorno. Utilizando la expresión del factor de frecuencia (Chow, 1994). En el presente trabajo se utilizaron las ecuaciones de regionalización de los Balances Hidrológicos y atlas digital de Antioquia (UNAL y CTA, 2001: 8-7). Con la ecuación correspondiente a la zona ORIENTE:

$$\mu = 0.00590(P-E)^{0.7967} * A^{0.7130}$$

$$\sigma = 0.04533(P-E)^{0.4426} * A^{0.5922}$$

Donde μ representa la media de Qmax instantáneos y σ la desviación estándar. De otro lado, P, E y A representan la precipitación, evapotranspiración y área de la cuenca respectivamente.

Tabla 3-57 - Caudales máximos de las cuencas principales, calculados con las ecuaciones de regionalización de los Balances hidrológicos y atlas digital de Antioquia

| Periodo de Retorno (años) | Factor de Frecuencia | GUMBEL (m3/s) | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | Yerbabuena | Santa Elena | Yarumal | Cascada |

| Periodo de Retorno (años) | Factor de Frecuencia | GUMBEL (m3/s) | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | Yerbabuena | Santa Elena | Yarumal | Cascada |
| 2 | -0.16422988 | 1.91 | 24.35 | 12.73 | 6.79 |
| 5 | 0.71950321 | 3.03 | 32.81 | 17.81 | 9.79 |
| 10 | 1.30461141 | 3.77 | 38.41 | 21.17 | 11.78 |
| 20 | 1.86586124 | 4.49 | 43.79 | 24.40 | 13.69 |
| 50 | 2.59234157 | 5.41 | 50.74 | 28.57 | 16.16 |
| 100 | 3.13673635 | 6.10 | 55.95 | 31.70 | 18.01 |

Se tomaron además las ecuaciones de regionalización de la cartilla Hidrológica de Antioquia para la ZONA DE EMBALSES:

$$\mu = 9.6354x10^{-7} * A^{0.120} * L^{0.829} * Pr^{1.865}$$

$$\sigma = 1.507x10^{-2} * A^{0.166} * L^{1.716} * So^{1.068}$$

Donde μ representa la media de Qmax instantáneos, σ la desviación estándar, Pr la precipitación media anual en mm, A área de la cuenca en $Km^2$, L longitud del cauce principal en Km, y So pendiente media del cauce principal en porcentaje.

Tabla 3-58 - Caudales máximos de las cuencas principales, calculados con las ecuaciones de regionalización de la cartilla hidrológica de Antioquia para la zona de embalses

| Periodo de Retorno (años) | Factor de Frecuencia | Qmax (m3/s) - GUMBEL | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | Yerbabuena | Santa Elena | Yarumal | Cascada |
| 2 | -0.164229876 | 3.38 | 18.07 | 13.24 | 7.21 |
| 5 | 0.719503208 | 4.70 | 37.55 | 20.38 | 9.97 |
| 10 | 1.304611405 | 5.57 | 50.44 | 25.11 | 11.80 |
| 20 | 1.865861236 | 6.41 | 62.81 | 29.64 | 13.55 |
| 50 | 2.592341572 | 7.50 | 78.82 | 35.51 | 15.82 |
| 100 | 3.136736352 | 8.31 | 90.81 | 39.91 | 17.52 |

### *3.2.4.3.3.4 Caudal Ecológico*

Para la estimación del caudal ecológico en fase I, en general se utilizó el régimen legal existente a nivel nacional para el cálculo del caudal ecológico, fundamentado en el Decreto Ley 2811 de 1974 y en los Decretos reglamentarios 1594 de 1984 y 1541 de 1978. De igual manera se utilizaron el Decreto 155 de 2004 y la Resolución 0865 de 2004 de Ministerio de Ambiente y Desarrollo Territorial, que determinan la reglamentación de los usos del agua y establecen unos factores de reducción de la oferta natural por efectos de caudal ecológico y calidad del agua.

En esta fase del estudio para el cálculo del caudal ecológico se adoptaron solo criterios hidráulicos e hidrológicos, dejando para la siguiente fase los métodos que tienen en cuenta la biota del cauce del río. Los métodos usados son:

- Porcentaje de descuento: El IDEAM ha adoptado como criterio para el cálculo del caudal ecológico un valor aproximado al 25 % del caudal medio mensual multianual más bajo de la corriente en estudio. El mes crítico de las corrientes en la zona de estudio, es febrero con un valor adimensional de 0.75, con lo cual el caudal ecológico corresponde al 18.8% del caudal medio multianual

Finalmente, en esta fase se adoptó un caudal ecológico del 18.8% del caudal medio en sitios de interés; a continuación se presentan los valores de caudal ecológico para los sitios de captación planteados.

En la siguiente tabla se muestran los caudales ecológicos de las cuencas principales de la zona de estudio.

Tabla 3-59 - Caudales Ecológicos de las cuencas principales de la zona de estudio

| Cuenca | Q ecológico ($m^3/s$) | Q ecológico (l/s) |
|---|---|---|
| Yerbabuena | 0.00992 | 9.92 |
| Santa Elena | 0.32226 | 322.26 |
| Yarumal | 0.13290 | 132.90 |
| Cascada | 0.05535 | 55.35 |

### 3.2.4.4 Evaluación hídrica ambiental

En este numeral, se realiza un análisis de caudales medios y ecológicos de las cuencas abastecedoras de agua para las bocatomas de los acueductos veredales presentes en la zona de estudio. Una vez estimados los diferentes caudales, se evaluó y determinó la oferta hídrica ambiental de las cuencas que abastecen a las población dentro del área de influencia directa del proyecto, para esto, se estableció el volumen de agua requerido para satisfacer las necesidades de consumo de agua generadas por el desarrollo de actividades socioeconómicas y el volumen de agua que garantice la conservación de la estructura, composición y funcionamiento del sistema ambiental.

Posteriormente, se estimó el cálculo del índice de escases para cada una de las cuencas, es decir, se evaluará la relación existente entre la oferta hídrica disponible y las condiciones de demanda predominante en la cuenca. Esta relación es una medida de los aprovechamientos de agua con relación a la disponibilidad de agua.

#### 3.2.4.4.1 Caudales medios y mínimos de las cuencas abastecedoras

A continuación se estiman los caudales medios y mínimos de las cuencas abastecedoras de los acueductos veredales.

##### *3.2.4.4.1.1 Caudales medios de las cuencas abastecedoras de los principales acueductos*

En la siguiente figura se muestra la ubicación de las captaciones de los acueductos de la zona. Para estimar los caudales medios en las cuencas abastecedoras (Bocatomas), se utiliza la misma metodología empleada para la estimación de caudales medios en las cuencas principales.

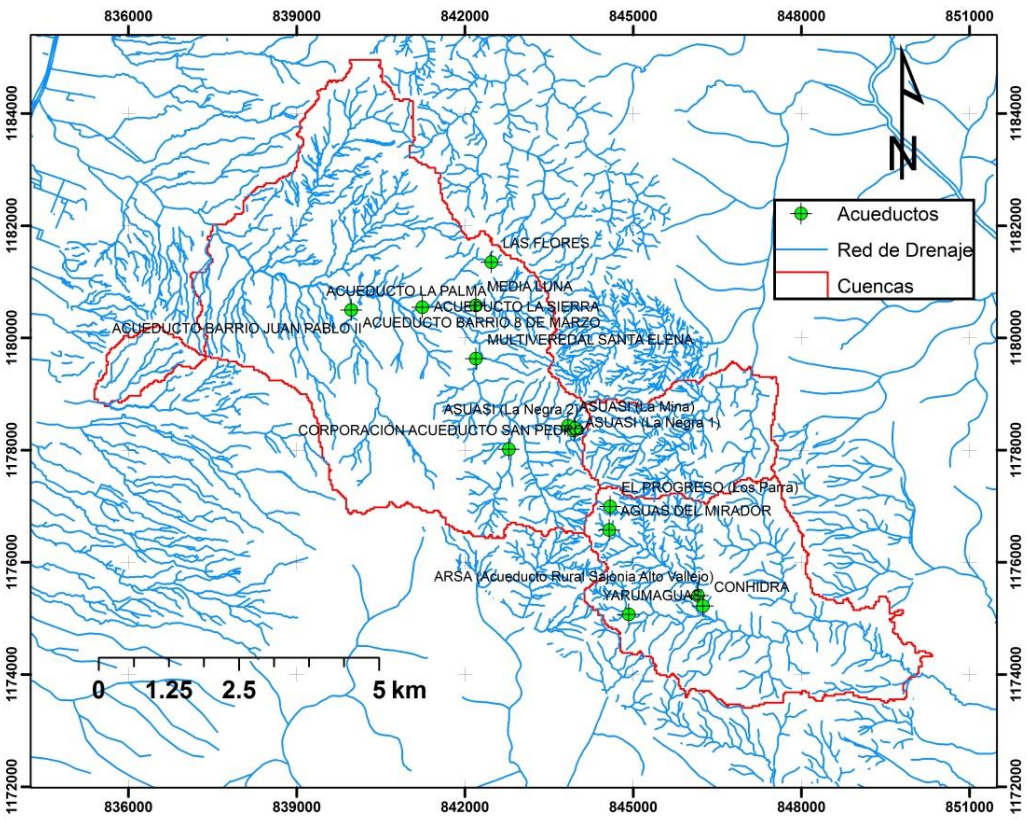



Figura 3-24 - Ubicación de los sitios de captación de los acueductos

En la siguiente tabla se muestra el resultado de los caudales medio de largo plazo de las captaciones de los acueductos de la zona de estudio. Cabe anotar, que los acueductos Juan Pablo II, 8 de Marzo, Barrios de Jesús y La Palma, tienen sus bocatomas una segunda de la otra, por lo tanto comparten la misma cuenca de estudio y por ende los mismo análisis sobre dicha cuenca.

Tabla 3-60 - Caudales medios estimados para las captaciones de los acueductos de la zona

| NOMBRE | Cuenca | ETR | PRECIPITACIÓN | ÁREA | Q medio | Q medio |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | (mm/año) | (mm/año) | (Km$^2$) | (m$^3$/s) | (L/s) |
| YARUMAGUAS | Yarumal | 734.0 | 2358.3 | 0.511 | 0.0263 | 26.30 |
| CONHIDRA | Yarumal | 807.2 | 2267.7 | 3.669 | 0.1699 | 169.93 |
| ARSA (Acueducto Rural Sajonia Alto Vallejo) | Yarumal | 773.1 | 2306.3 | 3.511 | 0.1707 | 170.71 |
| AGUAS DEL MIRADOR | Yarumal | 721.8 | 2332.8 | 0.049 | 0.0025 | 2.52 |
| CORPORACION ACUEDUCTO SAN PEDRO | Santa Elena | 731.4 | 2713.9 | 1.498 | 0.0942 | 94.19 |
| ASUASI (LA MINA) | Santa Elena | 725.0 | 2315.1 | 0.036 | 0.0018 | 1.83 |
| ASUASI | Santa | 720.4 | 2308.4 | 0.037 | 0.0019 | 1.87 |

| NOMBRE | Cuenca | ETR (mm/año) | PRECIPITACIÓN (mm/año) | ÁREA (Km²) | Q medio (m³/s) | Q medio (L/s) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Elena | | | | | |
| (LA NEGRA 1) | Santa Elena | | | | | |
| ASUASI | Santa Elena | 724.3 | 2309.3 | 0.017 | 0.0008 | 0.84 |
| (LA NEGRA 2) | Santa Elena | | | | | |
| MULTIVEREDAL SANTA ELENA | Santa Elena | 734.7 | 2522.9 | 7.017 | 0.3979 | 397.88 |
| MEDIA LUNA | Santa Elena | 736.8 | 2260.1 | 1.311 | 0.0633 | 63.31 |
| LAS FLORES | Santa Elena | 733.3 | 2174.4 | 0.116 | 0.0053 | 5.28 |
| JUAN PABLO II, 8 DE MARZO, BARRIOS DE JESUS Y LA PALMA | Santa Elena | 750.7 | 2825.1 | 0.438 | 0.288 | 28.80 |

#### *3.2.4.4.1.2 Caudales Ecológicos*

**Transposición de Caudales a las cuencas de interés**

En este punto se pretende aplicar la metodología de transposición de caudales para la obtención de un ciclo anual de caudales para las diferentes cuencas de estudio con base a la información de la estación limnigráfica Piedras Blancas (). Dado que se han calculado los parámetros Área, Precipitación y Evapotranspiración Real, se puede implementar el uso de esta técnica en la que se utiliza la siguiente expresión:

$$Qi = \frac{(Qmi)}{(QmT)} * Q_T$$

Donde los términos $Q_i$ y $Q_T$ son los caudales a definir y medidos, $Q_{mi}$ y $Q_{mT}$ son los caudales medios de largo plazo de la cuenca a definir y el caudal medio multianual de la cuenca instrumentada respectivamente

Con los resultados del balance hídrico para cada una de las cuencas de interés y con los datos adimensionales de la estación Piedras Blancas, se procedió a transponer los caudales de la estación Piedras Blancas a cada una de las cuencas de interés.

**Caudales transpuestos para las cuencas Principales**

En la siguiente tabla se muestran los caudales medios mensuales multianuales transpuestos de la estación Piedras Blancas, en cada una de las cuencas principales.

Tabla 3-61 - Caudales medios mensuales multianuales para las cuencas principales (m3/s)

| CUENCA | ENE | FEB | MAR | ABR | MAY | JUN | JUL | AGO | SEP | OCT | NOV | DIC |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Yerbabuena | 0.04 | 0.04 | 0.04 | 0.05 | 0.07 | 0.05 | 0.04 | 0.04 | 0.05 | 0.06 | 0.08 | 0.06 |

| CUENCA | ENE | FEB | MAR | ABR | MAY | JUN | JUL | AGO | SEP | OCT | NOV | DIC |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Santa Elena | 1.31 | 1.29 | 1.42 | 1.78 | 2.14 | 1.75 | 1.44 | 1.37 | 1.64 | 2.06 | 2.52 | 1.88 |
| Yarumal | 0.54 | 0.53 | 0.59 | 0.74 | 0.88 | 0.72 | 0.59 | 0.56 | 0.68 | 0.85 | 1.04 | 0.78 |
| Cascada | 0.23 | 0.22 | 0.24 | 0.31 | 0.37 | 0.30 | 0.25 | 0.23 | 0.28 | 0.35 | 0.43 | 0.32 |

## Caudales transpuestos para las cuencas abastecedoras de los acueductos

En la siguiente tabla se muestran los caudales medios mensuales multianuales transpuestos de la estación Piedras Blancas, en cada una de las cuencas principales.

Tabla 3-62 - Caudales medios mensuales multianuales para las cuencas abastecedoras de los acueductos (l/s)

| ACUEDUCTO | ENE | FEB | MAR | ABR | MAY | JUN | JUL | AGO | SEP | OCT | NOV | DIC | Promedio Anual (l/s) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| YARUMAGUAS | 20.1 | 19.8 | 21.8 | 27.3 | 32.9 | 26.8 | 22.1 | 20.9 | 25.1 | 31.5 | 38.6 | 28.8 | 26.3 |
| CONHIDRA | 130.1 | 127.6 | 140.6 | 176.6 | 212.3 | 173.0 | 142.7 | 135.1 | 162.2 | 203.7 | 249.3 | 186.1 | 169.9 |
| ARSA (Acueducto Rural Sajonia Alto Vallejo) | 130.7 | 128.2 | 141.3 | 177.4 | 213.2 | 173.8 | 143.4 | 135.7 | 162.9 | 204.6 | 250.5 | 186.9 | 170.7 |
| AGUAS DEL MIRADOR | 1.9 | 1.9 | 2.1 | 2.6 | 3.2 | 2.6 | 2.1 | 2.0 | 2.4 | 3.0 | 3.7 | 2.8 | 2.5 |
| CORPORACION ACUEDUCTO SAN PEDRO | 72.1 | 70.7 | 78.0 | 97.9 | 117.7 | 95.9 | 79.1 | 74.9 | 89.9 | 112.9 | 138.2 | 103.1 | 94.2 |
| ASUASI (LA MINA) | 1.4 | 1.4 | 1.5 | 1.9 | 2.3 | 1.9 | 1.5 | 1.5 | 1.8 | 2.2 | 2.7 | 2.0 | 1.8 |
| ASUASI (LA NEGRA 1) | 1.4 | 1.4 | 1.6 | 2.0 | 2.4 | 1.9 | 1.6 | 1.5 | 1.8 | 2.3 | 2.8 | 2.1 | 1.9 |
| ASUASI (LA NEGRA 2) | 0.7 | 0.6 | 0.7 | 0.9 | 1.1 | 0.9 | 0.7 | 0.7 | 0.8 | 1.0 | 1.2 | 0.9 | 0.8 |
| MULTIVEREDAL SANTA ELENA | 304.6 | 298.7 | 329.3 | 413.4 | 497.0 | 405.2 | 334.1 | 316.4 | 379.7 | 476.9 | 583.8 | 435.6 | 397.9 |
| MEDIA LUNA | 48.5 | 47.5 | 52.4 | 65.8 | 79.1 | 64.5 | 53.2 | 50.3 | 60.4 | 75.9 | 92.9 | 69.3 | 63.3 |
| LAS FLORES | 4.1 | 4.0 | 4.4 | 5.5 | 6.6 | 5.4 | 4.4 | 4.2 | 5.1 | 6.3 | 7.8 | 5.79 | 5.2 |
| JUAN PABLO II/8 DE MARZO, BARRIOS DE JESUS Y LA PALMA | 22.1 | 21.6 | 23.8 | 29.9 | 36.0 | 29.3 | 24.2 | 22.9 | 27.5 | 34.5 | 42.3 | 31.5 | 28.8 |

## Caudales Ecológicos para las cuencas abastecedoras de los acueductos

En la siguiente tabla se muestran los caudales ecológicos de las cuencas principales de la zona de estudio:

Tabla 3-63 - Caudales Ecológicos de las captaciones de los acueductos dentro del área de influencia del túnel.

| NOMBRE | Q Ecológico (Ll/s) |
|---|---|
| YARUMAGUAS | 5.26 |
| CONHIDRA | 33.98 |
| ARSA (Acueducto Rural Sajonia Alto Vallejo) | 34.14 |

| NOMBRE | Q Ecológico (Ll/s) |
|---|---|
| AGUAS DEL MIRADOR | 0.50 |
| CORPORACION ACUEDUCTO SAN PEDRO | 18.83 |
| ASUASI (LA MINA) | 0.36 |
| ASUASI (LA NEGRA 1) | 0.37 |
| ASUASI (LA NEGRA 2) | 0.16 |
| MULTIVEREDAL SANTA ELENA | 79.57 |
| MEDIA LUNA | 12.66 |
| LAS FLORES | 1.05 |
| JUAN PABLO II/8 DE MARZO, BARRIOS DE JESUS Y LA PALMA | 5.76 |

#### 3.2.4.4.2 Índice de escasez

Es conveniente evaluar la relación existente entre la oferta hídrica disponible y las condiciones de demanda predominante en la cuenca. Esta relación es una medida de los aprovechamientos de agua con relación a la disponibilidad de agua. El índice de presión, o índice de escasez (de que trata el Decreto 155 de 2004 del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial) responde a la siguiente ecuación:

$$IE = \frac{Demanda}{OfertaNeta} \times 100$$

En estos términos, el índice de escasez (IE) representa la demanda de agua que ejercen en su conjunto las actividades económicas y sociales para su uso y aprovechamiento frente a la oferta hídrica disponible (neta). Es aplicable a todo territorio en que se pueda valorar las entradas y salidas de aguas superficiales. Y, tal como lo expresa el manual para su cálculo y análisis (IDEAM, 2004), adoptado por el Ministerio de Medio Ambiente (Resolución 0865 de 2004), en casos particulares puede ser evaluado “en sistemas de abastecimiento en los que sus fuentes abastecedoras pueden ser inconexas entre sí, pero en los cuales los elementos de entrada y salida de agua potencialmente aprovechable pueden ser cuantificadas”.

La oferta hídrica neta, se refiere al agua disponible una vez reducidas las demandas necesarias para mantener la salud de la fuente abastecedora (OEA, 2004), en términos prácticos, la reducción de la oferta hídrica total por causa de la calidad del agua y por caudal mínimo ecológico (República de Colombia, 2004).

Para estimar la demanda, solo se cuenta con el agua otorgada por concesiones para cada una de las subcuencas abastecedoras de los acueductos.

Cabe anotar que el índice de escases se realizó tanto para las cuencas principales, como para las cuencas abastecedoras de los diferentes acueductos.

##### *3.2.4.4.2.1 Índice de escasez para las cuencas principales*

En la siguiente tabla se muestran los caudales ecológicos de las cuencas principales de la zona de estudio.

Tabla 3-64 - Índice de escases para las cuencas principales de la zona de estudio

| Cuenca | Q medio (l/s) | Q eco (l/s) | Oferta Qmed - Qeco (l/s) | Demanda Usuarios Concesionados (l/s) | Demanda Usuarios No concesionado (l/s) | Demanda de acueductos (l/s) | Demanda Total (L) | Índice de Escasez (%) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Yerbabuena | 52.85 | 9.92 | 42.93 | 2.51 | | | 2.51 | 5.85 |
| Santa Elena | 1717.12 | 322.26 | 1394.86 | 106.81 | 4.58 | 37.76 | 149.15 | 10.69 |
| Yarumal | 708.13 | 132.90 | 575.23 | 1.47 | 0.32 | 63.20 | 64.99 | 11.30 |
| Cascada | 294.90 | 55.35 | 239.56 | 0.52 | 0.35 | | 0.87 | 0.36 |

De acuerdo con la metodología IDEAM, 2004, el índice de escasez se puede definir el las siguientes categorías:

Tabla 3-65 - Índice de escasez

| Categoría del índice de escasez | Porcentaje de la oferta hídrica utilizada | Explicación |
|---|---|---|
| Alto | >40% | Existe fuerte presión sobre el recurso hídrico, denota una urgencia máxima para el ordenamiento de la oferta y la demanda. En estos casos la baja disponibilidad de agua es un factor limitador del desarrollo económico. |
| Medio | 20-40% | Cuando los límites de presión exigen entre el 20 y el 40% de la oferta hídrica disponible es necesario el ordenamiento tanto de la oferta como de la demanda. Es menester asignar prioridades a los distintos usos y prestar particular atención a los ecosistemas acuáticos para garantizar que reciban el aporte hídrico requerido para su existencia. Se necesitan inversiones para mejorar la eficiencia en la utilización de los recursos hídricos. |
| Moderado | 10-20% | Indica que la disponibilidad de agua se está convirtiendo en un factor limitador del desarrollo. |
| Bajo | <10% | No se experimentan presiones importantes sobre el recurso hídrico |

Las cuencas Yerbabuena y Cascada presentan un índice de escasez Bajo (menor del 10%), lo que significa que en estas cuencas no se experimentan presiones importantes sobre el recurso hídrico, en términos de cantidad de agua.

Las cuencas Santa Elena y Yarumal presentan un índice de escasez Moderado (entre el 10% y el 20%), lo que significa que la disponibilidad de agua se está convirtiendo en un factor limitador del desarrollo, por lo tanto, se sugiere que, para precisión de los resultados y toma de decisiones de la corporación, se instalen sistemas de monitoreo sobre los cursos de agua con el objetivo de realizar una reglamentación, seguimiento y control del uso del agua, ya que cada una de las cuencas analizadas carecen de dichas actuaciones.

### *3.2.4.4.2.2 Índice de escasez para las cuencas abastecedoras de los acueductos*

En la siguiente tabla se muestran los caudales ecológicos de las cuencas principales de la zona de estudio.

Tabla 3-66 - Índice de escases para las captaciones de los acueductos dentro de la zona de influencia del túnel.

| NOMBRE | Cuenca | Q medio (L/s) | Q Ecológico (L/s) | Oferta (Qmedio – Qeco)(L/s) | Demanda (L/s) | Índice de escasez (%) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| YARUMAGUAS | YARUMAL | 26.30 | 5.26 | 21.04 | 5.30 | 25.19 |
| CONHIDRA | YARUMAL | 169.93 | 33.99 | 135.95 | 35.00 | 25.75 |
| ARSA (Acueducto Rural Sajonia Alto Vallejo) | YARUMAL | 170.71 | 34.14 | 136.57 | 22.00 | 16.11 |
| AGUAS DEL MIRADOR | YARUMAL | 2.52 | 0.50 | 2.02 | 0.90 | 44.38 |
| CORPORACION ACUEDUCTO SAN PEDRO | SANTA ELENA | 94.19 | 18.84 | 75.36 | 9.05 | 12.00 |
| ASUASI (LA MINA) | SANTA ELENA | 1.84 | 0.37 | 1.47 | 4.84 | 329.64 |
| ASUASI (LA NEGRA 1) | SANTA ELENA | 1.88 | 0.38 | 1.50 | 4.84 | 322.11 |
| ASUASI (LA NEGRA 2) | SANTA ELENA | 0.84 | 0.17 | 0.68 | 4.84 | 716.50 |
| MULTIVEREDAL SANTA ELENA | SANTA ELENA | 397.88 | 79.58 | 318.30 | 11.16 | 3.51 |
| MEDIA LUNA | SANTA ELENA | 63.31 | 12.66 | 50.65 | 1.01 | 1.99 |
| LAS FLORES | SANTA ELENA | 5.29 | 1.06 | 4.23 | 2.20 | 52.01 |
| JUAN PABLO II/8 DE MARZO, BARRIOS DE JESUS Y LA PALMA | SANTA ELENA | 28.80 | 5.76 | 23.04 | 10.03 | 43.53 |

De acuerdo con lo anterior, las cuencas abastecedoras de los acueductos Multiveredal Santa Elena y Media Luna, presentan un índice de escases Bajo (menor del 10%), lo que significa que en estas cuencas no se experimentan presiones importantes sobre el recurso hídrico, en términos de cantidad de agua.

Las cuencas abastecedoras de los acueductos ARSA y San Pedro presentan un índice de escases Moderado (entre el 10% y el 20%), lo que significa que la disponibilidad de agua se está convirtiendo en un factor limitador del desarrollo, por lo tanto, en cada una de las cuencas, se debe implementar un mejor sistema de monitoreo y seguimiento del agua y desarrollar proyecciones del recurso hídrico a corto y largo plazo.

Las cuencas abastecedoras de los acueductos Yarumaguas y Conhydra presentan un índice de escasez Medio (entre el 20% y el 40%), lo que significa que la oferta hídrica llega al límite máximo para atender en forma adecuada las demandas de agua. Es necesario el ordenamiento de la

cuenca hidrográfica e implementar la corrección inmediata en las reglamentaciones de las corrientes y usos del agua. Es menester asignar prioridades a los distintos usos y prestar particular atención a los ecosistemas acuáticos para garantizar que reciban el aporte hídrico requerido para su existencia

Las cuencas abastecedoras de los acueductos Aguas del Mirador, ASUASI (La Mina), ASUASI (La Negra 1), ASUASI (La Negra 2), Las Flores, Juan Pablo II, 8 de Marzo, Barrios de Jesús y La Palma presentan un índice de escasez Alto (Mayor del 40%), lo que significa que existe fuerte presión sobre el recurso hídrico, denota una urgencia máxima para intervenir y controlar la oferta y la demanda. Es insuficiente la oferta hídrica para atender la alta demanda de agua por los sectores productivos y se restringe el desarrollo económico. Se requieren fuertes inversiones económicas para mejorar la eficiencia en la utilización del agua en los sectores productivos y en los sistemas de abastecimiento de agua potable.

#### 3.2.4.4.3 Conflictos por uso del suelo

En este numeral se evalúa y analiza si existen dentro de las cuencas conflictos importantes por el uso del suelo, de forma tal que se puedan identificar algunos factores que puedan influir de manera directa sobre la oferta hídrica de cada una de las cuencas abastecedoras de los sistemas de acueducto.

En las siguientes figuras puede evidenciarse gráficamente lo mostrado en la siguiente tabla, adicionalmente, permite verse que algunos de los nacimientos de las quebradas abastecedoras de los acueductos veredales así como sus afluentes se encuentran en áreas con conflictos ligeros o severos, de igual manera aquellas que por definición aparecen ubicadas en áreas sin conflicto, al realizar una evaluación adicional se evidencia que se encuentran en zonas destinadas a usos agrícolas y pecuarios, entrando en conflicto con el uso final del recurso hídrico y aportando negativamente al proceso de regulación hídrica de dichas fuentes.

Cabe anotar que la información base para la elaboración de esta actividad proviene de la corporación complementándola con mapas e imágenes satelitales.

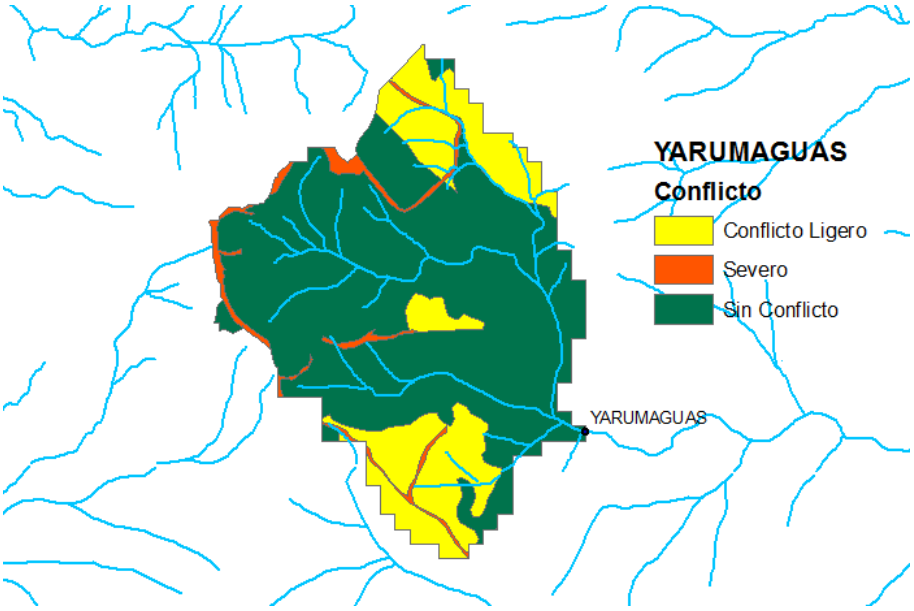



Figura 3-25 - 3 Mapa Conflictos por uso del suelo acueducto YARUMAGUAS

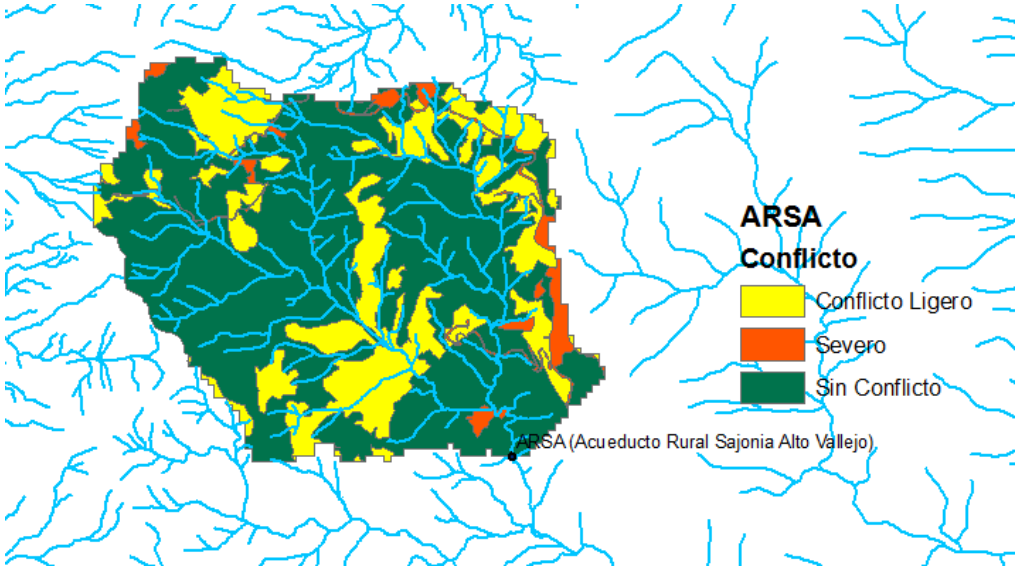



Figura 3-26 - Mapa Conflictos por uso del suelo acueducto ARSA

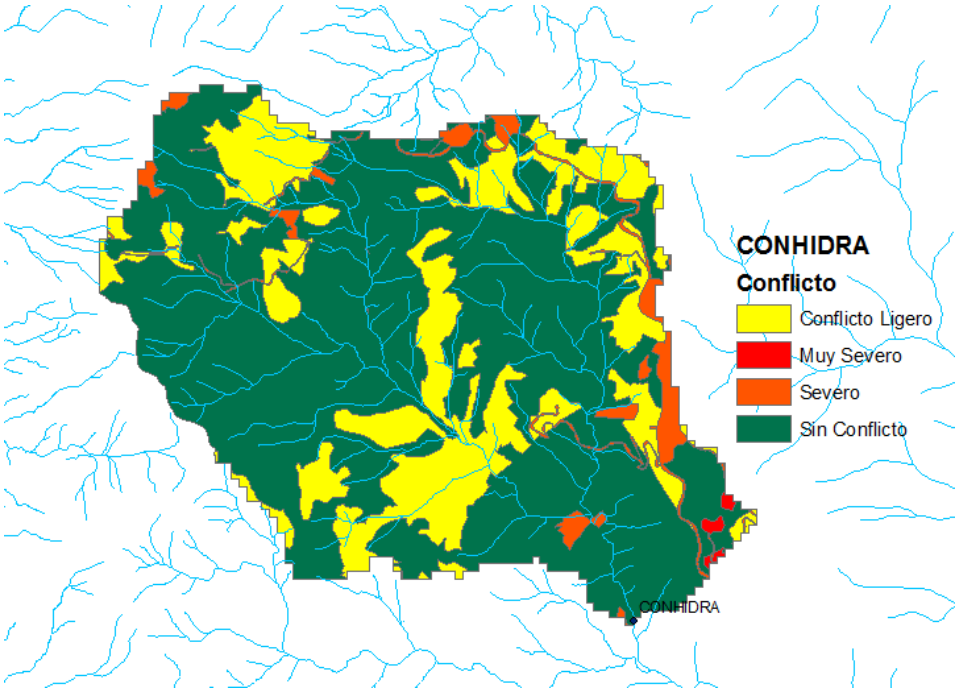



Figura 3-27 - Mapa Conflictos por uso del suelo acueducto CONHYDRA

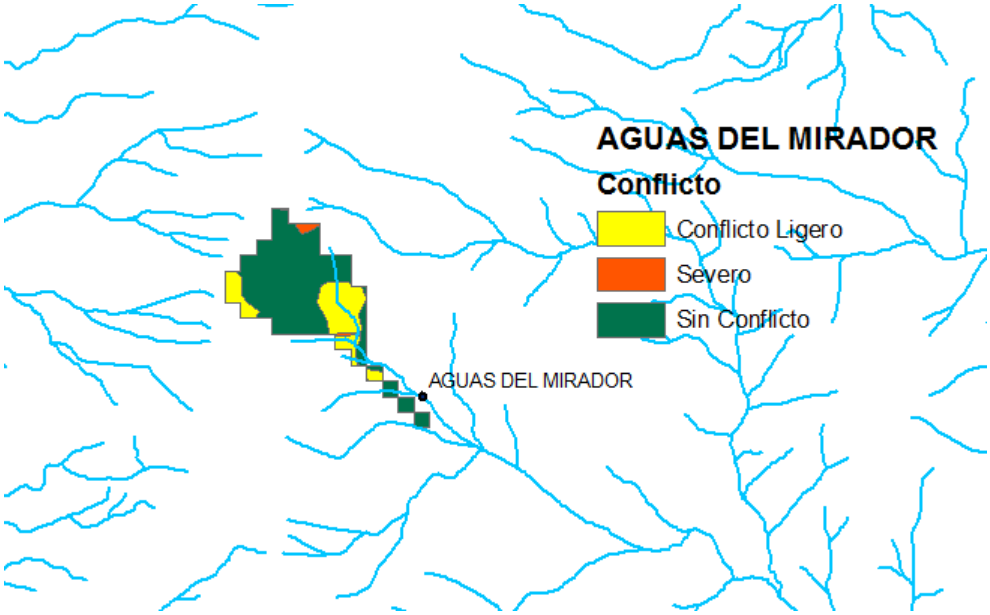



Figura 3-28 - Mapa Conflictos por uso del suelo acueducto Aguas del Mirador.

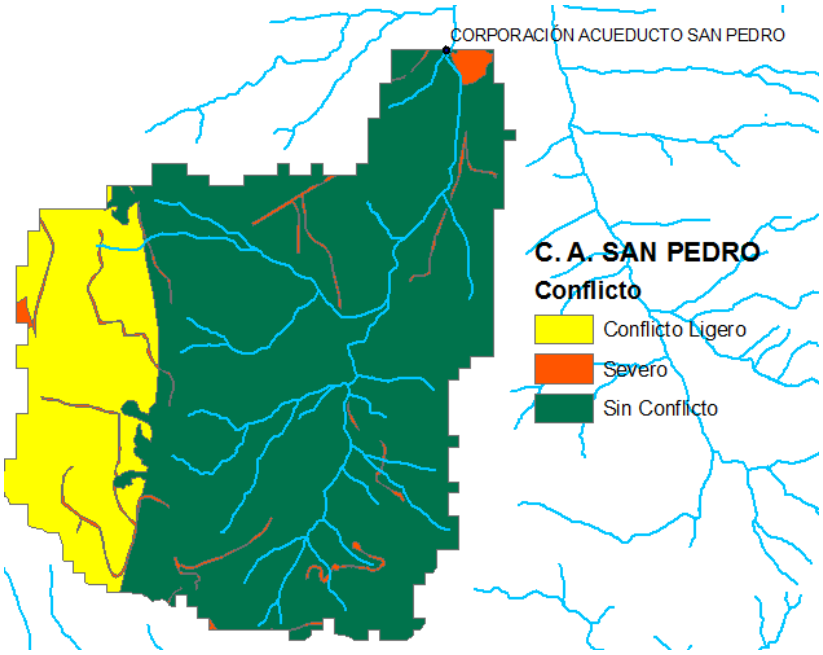



Figura 3-29 - Mapa Conflictos por uso del suelo acueducto Corporación Acueducto San Pedro

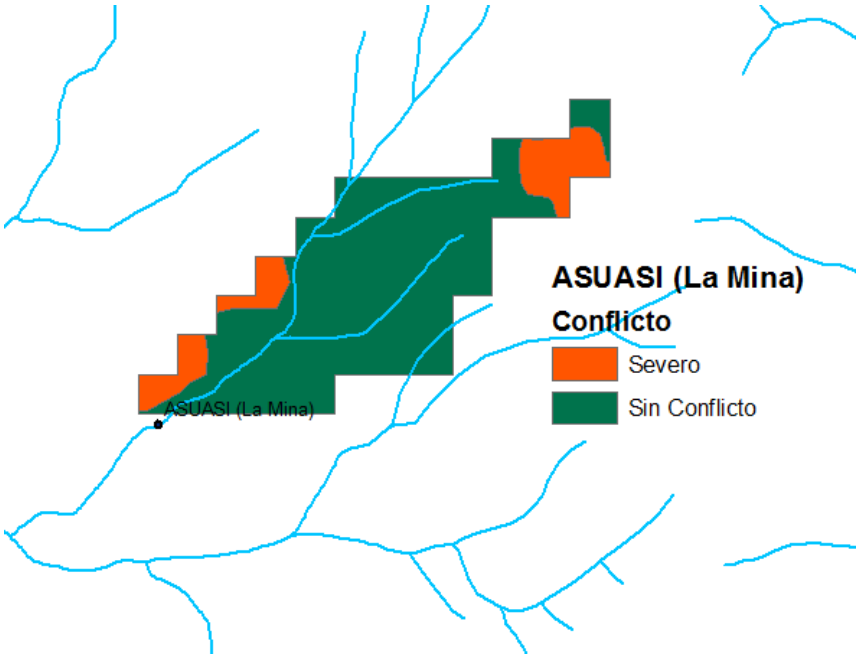



Figura 3-30 - Mapa Conflictos por uso del suelo acueducto ASUASI (La Mina).

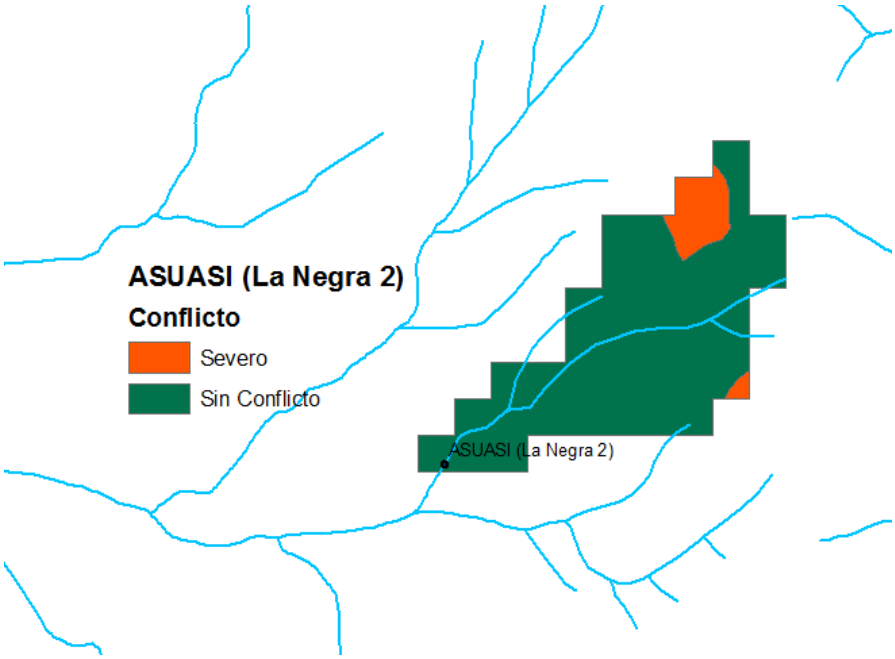



Figura 3-31 - 3 Mapa Conflictos por uso del suelo acueducto ASUASI (La Negra 2).

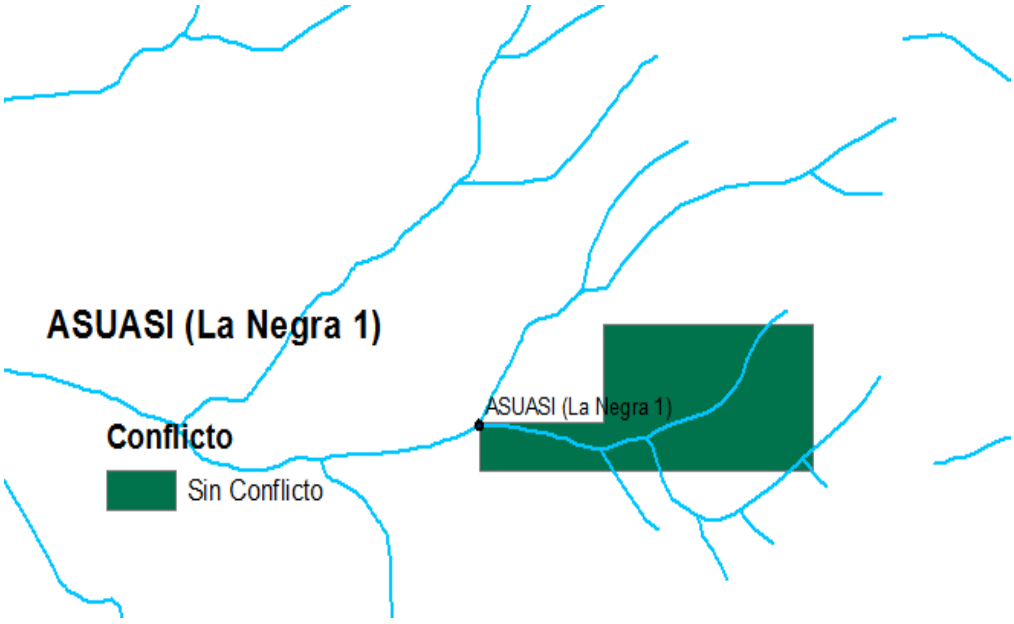



Figura 3-32 - Mapa Conflictos por uso del suelo acueducto ASUASI (La Negra 1).

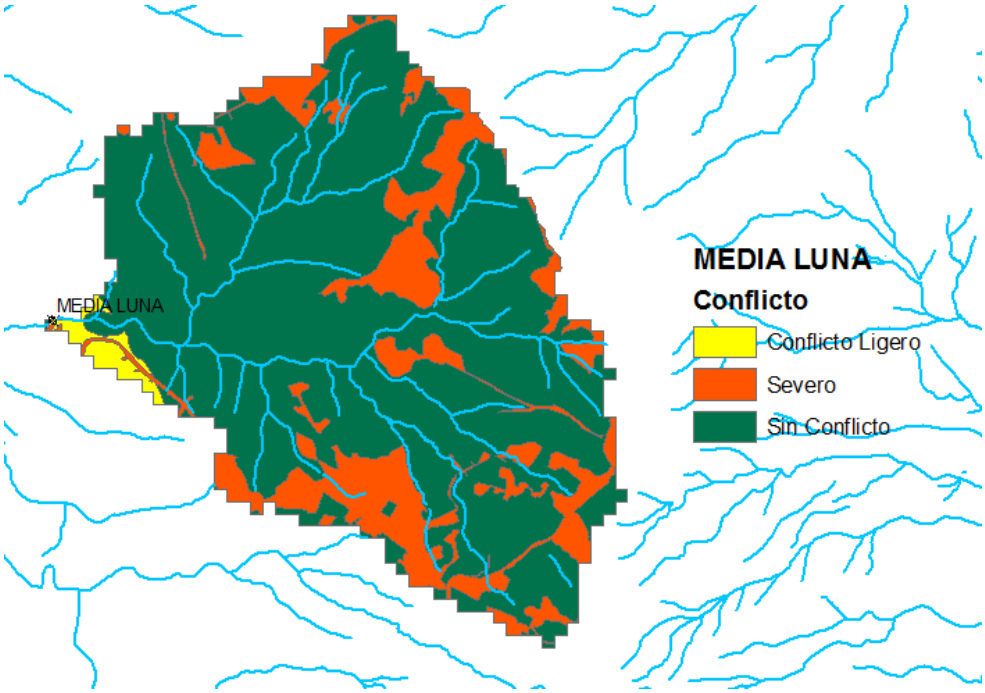



Figura 3-33 - Mapa Conflictos por uso del suelo acueducto Media Luna.

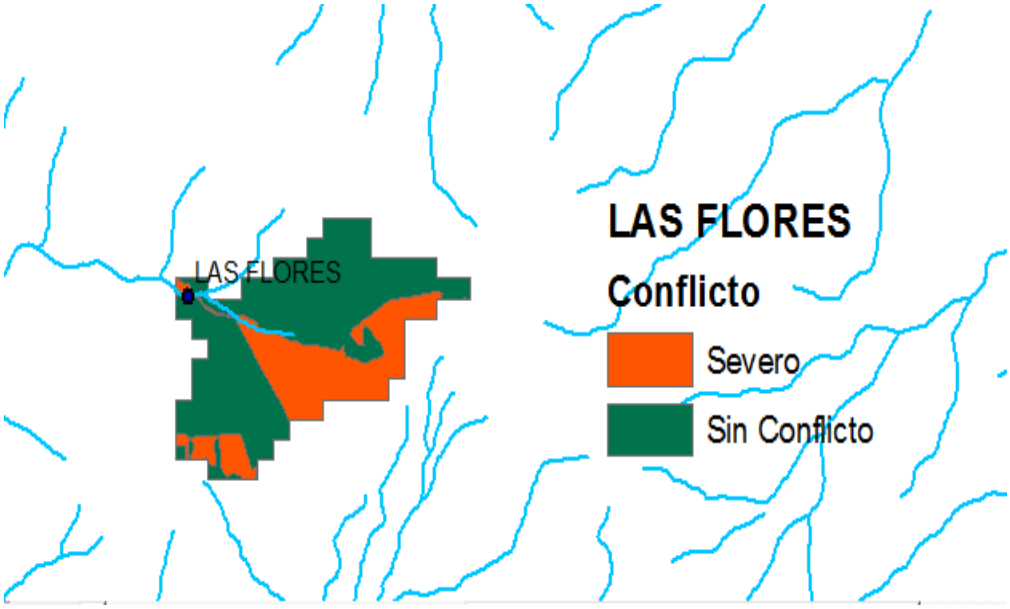



Figura 3-34 - Mapa Conflictos por uso del suelo acueducto Las Flores

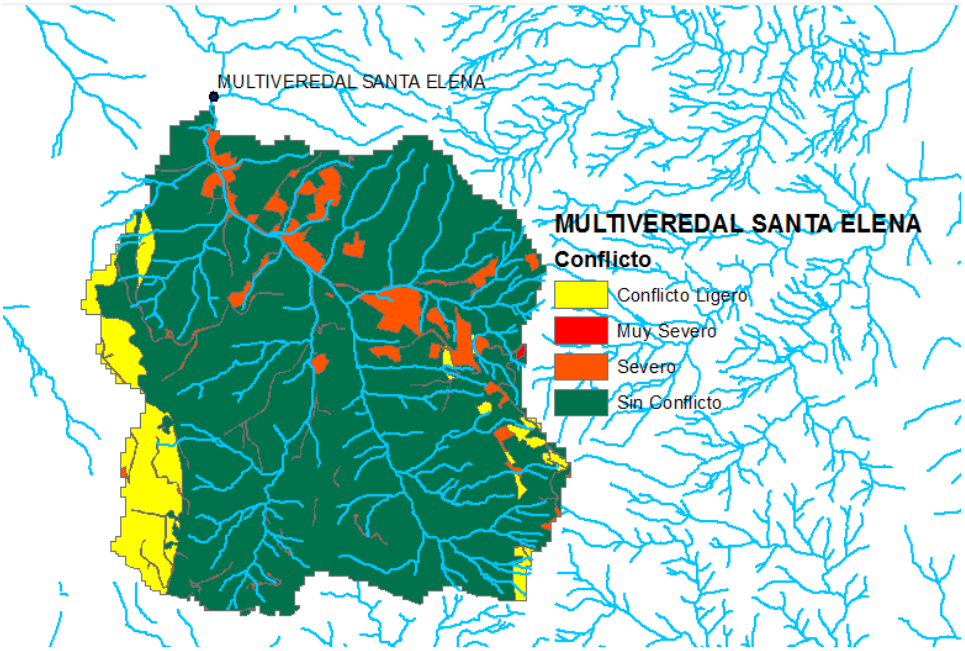



Figura 3-35 - Mapa Conflictos por uso del suelo acueducto Multiveredal Santa Elena

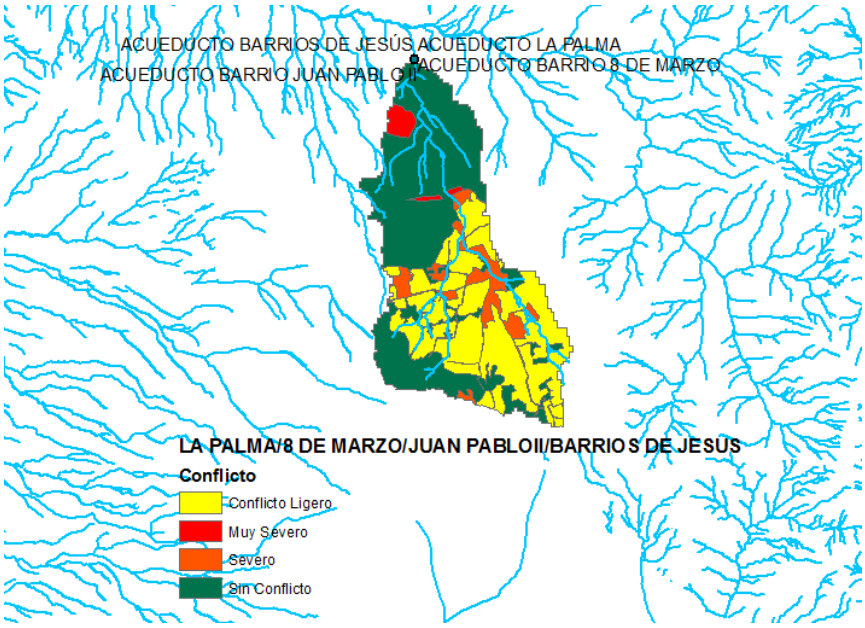



Figura 3-36 - Mapa Conflictos por uso del suelo acueducto La Palma/8 de Marzo/Juan Pablo II/ Barrios de Jesús.

.

Para una mejor compresión, los datos de tabulan tal como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 3-67 - Conflictos de usos del suelo en el área de influencia de los acueductos veredales

| ACUEDUCTO | TIPO DE CONFLICTO | AREA |
|---|---|---|

| | | Ha | % |
|---|---|---|---|
| YARUMAGUAS | Sin Conflicto | 35,92 | 73,60% |
| | Ligero | 11,09 | 22,70% |
| | Severo | 1,76 | 3,60% |
| | TOTAL | 48,78 | 100,00% |
| ARSA | Sin Conflicto | 246,56 | 70,70% |
| | Ligero | 87,97 | 25,20% |
| | Severo | 14,25 | 4,10% |
| | TOTAL | 348,78 | 100,00% |
| CONHYDRA | Sin Conflicto | 260,14 | 71,40% |
| | Ligero | 88,60 | 24,30% |
| | Severo | 14,84 | 4,10% |
| | Muy Severo | 0,99 | 0,30% |
| | TOTAL | 364,56 | 100,00% |
| AGUAS DEL MIRADOR | Sin Conflicto | 3,61 | 73,00% |
| | Ligero | 1,24 | 25,00% |
| | Severo | 0,10 | 2,00% |
| | TOTAL | 4,95 | 100,00% |
| SAN PEDRO | Sin Conflicto | 114,78 | 77,10% |
| | Ligero | 30,59 | 20,50% |
| | Severo | 3,53 | 2,40% |
| | TOTAL | 148,91 | 100,00% |
| ASUASI (La Mina) | Sin Conflicto | 3,07 | 84,20% |
| | Severo | 0,58 | 15,80% |
| | TOTAL | 3,64 | 100,00% |
| ASUASI (La Negra 2) | Sin Conflicto | 3,43 | 91,80% |
| | Severo | 0,31 | 8,20% |
| | TOTAL | 3,73 | 100,00% |
| ASUASI (La Negra 1) | Sin Conflicto | 1,68 | 100,00% |
| | TOTAL | 1,68 | 100,00% |
| MEDIA LUNA | Sin Conflicto | 102,72 | 78,70% |
| | Ligero | 1,79 | 1,40% |
| | Severo | 26,04 | 19,90% |
| | TOTAL | 130,55 | 100,00% |
| LAS FLORES | Sin Conflicto | 7,89 | 68,20% |
| | Severo | 3,69 | 31,80% |
| | TOTAL | 11,58 | 100,00% |
| SANTA ELENA | Sin Conflicto | 595,44 | 85,10% |
| | Ligero | 55,81 | 8,00% |
| | Severo | 48,15 | 6,90% |
| | Muy Severo | 0,30 | 0,04% |
| | TOTAL | 699,70 | 100,00% |
| LA PALMA/8 DE MARZO/JUAN PABLO II/ BARRIOS DE JESUS. | Sin Conflicto | 208,91 | 42,10% |
| | Ligero | 161,18 | 32,50% |
| | Severo | 35,28 | 7,10% |
| | Muy Severo | 90,99 | 18,33% |
| | TOTAL | 496,36 | 81,70% |

De acuerdo con las gráficas y las tablas anteriores, la evaluación del uso actual del suelo versus su uso potencial permite establecer que, para todas las cuencas de estudio, más del 70% de su área se encuentra bajo usos compatibles, es decir, no existe conflicto o este no es representativo para el área de influencia de los acueductos veredales.

Sin embargo, aunque el conflicto por el uso del suelo es reducido, debe considerarse que por ser un área de interés pública, definida por su importancia estratégica para la conservación del recurso hídrico de las fuentes abastecedores de los acueductos veredales, y dando cumplimiento a lo consignado en el artículo 111 de la ley 99 de 1993, dichas áreas deben estar destinadas a la protección y conservación de estos ecosistemas estratégicos.

Finalmente, es importante propender por una conversión de los usos del suelo hacia aquellos que de manera razonable permitan el aprovechamiento de los recursos naturales, garantizando la sostenibilidad ambiental de los acueductos.

### 3.2.4.5 Conclusiones

A lo largo del presente capítulo se han realizado conclusiones sobre los diferentes temas tratados, sin embargo, cabe resaltar las siguientes:

- Las cuencas de estudio son ovaladas, lo cual ratifica los factores de circularidad y elongación, lo que indicaría que el tiempo que tarda en llegar la onda de crecida a la desembocadura es poco, pero, al mismo tiempo, los caudales pico no son tan pronunciados. Gregory y Walling (1973), citado por González (2004), señalaron que cuanto más ovalada es una cuenca menos retardo existe entre el momento precipitación y el momento de crecida en la desembocadura, pero al mismo tiempo, menos acusada y súbita es la misma crecida, y por tanto menos alto el riesgo de inundaciones.
- La densidad de drenaje indica una amplia cobertura vegetal y litología más o menos dura, además de unas altas tasas de infiltración y alimentación del flujo subsuperficial, que favorece el incremento del tiempo de concentración y el atenuamiento de caudal punta.
- La variación de la precipitación en la zona de interés, va desde un máximo de 3019.7 mm/año en la centro de la zona de estudio, disminuyendo hasta un valor de 1781.8 mm/año en la zona noreste
- La temperatura posee un valor mínimo de 12.3°C en la zona del valle de San Nicolás y máxima de 20.6°C en el cañón de la quebrada la Santa Elena, a la entrada al valle de Aburrá y al igual que la evapotranspiración, es máxima en las zonas más cercanas al nivel del mar.
- El rendimiento de las cuencas que se encuentran en el valle de San Nicolás, es cercano a los 50 L/s/Km$^2$, valor característico de las cuencas de esta zona.
- El índice de escases (relación existente entre la oferta hídrica disponible y las condiciones de demanda predominantes en la cuenca), se realizó para las cuatro cuencas de la zona de estudio (Yerbabuena, Santa Elena, Yarumal y Cascada) y para las subcuencas generadas por la bocatoma de cada acueducto. Para las cuencas de la zona de estudio, el índice de escases se encontró entre bajo y moderado, debido a que la oferta hídrica total de la cuenca es mayor que la demanda total de la cuenca, sin embargo, para las subcuencas generadas de los acueductos, que es donde se aplican las encuestas, se encontraron algunas subcuencas con índice de escasez entre medio y alto debido a la gran presión sobre el recurso hídrico.

- Las cuencas Yerbabuena y Cascada presentan un índice de escasez Bajo (menor del 10%), lo que significa que en estas cuencas no se experimentan presiones importantes sobre el recurso hídrico, en términos de cantidad de agua.
- Las cuencas Santa Elena y Yarumal presentan un índice de escasez Moderado (entre el 10% y el 20%), lo que significa que la disponibilidad de agua se está convirtiendo en un factor limitador del desarrollo, por lo tanto, se sugiere que, para precisión de los resultados y toma de decisiones de la corporación, se instalen sistemas de monitoreo sobre los cursos de agua con el objetivo de realizar una reglamentación, seguimiento y control del uso del agua, ya que cada una de las cuencas analizadas carecen de dichas actuaciones.
- Las cuencas abastecedoras de los acueductos Multiveredal Santa Elena y Media Luna, presentan un índice de escases Bajo (menor del 10%), lo que significa que en estas cuencas no se experimentan presiones importantes sobre el recurso hídrico, en términos de cantidad de agua.
- Las cuencas abastecedoras de los acueductos ARSA y San Pedro presentan un índice de escases Moderado (entre el 10% y el 20%), lo que significa que la disponibilidad de agua se está convirtiendo en un factor limitador del desarrollo, por lo tanto, en cada una de las cuencas, se debe implementar un mejor sistema de monitoreo y seguimiento del agua y desarrollar proyecciones del recurso hídrico a corto y largo plazo.
- Las cuencas abastecedoras de los acueductos Yarumaguas y Conhydra presentan un índice de escasez Medio (entre el 20% y el 40%), lo que significa que la oferta hídrica llega al límite máximo para atender en forma adecuada las demandas de agua. Es necesario el ordenamiento de la cuenca hidrográfica e implementar la corrección inmediata en las reglamentaciones de las corrientes y usos del agua.
- Las cuencas abastecedoras de los acueductos Aguas del Mirador, ASUASI (La Mina), ASUASI (La Negra 1), ASUASI (La Negra 2) y Las Flores presentan un índice de escasez Alto (Mayor del 40%), lo que significa que existe fuerte presión sobre el recurso hídrico, denota una urgencia máxima para intervenir y controlar la oferta y la demanda.
- La evaluación del uso actual del suelo versus su uso potencial permite establecer que, para todas las cuencas de estudio, más del 70% de su área se encuentra bajo usos compatibles, es decir, no existe conflicto o este no es representativo para el área de influencia de los acueductos veredales.
- Aunque el conflicto por el uso del suelo es reducido, debe considerarse que por ser un área de interés pública, definida por su importancia estratégica para la conservación del recurso hídrico de las fuentes abastecedores de los acueductos veredales, y dando cumplimiento a lo consignado en el artículo 111 de la ley 99 de 1993, dichas áreas deben estar destinadas a la protección y conservación de estos ecosistemas estratégicos.
- Finalmente, es importante propender por una conversión de los usos del suelo hacia aquellos que de manera razonable permitan el aprovechamiento de los recursos naturales, garantizando la sostenibilidad ambiental de los acueductos.

### 3.2.5 Calidad del agua

Para el análisis de resultados de la calidad de las aguas que se presentan a continuación, se referenciaron características típicas de aguas crudas de zonas neotropicales y fuentes de alta montaña, datos estos extraídos de la literatura y de estudios propios de zonas similares, puesto que para este tipo de aguas no se cuenta con normas que describan o exijan un comportamiento

exacto, por no ser cuerpos de agua con usos definidos o con fines de potabilización. En la siguiente tabla se registran los valores típicos para aguas crudas superficiales de algunos de los parámetros examinados, y sobre los cuales fue realizado el análisis de las mismas.

Tabla 3-68 - Valores típicos en aguas crudas superficiales

| Parámetro fisicoquímico | Concentración en aguas crudas |
|---|---|
| Dureza cálcica (mg/l $CaCO_3$) | Concentración mínima admisible de 20 mg de CaCO3/L para mantener la vida acuática. Cuando tiene alcalinidades inferiores se vuelve muy sensible a la contaminación, ya que no posee la capacidad de oponerse a las modificaciones que generan disminuciones de pH |
| | <= 17 mg/l CaCO3 aguas blandas |
| | <= 60 mg/l CaCO3 aguas levemente duras |
| | <= 120 mg/l CaCO3 aguas moderadamente duras |
| | <= 180 mg/l CaCO3 aguas duras |
| | > 180 mg/l CaCO3 aguas muy duras |
| Cloruros (mg/l $Cl^-$) | 200 a 300 mg/litro valor típico de aguas crudas sin contaminación perceptible |
| Hierro Total (mg/l Fe) | Concentraciones que varían de 0,5 a 50 mg/litro son típicas de aguas crudas de tipo superficial. Concentraciones mayores a 0,3 mg/L limitan el uso de agua sin tratamiento previo para recreación, contacto consumo |
| Nitritos (mg/l $NO_2^-$) | 0.0 a 0.5 mg/l $NO_2$ aguas oligotróficas (aguas bien oxigenadas) |
| | 0.5 a 5.0 mg/l $NO_2$ aguas mesotróficas (aguas con niveles medios de oxigeno) |
| | 5.0 a 15.0 mg/l $NO_2$ aguas eutróficas (aguas con bajas concentraciones de oxigeno) |
| Oxígeno Disuelto (mg/l $O_2$) | 0 mg/l $O_2$ aguas anoxias, indican un alto grado de contaminación y por ende presencia nula de organismos aerobios |
| | 0 - 5 mg/l $O_2$ aguas hipoxias, indican un grado de contaminación medio y una tendencia a la desaparición de organismos de tipo aerobio |
| | 5-8 mg/l $O_2$ aguas aceptables, indican un grado de contaminación mínimo y unas condiciones óptimas para el desarrollo de vida en el agua |
| | 8 - 12 mg/l $O_2$ aguas buenas, indican contaminación casi imperceptible y condiciones más que óptimas para el desarrollo de vida en el agua |
| | > 12 mg/l $O_2$ aguas sobresaturadas, indican aguas en óptimas condiciones para la producción fotosintética y por ende aptas para la autopurificación en caso de ingreso de carga contaminante |
| pH (Unidades de pH) | Por lo general, las aguas naturales (no contaminadas) exhiben un pH en el rango de 5 a 9 |
| | pH < 5 implica materia orgánica en descomposición y cauces lentos, aguas acidas |
| | pH > 9 aguas alcalinas |

| Parámetro fisicoquímico | Concentración en aguas crudas |
|---|---|
| Sulfatos (mg/l $SO_4^{-2}$) | < 0.5 mg/L $SO_4^{-2}$ aguas sin presencia de descargas residuales |
| | 2.0 a 10.0 mg/L $SO_4^{-2}$ aguas típicas sin descargas de aguas residuales, su concentración es dada por el agua lluvia o por disolución de las rocas |
| Sólidos disueltos (mg/l SDT) | < 10 mg/l SDT aguas oligotróficas |
| | 10 a 200 mg/l SDT aguas mesotróficas |
| | > 200 mg/l aguas eutróficas |
| $DBO_5$/DQO | <0,2 poco biodegradable |
| | 0,2 - 0,4 biodegradable |
| | >0,4 muy biodegradable |

Fuente: Consorcio SIGA- PLYMA

El índice de Calidad del Agua ICAfa usado también para determinar la calidad de las fuentes, fue desarrollado por la National Sanitation Foundation en el año de 1970, este determina el grado de calidad de un determinado cuerpo hídrico y con él se pretende reconocer problemas de contaminación de una forma ágil.

El método de cálculo de este índice se fundamente en el uso de 9 parámetros que son el Oxígeno Disuelto (% saturación), Demanda Bioquímica de Oxígeno (mg/L), Nitrógeno Total (mg/L N), Fósforo Total (mg/L P), Sólidos Totales (mg/L), Turbiedad (UNT), Coliformes Fecales (NMP/100mL), pH (unidades de pH) y Temperatura (ºC). El Índice de Calidad del Agua ICA es calculado como la multiplicación de todos los nueve parámetros elevados a un valor atribuido en función de la importancia del parámetro.

En la tabla relacionada a continuación se registra el color correspondiente según el rango numérico en el que se ubique el valor calculado del ICAfa, así como la descripción del estado de la fuente de agua según el dato obtenido.

Tabla 3-69 - Valores de Índice de Calidad del Agua ICAfa

| Descriptores | Rango numérico | Color | Usos |
|---|---|---|---|
| Muy malo | 0 - 0,25 | | Restricciones para el contacto humano y limita vida acuática |
| Malo | 0,26 - 0,50 | | Restricciones para el contacto humano y limita vida acuática |
| Medio | 0,51 - 0,70 | | Restricciones para el contacto humano y limita vida acuática |
| Bueno | 0,71 - 0,90 | | Contacto humano, vida acuática |
| Excelente | 0,91 - 1,00 | | Contacto humano, vida acuática |

Fuente: Consorcio SIGA - PLYMA

### 3.2.5.1 Descripción de estaciones de muestreo

En el área de influencia directa (puntal, local) se encuentran cuatro cuencas: Yerbabuena, Santa Elena (incluyendo el tramo que cruza por la vía a cielo abierto), Cuenca Rionegro que incluye la cuenca Yarumal y Cuenca La Cascada, las cuales a su vez agrupan pequeñas subcuencas tributarias donde se ubicaron las estaciones de muestreo en toda el área de influencia del proyecto de Conexión Vial Aburrá Oriente y sus vías complementarias y sus vías complementarias. A

continuación se hace una descripción de cada punto muestreado agrupado según la subcuenca de la que hacen parte.

### Área de influencia directa puntual

Para el análisis de las fuentes hídricas se seleccionaron 19 puntos para el muestreo de los cuales 17 se ubican en zonas en las que se desarrollará algún tipo de obra y por tanto son susceptibles de afectación. Además, se tomaron 21 puntos más que corresponden a fuentes intermitentes.

Tabla 3-70- Estaciones muestreadas dentro del Área de Influencia Directa Puntual

| Cuenca | Subcuenca | Codigo | Nombre De La Quebrada | Referencia | Coordenadas | | | Q (L/S) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | X | Y | Z | |
| Yerbabuena | Yerbabuena | Ye1 | Q. La Grilla | Saliendo del seminario | 836596 | 1179781 | 1842 | 0,3 |
| | | Ye2 | Q. La Loma 2 | Puerta del seminario | 836073 | 1179703 | 1793 | 0,14 |
| Cielo Abierto | Vía Cielo abierto | CA1 | Q. La Espadera Aguas arriba del eje | | 839963 | 1180342 | 1946 | 96,2 |
| | | CA2 | Espadera aguas abajo | | 839986 | 1180522 | 1909 | 123,5 |
| | | CA3 | Q. El Chupadero aguas arriba | | 838993 | 1179949 | 2043 | 0,05 |
| | | CA4 | Q. Cañada negra | Predio de Jorge Uribe | 838824 | 1180110 | 1979 | 0,57 |
| | | CA5 | Q. La Pastora aguas abajo | | 838342 | 1180178 | 1911 | 1 |
| | | CA6 | Q. Marquetalia | Seminario | 837722 | 1179822 | 2004 | 0,33 |
| | | CA7 | Q. Caunces aguas arriba | Tambien llamada Cuchillon | 837763 | 1180087 | 1916 | 0,3 |
| | | CA8 | Q. Caunces aguas abajo | Tambien llamada Cuchillon | 837735 | 1180343 | 1846 | 0,8 |
| | | CA9 | Q. La India Aguas arriba | Rebose del tanque la pastora | 837154 | 1180331 | 1859 | 0,16 |
| | | CA10 | Q. La India Aguas abajo | Rebose del tanque la pastora | 837156 | 1180645 | 1804 | 3,7 |
| | | CA11 | Q. La Cangreja | Cultivo de Trucha | 836856 | 1180559 | 1820 | 1,2 |
| | | CA12 | Q. La Cangreja Aguas Abajo | Barrio Quinta Linda | 836880 | 1180657 | 1803 | 1,2 |
| Santa Elena | Santa Elena | SE23 | Q. La Aguadita (Portal Occidental) | Portal Occidental | 840971 | 1180302 | 2011 | 5,9 |
| | | SE24 | Q. La Bonanza (o Bocana) | Media Luna | 840729 | 1180317 | 2055 | 15,4 |
| Yarumal | Salazar | S8 | Q. Salazar o Sajonia portal oriental | Portal oriental | 847730 | 1175359 | 2205 | 133,2 |
| | | S9 | Afluente - Salazar | Vía doble calzada (finca Castanesa) | 848369 | 1175090 | 2200 | 2,1 |
| | | S10 | Confluencia Yarumal- Salazar | confluencia Yarumal - Salazar (vía doble calzada) | 848268 | 1175024 | 2190 | 508,5 |

Fuente: Consorcio Siga-Plyma

Tabla 3-71 - Fuentes Intermitentes dentro del Área de Influencia Puntual

| Zona | Código | Nombre | Coordenadas | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | X | Y | Z |
| Vía Cielo Abierto | R14 | Afluente a la espadera | 839885 | 1180224 | 2006 |
| | R15 | Q. Media Agua | 839307 | 1180073 | 2045 |
| | R16 | Q. Media Agua aguas abajo | 839232 | 1180127 | 1994 |
| | R17 | Q. El Chupadero aguas abajo | 838967 | 1180035 | 1980 |
| | R18 | Q. Sin Nombre 6 | 838781 | 1180117 | 1964 |
| | R19 | Q. Cañada Negra Aguas Abajo | 838699 | 1180203 | 1939 |
| | R20 | Q. La Pastora aguas arriba | 838390 | 1180100 | 1994 |
| | R21 | Q. La Pastorcita II | 838228 | 1180065 | 1915 |
| | R22 | Q. La Pastorcita | 838151 | 1180080 | 1913 |
| | R23 | Q. La Pulgarina | 837934 | 1180116 | 1884 |
| | R24 | Q. "Las Antenas" | 838051 | 1179719 | 2027 |
| | R25 | Q. Caunces | 837742 | 1180077 | 1877 |
| | R26 | afluene a Altavista | 837531 | 1180185 | 1868 |
| | R27 | Q. Altavista | 837516 | 1180195 | 1868 |
| | R28 | Seminario | 837454 | 1180294 | 1868 |
| | R29 | Q. Sin nombre 4 | 837384 | 1180291 | 1850 |
| | R30 | Q. Sin Nombre 3 | 837202 | 1180394 | 1843 |
| | R31 | Q. La Cangreja Aguas arriba | 836962 | 1180423 | 1826 |
| | R32 | Q. La Poblada | 838102 | 1178991 | 2088 |
| | R33 | Q. "Seminario 3" | 836436 | 1179841 | 1841 |
| | R34 | Q. La Loma Aguas abajo | 836166 | 1179796 | 1806 |

Fuente: Consorcio Siga-Plyma

## Área de influencia directa local

En esta área se encontraron 80 fuentes hídricas, de las cuales 67 son permanentes y 13 son intermitentes, tal como se puede observar en la siguiente tabla:

Tabla 3-72 - Fuentes de agua analizadas dentro del área de Influencia Directa Local

| Cuenca | Subcuenca | Codigo | Nombre De La Quebrada | Referencia | Coordenadas | | | Q (L/S) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | X | Y | Z | |
| Santa Elena | Santa Elena | SE1 | Q. Cerro Verde | Antes de la confluencia con Sta Elena | 843718 | 1176903 | 2605 | 6 |
| | | SE2 | "Afloramiento Q. Santa Elena" | Vereda El Cerro | 843495 | 1176942 | 2478 | 31,8 |
| | | SE3 | El cedro | Vereda El Cerro | 843466 | 1177265 | 2608 | 2,7 |
| | | SE4 | El cedro I | Vereda El Cerro | 843610 | 1177534 | 2608 | 2,5 |
| | | SE5 | Q. Santa Elena | Finca Villa Alejandra | 843121 | 1177785 | 2561 | 54,3 |
| | | SE6 | Q. La escorrentía. | Rancho Carrieles | 843515 | 1177962 | 2588 | 1,1 |
| | | SE7 | Confluencia San Ignacio-Santa Elena | (Acueducto Santa Elena) | 842964 | 1178440 | 2557 | 121,7 |
| | | SE8 | Q. "La Avicola" | Parque Santa Elena | 842830 | 1178548 | 2549 | 4,4 |
| | | SE9 | Q. "Santa Teresa" | Parcelación (Santa Teresa) | 842722 | 1179076 | 2577 | 0,3 |
| | | SE10 | Q. "Paysandú 1" | El recreo | 842082 | 1178648 | 2553 | 1,9 |
| | | SE11 | Q. "Paysandú" | El recreo | 842314 | 1178919 | 2580 | 5,5 |
| | | SE12 | Q. La torre | La Montañita | 842532 | 1179238 | 2572 | 0,4 |
| | | SE13 | Quebrada Santa Lucia | Predio los Roldán | 842141 | 1179230 | 2548 | 1,5 |
| | | SE14 | Q. Santa Elena 2 | Restaurante La Rosita. | 842215 | 1179505 | 2540 | 869,4 |
| | | SE15 | Q. El Yarumo | Finca los Arayanes | 842956 | 1179416 | 2610 | 1,4 |
| | | SE16 | Confluencia El Yarumo - Las Antenas | Tunel Viejo | 842416 | 1179621 | 2550 | 24,1 |
| | | SE17 | Q. El Placer Parte Alta | Hacia el Parque Arví (El Silletero) | 843008 | 1179917 | 2594 | 0,5 |
| | | SE18 | Quebrada el placer (aguas abajo) | predio el Silletero de los Grajales | 842386 | 1179956 | 2544 | 58,6 |
| | | SE19 | Q. Santa Elena 3 | La Antigua Huesera | 842131 | 1179931 | 2439 | 702,6 |
| | | SE20 | Q. Santa Barbara Parte Alta | Parcelación Mirador de Santa Elena | 842363 | 1180568 | 2533 | 80,3 |
| | | SE21 | Q. La Espadera | Vda el Plan sector Chisperos | 840253 | 1178294 | 2640 | 12,3 |
| | | SE22 | Q. La Bisarrra | Vereda el Plan | 840516 | 1178609 | 2627 | 2,8 |
| | | SE25 | Q. Chiqueros | Acueducto las Flores | 842519 | 1181361 | 2574 | 3,9 |
| | | SE26 | La Cascada | La cascada de Santa Elena | 841251 | 1180556 | 2111 | 709,1 |
| | | SE27 | Confluencia Bocana - Santa Elena | Finca la Granja | 840641 | 1180755 | 1937 | 710,9 |
| | San Ignacio | SI1 | Q. Sn Ignacio | Aguas arriba Asuasi. | 843906 | 1178359 | 2596 | 2,3 |
| | | SI2 | Q. "La Matilda" (afluente San Ignacio) | Casa de los Caballos | 843717 | 1178333 | 2577 | 0,04 |
| | | SI3 | Afloramiento (lago) | Montevivo | 843758 | 1178666 | 2585 | 1,5 |
| | | SI4 | Q. Los Chorlitos | Montevivo | 843525 | 1178581 | 2564 | 2,5 |
| | | SI5 | Q. " Los Chorlitos en la Batea" | Montevivo | 843413 | 1178489 | 2569 | 13,1 |
| | | SI6 | Q. Amagamiento frio | Montevivo | 843292 | 1178524 | 2576 | 2,2 |
| | San Pedro | SP1 | Q. San Pedro Parte alta | cultivo de claveles | 842808 | 1177782 | 2570 | 6 |
| | | SP2 | Q. San Pedro acued. | Acueducto San Pedro. | 842815 | 1178104 | 2566 | 28,6 |
| | | SP3 | Q. San Pedro aguas abajo acued. | Descarga en Santa Elena | 842798 | 1178479 | 2543 | 28,6 |
| La Cascada | La Cascada | C1 | Q." Dña Clara" | Predio Dna Clara (Finca Airecitos) | 844805 | 1177623 | 2593 | sin agua |
| | | C2 | Q. "Dos captaciones" | sobre la vía | 844583 | 1177823 | 2612 | 0,9 |
| | | C3 | Q. "Adonay" | Fundacion Adonay | 844427 | 1177796 | 2639 | sin acces |
| | | C4 | Q. La Cascada | La cascada 5mt | 844895 | 1178109 | 2467 | 11,2 |
| | La Honda | Ho1 | Q "Manguruma" | Confluecia de 2 afluentes de la mosca | 845463 | 1177490 | 2500 | 1,3 |
| | | Ho2 | Q. "Villanueva" | Vereda El Progreso | 845017 | 1177229 | 2540 | 27,8 |

| Cuenca | Subcuenca | Codigo | Nombre De La Quebrada | Referencia | Coordenadas | | | Q (L/S) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | X | Y | Z | |
| Rionegro | Hondina | H1 | Q. El Cerro | Finca bella vista (acued. Atehortua) | 844634 | 1176997 | 2610 | 1,8 |
| | | H2 | Q. El Cerro Aguas Abajo acued. | Aguas abajo acueducto atehortua | 844784 | 1176883 | 2481 | 3,1 |
| | | H3 | Q. Los Parra aguas arriba acued. | Acueducto aguas arriba | 844565 | 1176583 | 2597 | 2,9 |
| | | H4 | Q. Los Parra Aguas Abajo Acued. | Acueducto los Parra | 844624 | 1176534 | 2570 | 1 |
| | | H5 | Q. La Hondina 2 | Plantación de tomate de árbol | 845382 | 1176105 | 2352 | 91,8 |
| | | H6 | Q. La Hondina 1 | Aguas abajo plantacion tomate árbol | 845759 | 1175770 | 2317 | 173,8 |
| | La Floresta | F1 | Q. La Floresta Parte alta | Acued. Yarumaguas Aguas Arriba | 844926 | 1175084 | 2378 | 78,7 |
| | | F2 | Q. La Floresta 1 | Acueducto Yarumaguas | 845162 | 1175095 | 2423 | 37,5 |
| | | F3 | Q. La Floresta.2 | Aguas debajo de arenera | 846251 | 1175048 | 2239 | 51,9 |
| | Yarumal | Y1 | Q. Yarumal 1 | Sanmarcanda | 845528 | 1176899 | 2462 | 3,7 |
| | | Y2 | Afluente 1 Yarumal | Sanmarcanda | 845396 | 1176856 | 2446 | 2,1 |
| | | Y3 | Afluente 2 Yarumal | Sanmarcanda | 845659 | 1176863 | 2447 | 1,6 |
| | | Y4 | Afluente 3- Yarumal | camino de piedra | 845980 | 1176586 | 2392 | 27,9 |
| | | Y5 | Q. Yarumal 2 | Casa "Don Martin Forero" (Pastores Alemanes) | 846085 | 1176545 | 2382 | 43,8 |
| | | Y6 | Afluente 4 Yarumal | Aguas Arriba Truchas | 846044 | 1176219 | 2335 | 3,1 |
| | | Y7 | Afluente 5 Yarumal | La Araucaria (Truchas) | 846107 | 1176171 | 2335 | 1,2 |
| | | Y8 | Q- Yarumal 3 | Piezometro | 846102 | 1175913 | 2306 | 57,6 |
| | | Y9 | Confluencia Yarumal-Hondina | Finca Doña Nazaret | 846088 | 1175620 | 2281 | 171,6 |
| | | Y10 | Q. Yarumal 4 | Aguas arriba de minería | 847012 | 1174712 | 2225 | 121,1 |
| | | Y11 | Q. Yarumal 5 | Aguas debajo de minería | 847231 | 1174667 | 2195 | 273,9 |
| | Salazar | S1 | Q. Betania1 | Finca Betania | 846716 | 1176298 | 2378 | 6,3 |
| | | S2 | Q. Betania 2 | Finca Betania | 846767 | 1176342 | 2351 | 5,4 |
| | | S3 | Afluente 1 Salazar | Parte media | 847447 | 1176372 | 2280 | 22,9 |
| | | S4 | Afluente 2 a la salazar | Sobre la via ver. Yarumal | 847459 | 1175774 | 2255 | 2,9 |
| | | S5 | "Q. Escondida" | Afluente de la Salazar | 847340 | 1175662 | 2286 | 1,8 |
| | | S6 | Q. La Salazar | Aguas arriba | 847666 | 1175699 | 2239 | 118,3 |
| | | S7 | Q. "Las Faldas" | Finca las faldas (Aguacates) | 847279 | 1175357 | 2324 | 1,3 |

Fuente: Consorcio Siga-Plyma

Tabla 3-73 - Fuentes de agua Intermitentes dentro del Área de Influencia Local

| Cuenca | Subcuenca | Codigo | Nombre De La Quebrada | Referencia | Coordenadas | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | X | Y | Z |
| Rionegro | Hondina | R1 | Acueducto los Parra | Acueducto los Parra | 844581 | 1176580 | 2592 |
| | Yarumal | R2 | Afluente 5 Yarumal | Aguas abajo truchas | 846182 | 1176079 | 2340 |
| | | R3 | Q. Yarumal | Afloramiento (sanmarcanda) | 845250 | 1177046 | 2489 |
| | Salazar | R4 | Afluente a la Salazar | (Glorieta Sajonia) | 848223 | 1175079 | 2190 |
| La Cascada | La Cascada | R5 | Q. Gónima | Finca de los Gónima | 844273 | 1177887 | 2634 |
| | La Honda | R5 | Manguruma nº2 | Afloramiento (Predio adm. Alexander.) | 845249 | 1177241 | 2490 |
| Santa Elena | Santa Elena | R6 | Q. "La Cerca" | Parque Santa Elena | 842979 | 1178833 | 2584 |
| | | R7 | Q. "La Juliana" | Parcelación (Santa Teresa) | 842823 | 1179002 | 2591 |
| | | R8 | Q. Santa Barbara Parte Baja | Despues de la vía hacia Media Luna | 842144 | 1180568 | 2467 |
| | | R9 | Q. Bocaná Parte alta | Predio Corantioquia (La Aguada) | 841743 | 1179280 | 2530 |
| | San Ignacio | R10 | Q. Sn Ignacio (La Duquesa) | Finca La Duquesa | 843590 | 1178385 | 2591 |
| | | R11 | Q. "Casepalo" | Montevivo | 843748 | 1178606 | 2594 |
| | | R12 | Q. " La Asequia" | Montevivo | 843640 | 1179000 | 2520 |
| | | R13 | Q " La Maloca" | Montevivo | 843626 | 1178567 | 2584 |

Fuente: Consorcio Siga-Plyma

En las siguientes figuras se presenta la ubicación de las estaciones de muestreo para cada una de las cuencas descritas:

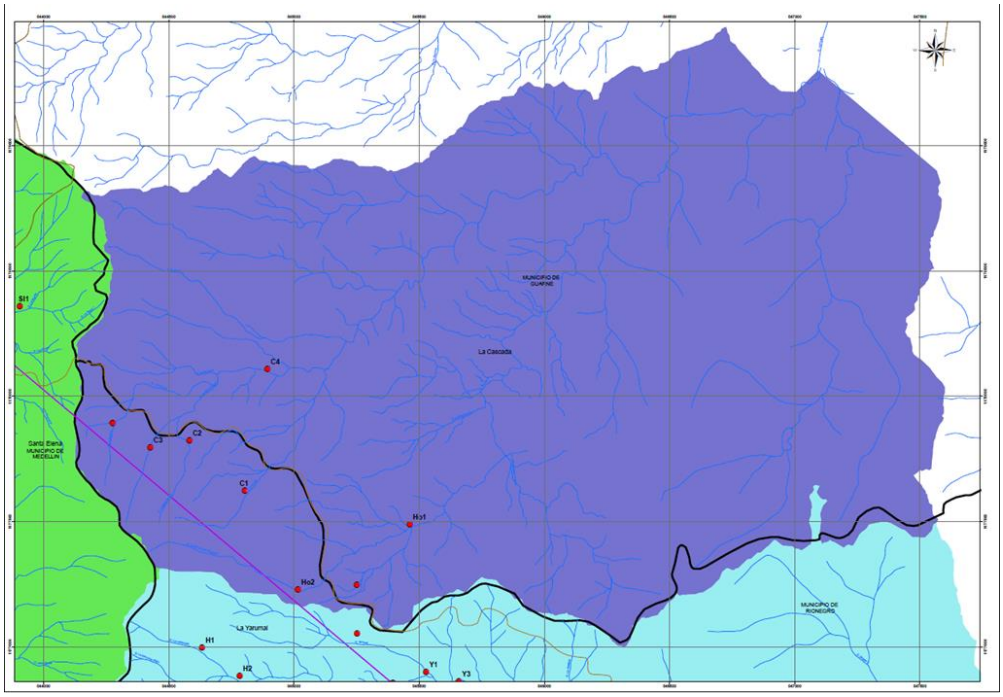



Figura 3-37 - Estaciones de muestreo Cuenca La Cascada (Anexo 16 Muestreo_La_Cascada)

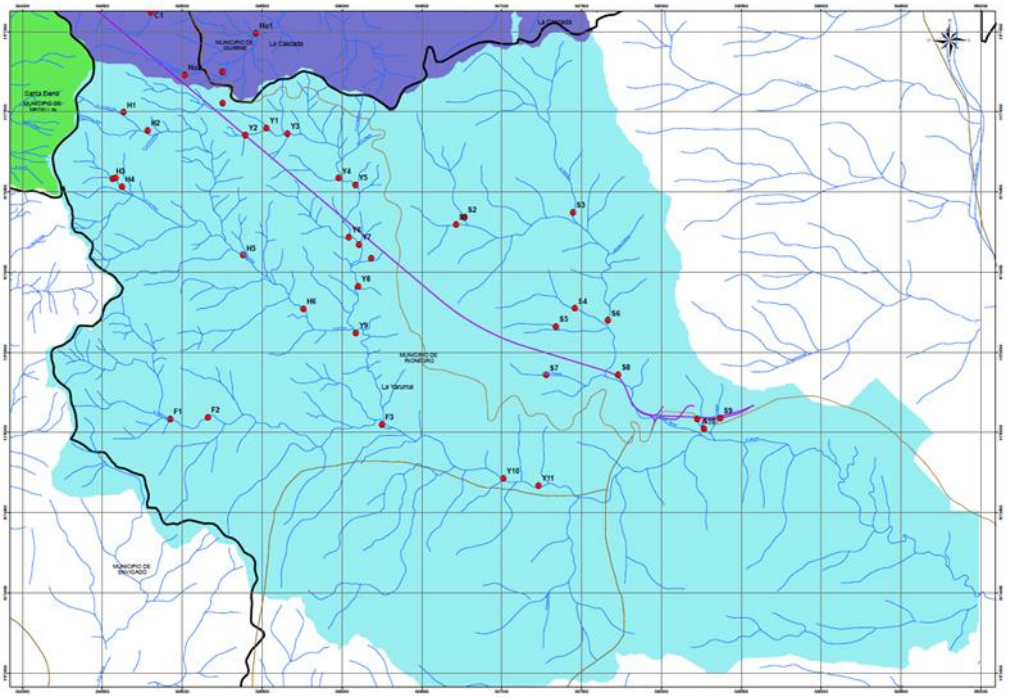


Figura 3-38 - Estaciones de muestreo Cuenca La Yarumal (Anexo 16 Muestreo_La_Yarumal)

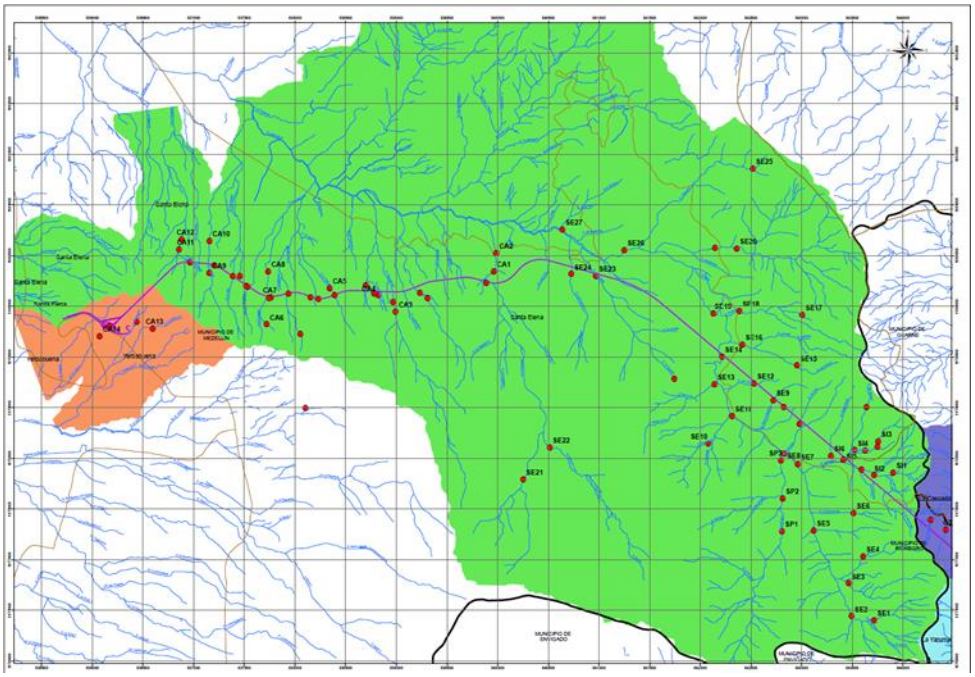


Figura 3-39 Estaciones de muestreo Cuenca Santa Elena (Anexo 16 Muestreo_Santa_Elena)

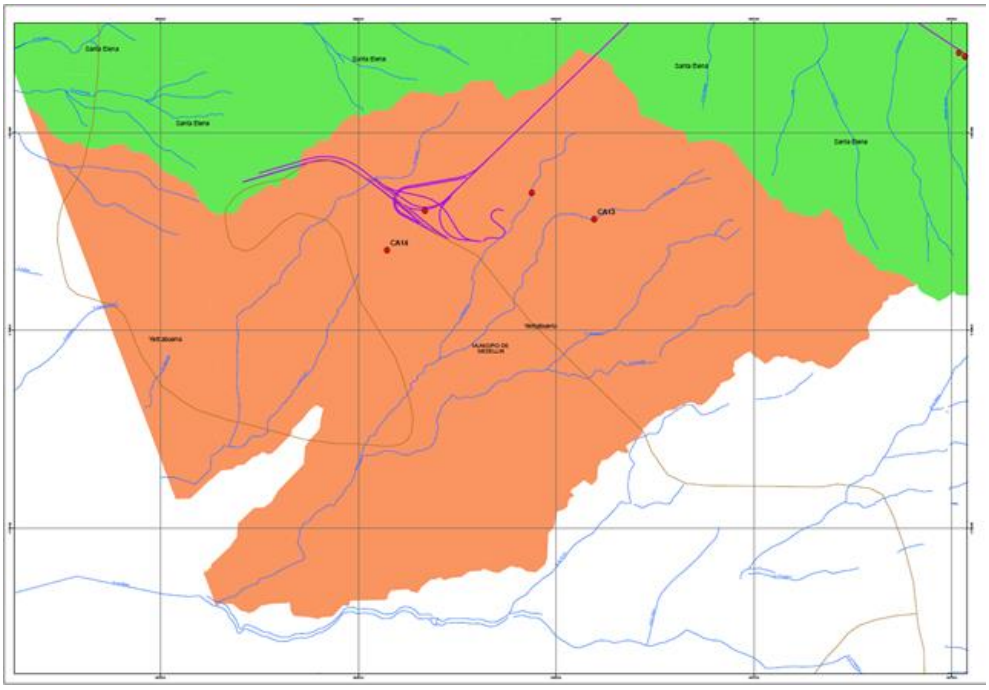


Figura 3-40 - Estaciones de muestreo Cuenca Yerbabuena (Anexo 16 Muestreo_Yerbabuena)

#### 3.2.5.1.1 Cuenca Yerbabuena

Ubicada en el municipio de Medellín, sector las Palmas. Propia de una cuenca con características de un área urbana. Se observan varias zonas canalizadas, con impactos generados por la infraestructura vial y los asentamientos urbanos. Se realizó el muestreo de dos fuentes de agua pertenecientes a la cuenca (Ye1 y Ye2), las cuales se encuentran ubicadas dentro del predio del Seminario Mayor "Conciliar". Esta zona pertenece al área de influencia directa puntual (AIDP), debido a la probable afectación causada por la construcción del Portal Sur del Túnel Seminario.

### Estación Ye1 Quebrada La Grilla

Esta fuente se encuentra localizada en inmediaciones del predio del Seminario Conciliar de Medellín. El sitio presenta poca intervención antrópica. La forma del canal es de box, con un nivel de agua muy bajo. El caudal obtenido de 0,33 l/s. La mayor parte de la corriente, se encuentra en pequeñas pozas, restringiendo parcialmente el paso de los peces.

En la ribera derecha se encuentran arbustos y helechos, mientras que en ribera izquierda, árboles frutales, como Citrus nobilis (Mandarina) y vegetación despejada; indicando un grado de perturbación moderado. En ambas riberas se evidencian afloramientos en las rocas. Presentando una pendiente moderada (30-60°) hacia la ribera derecha y una pendiente baja (10-30°) hacia la izquierda.

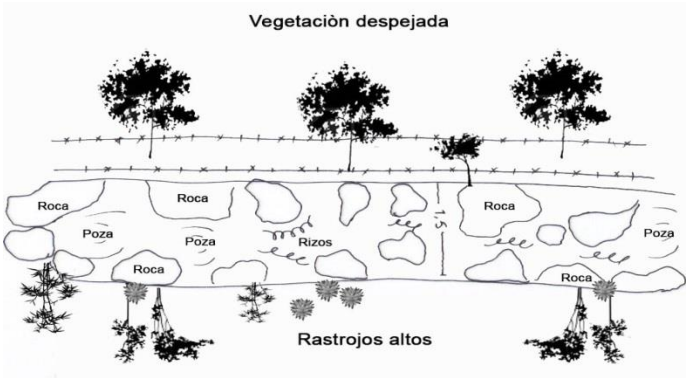



Figura 3-41 - Estación Ye1 Quebrada La Grilla Esquema del sitio de muestreo de acuerdo con el protocolo de Ausrivas para cuerpos de agua de alto gradiente

### Estación Ye2 Quebrada la Loma 2 aguas arriba del eje del Túnel seminario

Esta estación se encuentra al lado de la portería del Seminario Mayor de Medellín. El cauce de la quebrada tiene alrededor de 36 centímetros de ancho. La cantidad de agua es muy poca, equivalente a un caudal de 0,19 l/s. El agua es turbia dada la gran cantidad de fango que se encuentra en el cauce. El sustrato está conformado por guijarro y cascajo, un hábitat que no es muy favorable para el establecimiento de diversidad de especies, adicionalmente se identifica sobre la ribera izquierda una manguera de extracción de agua de aproximadamente dos pulgadas de diámetro. Esta toma de agua se hace aguas arriba de este sitio de muestreo, debido al bajo nivel del agua en este sitio.

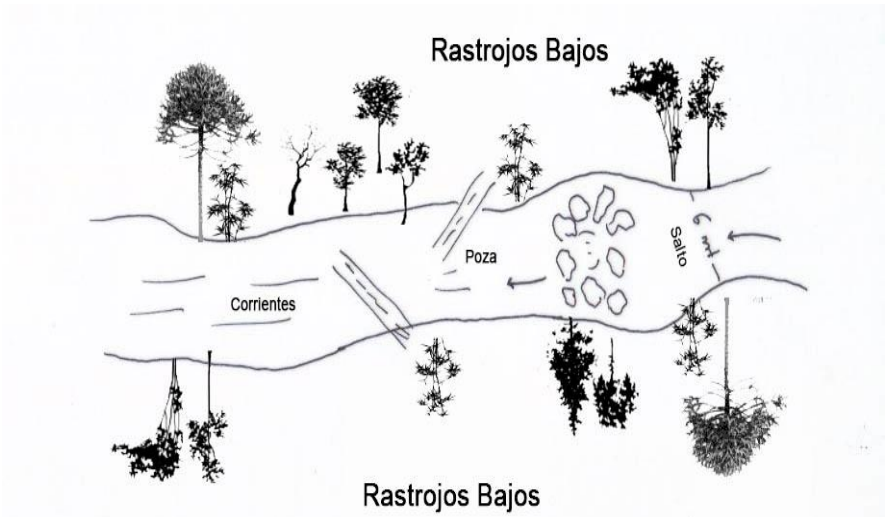



Figura 3-42 - Estación Ye2 Quebrada La Loma 2 aguas arriba del eje. Esquema del sitio de muestreo de acuerdo con el protocolo de Ausrivas para cuerpos de agua de alto gradiente

En este sitio de muestreo se encontraron arbustos, troncos caídos de menos de diez centímetros de diámetro sobre el cauce de la quebrada, helechos, y gran cantidad de cultivos de *Musa sapientum* (plátano) restringiendo la entrada de luz al cuerpo de agua.

#### 3.2.5.1.2 Santa Elena, sector de la vía cielo abierto occidental

Con el fin de facilitar el análisis, se tomó el sector de la vía a cielo abierto occidental como un subsector de la Cuenca de la quebrada Santa Elena. De este modo, los cuerpos de agua de este tramo drenan directamente sus aguas a Medellín. Este grupo de quebradas se caracterizan por

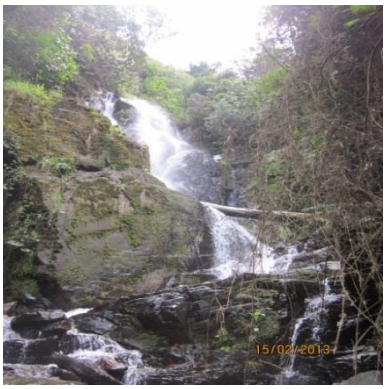
una baja disponibilidad de agua, así como la condición intermitente de los mismos, a lo que se suma la presencia de aguas servidas principalmente de origen domestico que vierten a la quebrada.

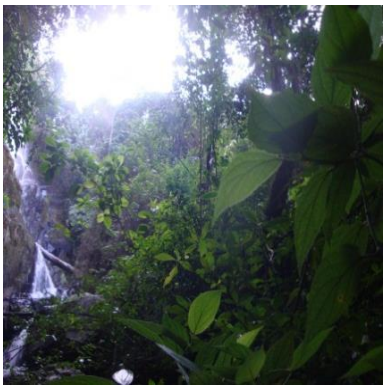
### Estación CA1 Quebrada. La Espadera aguas arriba del eje

El punto se ubica justo en el sitio conocido como La Cascada. Este tramo es bastante amplio, mide aproximadamente tres metros de ancho. En el momento del muestreo (época de estiaje) el nivel del agua estaba en flujo base, ocupando más del 75% del canal disponible. El sitio se caracteriza por un salto de aproximadamente treinta metros de altura el cual determina una fragmentación del cuerpo de agua. En este punto de muestreo se observan zonas de rápidos y algunas pozas. Al momento del muestreo se presentaron aguas limpias, con un caudal de 96,2 l/s.

A lo largo de la quebrada se encontró una manguera para extracción de agua con un diámetro de dos y media pulgadas. La vegetación presente está compuesta en su mayoría, por especies nativas, y algunas zonas con rastrojo alto al parecer en proceso de regeneración natural. En general, este sitio se encuentra conservado, presentando un muy bajo grado de perturbación. La forma es de valle con pendientes en ángulo agudo. Sobre el cauce se encuentran rocas de diámetro mayor a cincuenta centímetros aproximadamente.

La pendiente para la ribera derecha es escarpada (60-80°), mientras que para la izquierda es moderada (30-60°). Presentan forma convexa y cóncava respectivamente.





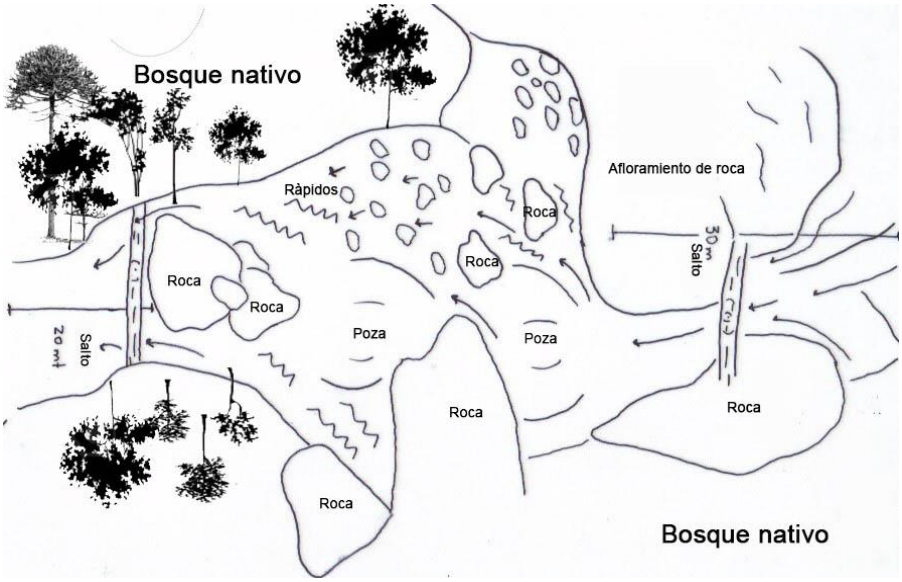
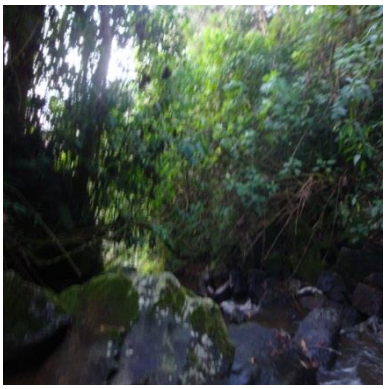



Figura 3-43 - Estación CA1 Quebrada La Espadera aguas arriba del eje. Esquema del sitio de muestreo de acuerdo con el protocolo de Ausrivas para cuerpos de agua de alto gradiente

### Estación CA2 Quebrada la Espadera aguas abajo del eje

La quebrada se encuentra ubicada a unos tres metros debajo del puente que conduce hacia el corregimiento de Santa Elena, es un lugar de difícil acceso, dadas las pendientes en ángulo agudo que presenta el valle y las pendientes escarpadas (60-80°) que poseen las riberas. El canal tiene forma de box, el agua ocupa más del 75% de éste. Tiene un caudal de 123,5 l/s. La quebrada es clara, no se perciben olores y predominan las formas de corrientes, rápidos y de rizos o caballitos.

Predomina la vegetación nativa, destacándose hierbas, helechos, arbustos y árboles superiores a diez metros de altura. Sin embargo, el grado de perturbación de este lugar es alto, debido a la canalización que sufrió la quebrada en el pasado.



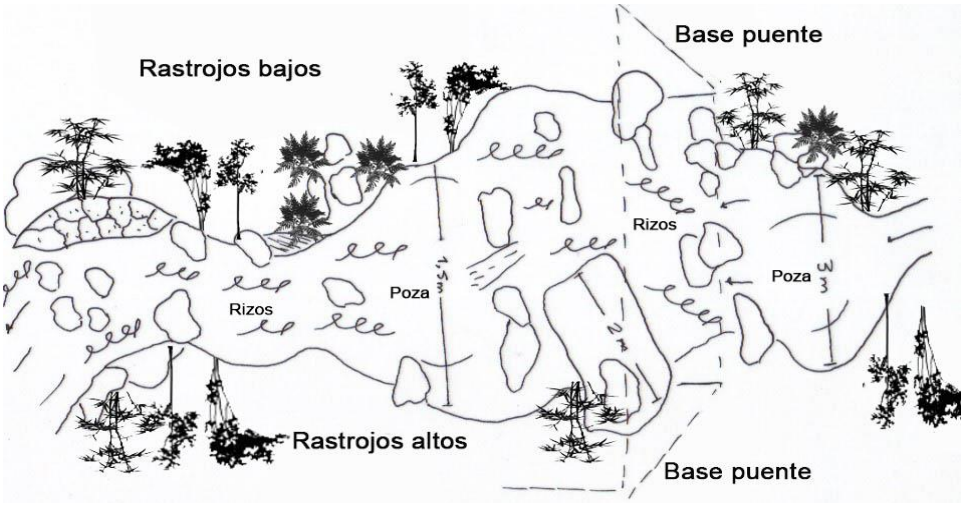



Figura 3-44 - Estación CA2 Quebrada La Espadera aguas abajo del eje Esquema del sitio de muestreo de acuerdo con el protocolo de Ausrivas para cuerpos de agua de alto gradiente

### Estación CA3 Quebrada el Chupadero aguas arriba

El sitio de muestreo se encuentra bordeado por una plantación de Cupressus (Pino Ciprés). En general, la zona presenta un grado de perturbación alto, debido a la carretera que atraviesa el cuerpo de agua y a las talas hacia las márgenes del sitio. La quebrada presenta un flujo bajo, la poca cantidad de agua que se encuentra está en pozas y en algunas zonas se observan pequeñas corrientes. El caudal obtenido fue de 0,05 l/s el lecho es rocoso, las rocas son sub angulares y llegan a medir hasta dos metros de ancho. Sobre el cauce se encuentran algunos troncos caídos, todos estos factores impiden algún tipo de paso para los peces.

El canal tiene forma de caja ancha. Las riberas presentan una pendiente moderada de aproximadamente 60° la cual va disminuyendo al llegar a una pequeña carretera que se encuentra en el lugar. No se evidencian procesos erosivos en las márgenes ni gran acumulación de sedimento fino sobre el lecho. El agua es levemente turbia sin presencia de olores o aceites.

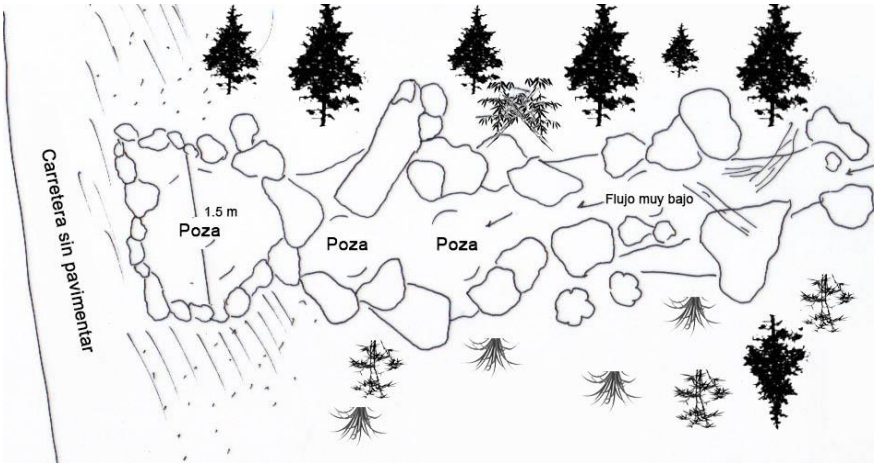



Figura 3-45 - Estación CA3 Quebrada el Chupadero aguas arriba. Esquema del sitio de muestreo de acuerdo con el protocolo de Ausrivas para cuerpos de agua de alto gradiente

### Estación CA4 Quebrada Cañada Negra

La quebrada se encuentra en el interior de una plantación de pinos de la especie *Cupressus* (pino ciprés). Esta especie arbórea llega a medir más de diez metros de altura, cubriendo la totalidad del lugar, sin embargo, hacia la parte alta del punto de muestreo se encuentran algunos arbustos.

Se observaron dos mangueras para la captación de agua, una de ellas de dos pulgadas de diámetro y la otra de media pulgada, ambas toman el agua casi en su totalidad, el rebose es mínimo. Otra de las intervenciones detectadas, es la extracción de maderera, generando un alto grado de perturbación.

El canal presenta buena circulación del agua, aunque el bajo nivel de agua ocasiona restricciones al paso de los peces, No se encuentran barras, la forma es de U aplanada. Se encuentran zonas de corrientes y algunos saltos de treinta centímetros pero no son representativos. Al momento del muestreo se contó con un caudal de 0,57 l/s.

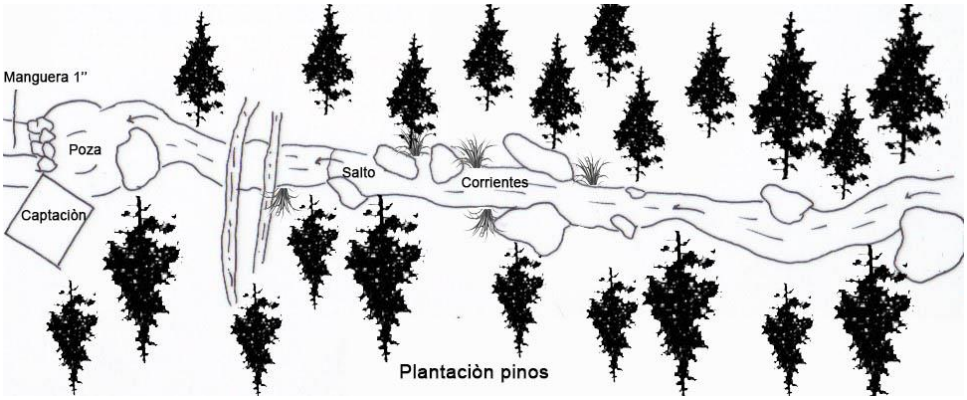



Figura 3-46 - Estación CA4 Quebrada Cañada negra. Esquema del sitio de muestreo de acuerdo con el protocolo de Ausrivas para cuerpos de agua de alto gradiente

### Estación CA5 Quebrada la Pastora aguas abajo

Este sitio tiene forma de valle poco profundo, la zona de acceso al sitio presenta un alto grado de dificultad, ya que cada ribera tiene una pendiente escarpada (60-80°). El cauce de la quebrada mide alrededor de veintiocho centímetros de ancho y la cantidad de agua que se encuentra es escasa. Ocupa un 25% del canal disponible y posee un caudal de 1 l/s. Se ubica en zonas de corrientes y de pequeños rápidos, el paso para los peces es restringido como producto del bajo nivel del agua y de gran cantidad de desechos leñosos que obstruyen el cauce.

La vegetación que se halla en el lugar corresponde a bosque fragmentado, tiene un grado de perturbación medio, aunque se encuentran algunas especies exóticas poco representativas de la especie *Cupressus* (pino ciprés). Se encuentran arbustos y abundantes plantas de la familia de las aráceas.

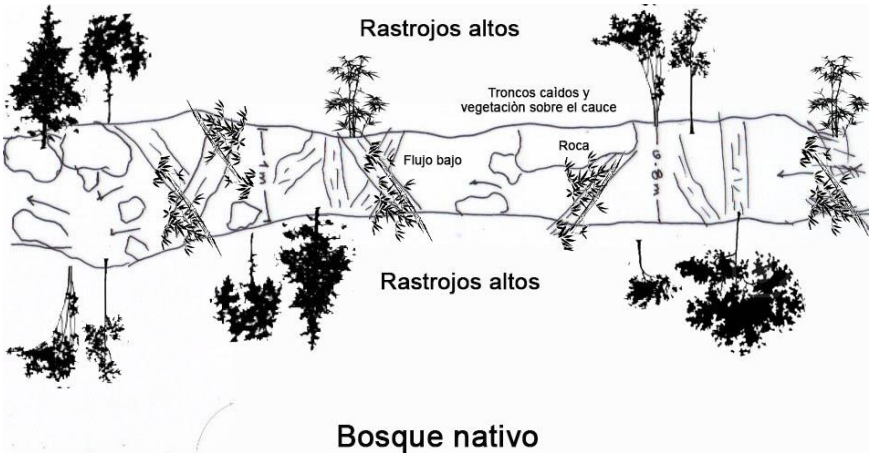



Figura 3-47 - Estación CA5 Quebrada la Pastora aguas abajo. Esquema del sitio de muestreo de acuerdo con el protocolo de Ausrivas para cuerpos de agua de alto gradiente

### Estación CA6 Quebrada Marquetalia

La quebrada se encuentra ubicada al interior del Seminario Conciliar de Medellín. En este lugar se aprecia la alteración del cauce con el fin de captar el agua. Se encontró una acequia (al parecer construida recientemente) y se pudo constatar, la presencia de una manguera de media pulgada para extraer agua. El cauce mide aproximadamente cuarenta centímetros de ancho. El agua se encontró en condiciones normales en cuanto a color y olor, con zonas predominantes de corrientes y con un caudal de 0,33 l/s.

Este sitio presenta forma de valle poco profundo, rodeado de un bosque ripario semiconservado, allí se encuentran especies arbóreas nativas como el *Toxicodendron striatum* (Manzanillo), *Myrsine coriacea* (Espadero), *Trichanthera gigantea* (Quiebra Barriga), *Cecropia peltata* (Yarumo Blanco), y especies exóticas de la especie *Eucalyptus* (Eucaliptos). No se presentan afloramientos en las rocas. En ambas riberas la pendiente es baja (10-30°) y tiene forma cóncava. A pesar de la captación que se encuentra, este sitio se podría calificar con un bajo grado de perturbación.

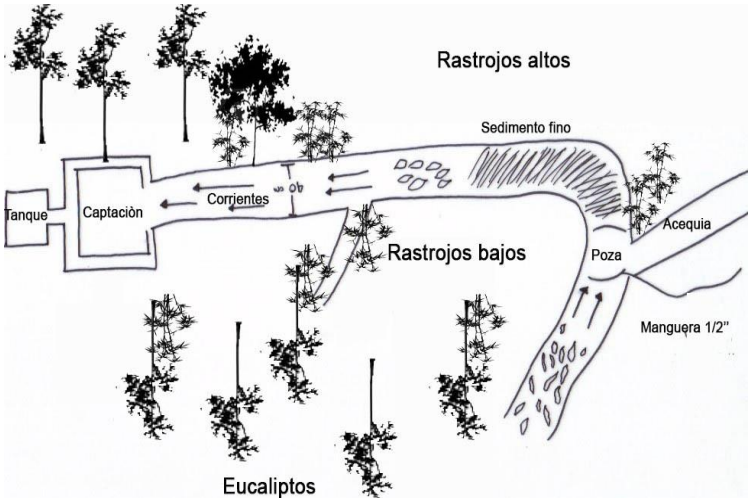



Figura 3-48 - Estación CA6 Quebrada Marquetalia. Esquema del sitio de muestreo de acuerdo con el protocolo de Ausrivas para cuerpos de agua de alto gradiente

### Estación CA7 Quebrada Caunces aguas arriba

Esta quebrada también conocida como Cuchillón. Presenta un cauce de un ancho de aproximadamente un metro, con baja cantidad de agua. Posee grandes zonas de corrientes, ocupando aproximadamente un 35% del canal y un caudal de 0,3 l/s. Al momento del muestreo, se encontró el agua estaba turbia, debido a la cantidad de solidos suspendidos, aunque no se percibieron olores en el sedimento, lo cual hace pensar que éstos son de origen inorgánico.

La quebrada se ubica en un bosque secundario en el cual hay una presencia importante de especies nativas, la vegetación predominante de la zona riparia son arboles con una altura mayor a diez metros pertenecientes a la especie Ochroma (Balsos), hierbas y helechos, también se apreciaron restos de vegetación y troncos caídos sobre el cauce; aun así el grado de perturbación es bajo.

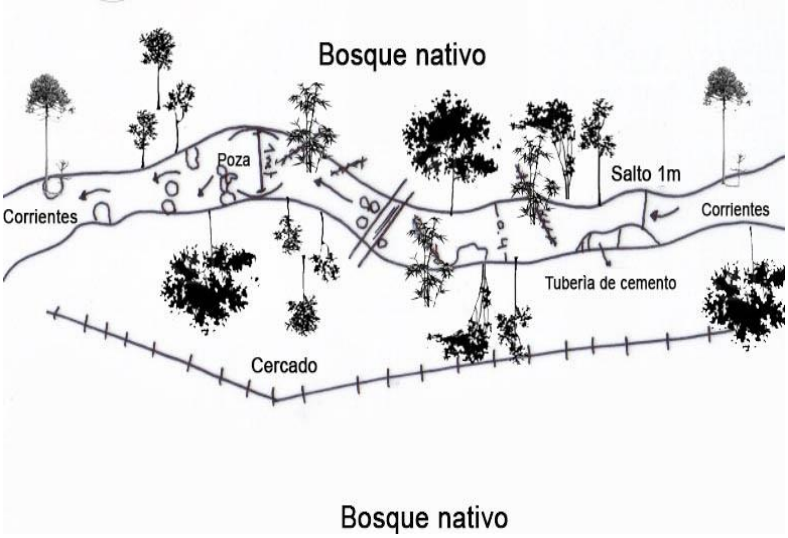



Figura 3-49 - Estación CA7 Quebrada Caunces aguas arriba. Esquema del sitio de muestreo de acuerdo con el protocolo de Ausrivas para cuerpos de agua de alto gradiente.

El flujo del cauce tiene paso moderadamente restringido para los peces, debido al poco volumen de agua y al bajo nivel de la lámina de agua, no se observaron barras, ni afloramientos de las rocas, el canal no presenta ninguna modificación, las dos riberas tienen pendiente moderada (30°-60°) y forma cóncava.

### Estación CA8 Quebrada Caunces aguas abajo

El sitio de muestreo se encuentra ubicado cerca de la cancha de fútbol del barrio Caunces. El ancho del cauce es un poco menor de un metro. El agua se observa turbia, probablemente sea el resultado de la vegetación sumergida. Se encuentran algunos fragmentos de bosque que podrían catalogar el grado de perturbación del lugar como alta, debido a la zona residencial que se encuentra hacia la ribera derecha.

En el cauce puede encontrarse un sustrato compuesto en su mayor parte por hojarasca. El nivel de agua es bajo equivalente a un caudal de 0,8 l/s; el paso para los peces es restringido y no beneficia la presencia de fauna acuática diversa. El sitio de muestreo es de fácil acceso, y a pesar de las perturbaciones no se observa aceite en el agua o en el sedimento, pero se percibieron olores típicos a materia orgánica.

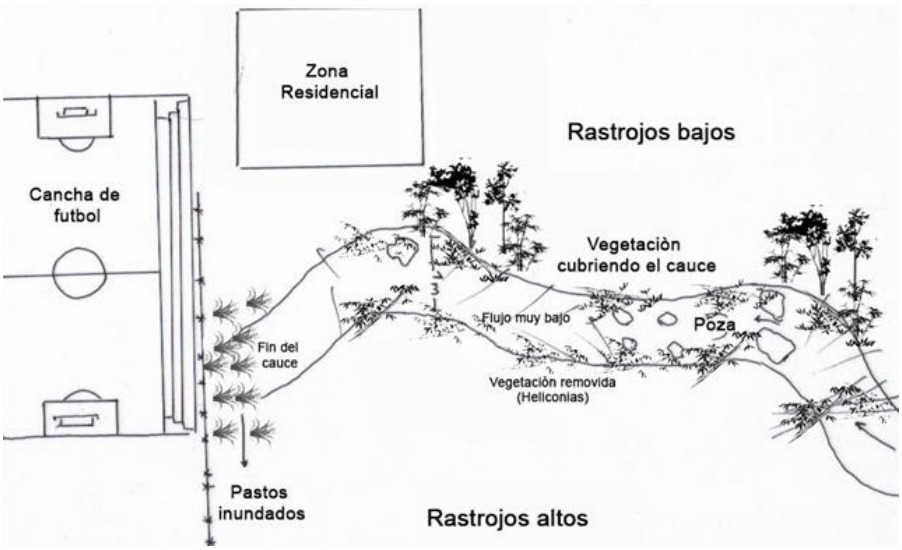



Figura 3-50 - Estación CA8 Quebrada Caunces Aguas Abajo. Esquema del sitio de muestreo de acuerdo con el protocolo de Ausrivas para cuerpos de agua de alto gradiente

### Estación CA9 Quebrada La India aguas arriba

La quebrada está ubicada en el barrio Quinta Linda. El sitio de muestreo presenta una alta perturbación, debido a la cantidad de especies exóticas de la especie *Cupressus* (pino ciprés) que se encuentran allí, adicionalmente existen arbustos y *Eucalyptus* (Eucaliptos). A esto se suma que en un tramo de la quebrada se encuentra una estructura en cemento que dirige el agua posiblemente por una vía.

El cauce tiene aproximadamente cincuenta centímetros de ancho, predominan las pozas poco profundas. Presenta un flujo bajo de 0,16 l/s. Se observan barras laterales y vegetación que obstruyen el cauce, impidiendo el paso para los peces. No se perciben olores ni en los sedimentos ni en el agua; aunque tiene un color opaco debido a material suspendido de origen orgánico, fango y arcillas. El canal presenta forma de U con una pendiente baja (10°- 30°) en ambas riberas.

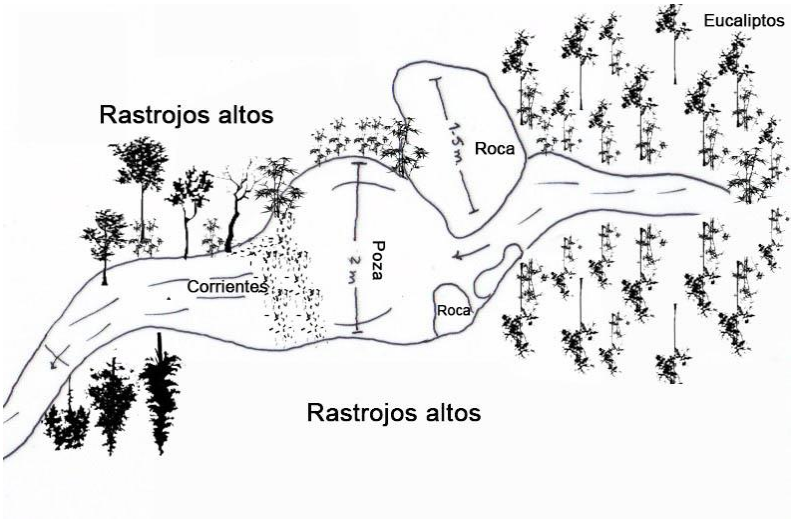



Figura 3-51 - Estación CA9 Quebrada la India aguas arriba. Esquema del sitio de muestreo de acuerdo con el protocolo de Ausrivas para cuerpos de agua de alto gradiente

### Estación CA10 Quebrada La India aguas abajo

Este sitio de muestreo ubicado en el barrio Quinta Linda, se desplazó aproximadamente unos trescientos metros más abajo del sitio de reconocimiento, para evitar en el muestreo el registro de cloro en el agua, percibido al salir de una tubería de la empresa EPM, lo cual afectaría los datos obtenidos de la toma de agua, y en especial la caracterización fisicoquímica del agua. En este punto se observó una tubería de descarga de aguas residuales proveniente de un conjunto residencial ubicado hacia la margen derecha de la quebrada y gran cantidad de residuos sólidos y acumulación escombros.

El ancho del cauce es aproximadamente dos metros y el agua ocupa más del 75% del canal. Al momento del muestreo ésta contenía aceites, jabones, un olor fuerte a materia orgánica en descomposición, producto muy seguramente de las descargas de aguas domésticas, adicionalmente el agua presentó una alta turbidez. Se registró un caudal de 3,7 l/s. Fueron comunes las corrientes, rizos o caballitos y algunas pozas poco profundas.

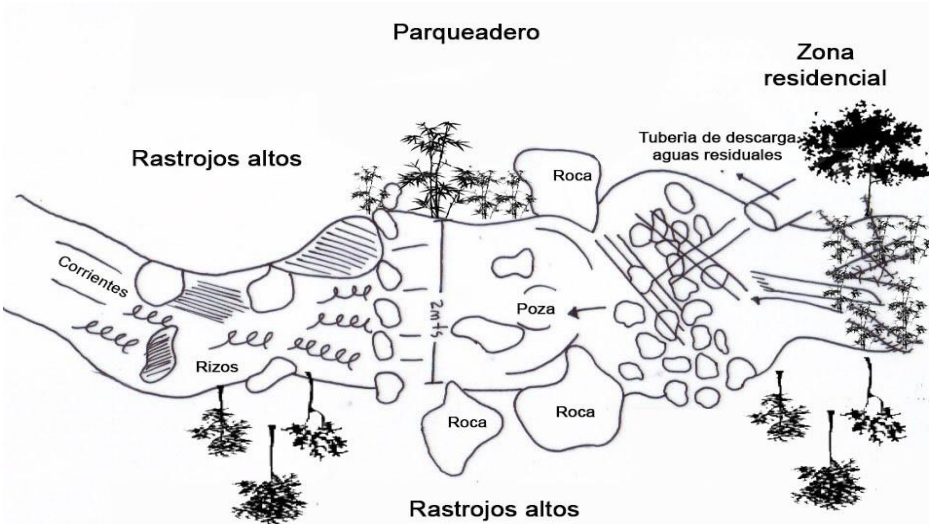



Figura 3-52 - Estación CA10 Quebrada la India aguas abajo. Esquema del sitio de muestreo de acuerdo con el protocolo de Ausrivas para cuerpos de agua de alto gradiente

La vegetación ribereña se encuentra en rastrojo alto, hay algunos árboles de más de diez metros de altura, hierbas y gramíneas de la especie Chusquea. La quebrada tiene forma de valle amplio, con pendiente en las riberas baja (10°-30°), se observan afloramientos similares en las dos riberas (50% cada una), una barra puntual lateral sin vegetación, y paso moderadamente restringido para los peces; en general, el lugar presenta un grado de perturbación alto, lo cual se ve reflejado en la acumulación de sedimento, los olores a materia orgánica en descomposición, la presencia de estructuras de concreto entre otras.

### Estación CA11 Quebrada La Cangreja

El punto está situado cerca de un cultivo de truchas. Es una quebrada intermitente de escorrentía. El ancho del cauce es de aproximadamente treinta centímetros. Al momento del muestreo, la mayor parte del agua se encontró en pequeñas pozas y en zonas de pequeñas corrientes. El agua se encontró levemente turbia como producto del lavado de las plantas, además se evidenció una manguera de extracción de cuatro pulgadas para suministrar agua al cultivo de peces mencionado anteriormente.

Presenta una cobertura vegetal densa, compuesta principalmente por arbustos y en las riberas existen cultivos de *Coffea arabica* (café) y de *Musa sapientum* (plátano), lo cual indica un alto grado de perturbación antrópica. Sobre el cauce de la quebrada se encuentran rocas de un diámetro mayor a un metro, las cuales no permiten el fácil establecimiento de macroinvertebrados acuáticos.

El flujo del cauce restringe el paso de los peces, debido al bajo nivel del agua, cuyo caudal es de 1,2 l/s e impide la conectividad entre diferentes ambientes, adicionalmente se reconoce el alto grado de deterioro en el que se encuentra el cuerpo de agua, representado en grandes masas de algas que generalmente son típicas en ambientes con alto grado de contaminación. No se encuentran barras, el canal presenta presas y desvíos, tiene forma de U, las dos riberas tienen pendientes bajas (10°-30°) y la forma es convexa.

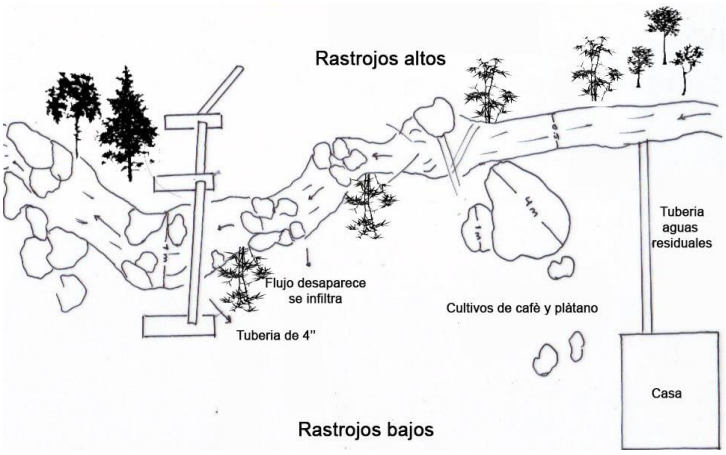



Figura 3-53 - Estación CA11 Quebrada La Cangreja. Esquema del sitio de muestreo de acuerdo con el protocolo de Ausrivas para cuerpos de agua de alto gradiente

### Estación CA12 Quebrada La Cangreja aguas abajo

La quebrada se encuentra cerca del barrio Quinta Linda, al lado de la urbanización Palmas de Cataluña, en ésta se presentan descargas de aguas provenientes de la urbanización. El ancho del cauce es de aproximadamente 40 cm. El agua que se observa en el canal es muy poca, equivalente más o menos al 25% de éste. Tiene un caudal de 1,2 l/s. Presenta zonas de deslizaderos y algunas pozas poco profundas. El agua retenida en algunas pozas, y la cantidad de materia orgánica,

producen una olor bastante particular, se aprecia una alta turbidez del agua, debido entre muchos factores, a material suspendido, adicionalmente, tiene un paso restringido para los peces.

La quebrada está ubicada en un valle amplio, al interior de éste se encuentra una plantación forestal de pinos, en la proximidad de la quebrada se observan pastos y gramíneas del genero Chusquea (chusque), rastrojo alto, material vegetal seco, raíces y piedras planas obstruyendo el cauce. A pesar de que esta vegetación protege el cauce, se podría decir que este sitio presenta un grado de perturbación alto, debido a la zona residencial que se encuentra hacia la ribera izquierda.

En este sitio de muestreo no se encuentran barras, ni afloramientos de las rocas, y tampoco hay modificaciones en el canal. La pendiente de la ribera derecha es baja (10°-30°) y la de la izquierda moderada (30°-60°). Ambas tienen forma convexa.

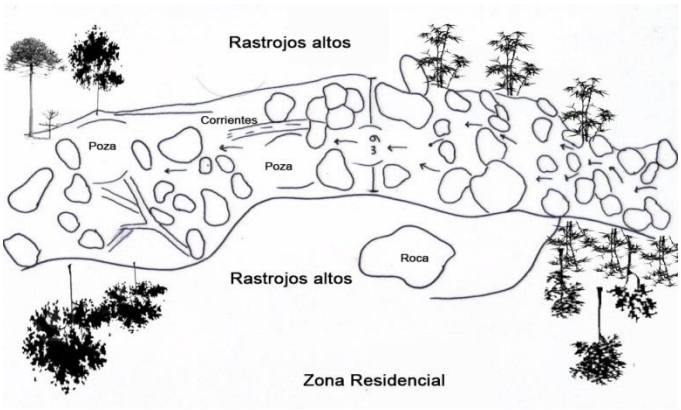



Figura 3-54 - Estación CA12 Quebrada la Cangreja aguas abajo. Esquema del sitio de muestreo de acuerdo con el protocolo de Ausrivas para cuerpos de agua de alto gradiente

### 3.2.5.1.3 Subcuenca Santa Elena

En la subcuenca Santa Elena se encuentras ubicadas 27 estaciones, de las cuales 2 (SE23 y SE24 La Aguadita y La Bonanza respectivamente) pertenecen al área de influencia puntual. Los sitios de muestreo están distribuidos por todo el corregimiento e incluyen 4 acueductos que surten la población del corregimiento y Medellín. El sector se caracteriza por ser una zona rural que con el paso del tiempo ha perdido mucha de su vocación agrícola, para desarrollarse como un área urbana. Las pocas actividades agrícolas que se desarrollan en la zona están principalmente

dirigidas al autoconsumo y al sostenimiento diario. En general, se observan muchas captaciones artesanales, sobre los cuerpos de agua, que alteran el flujo natural del cauce

### Estación SE1: Quebrada Cerro Verde

El punto de muestreo está ubicado justo antes de la confluencia con la quebrada Santa Elena. En el sector hay una alta perturbación, debido a las actividades ganaderas que se desarrollan en la zona. Pese a que existe un parche de bosque en las márgenes de la quebrada y el ganado no tiene acceso directo a la fuente de agua, hay una gran cantidad de potreros, lo que genera impactos por escorrentía y erosión.

La vegetación se compone en su mayoría de helechos, gramíneas del género *Chusquea* y Pino Ciprés distribuidos de forma semi-continua a lo largo del tramo y aproximadamente 5 metros, saliendo del cauce cambia la vegetación a potreros de uso pecuario.

El cauce tiene 2 metros en la parte más ancha; y 0,5 metros en la más angosta. Se observan barras laterales de piedras y grava, sin embargo, éstas no obstruyen el paso de los peces. El canal tiene forma de caja ancha con una pendiente moderada entre 30-60°. La partícula dominante del lecho es el guijarro lo que provoca una compactación baja del mismo, lo cual no favorece la colonización por parte de una comunidad de macroinvetebrados bentónicos diversa. En el tramo de muestreo, se presentan zonas de corrientes y pozas de aproximadamente 50 cm de profundidad. Hay una mezcla de hábitat estable y una buena oferta potencial para la colonización de la epifauna, debido a la vegetación presente sobre el cuerpo de agua, aunque como se mencionó anteriormente, el sustrato no es el más adecuado para la colonización. Las márgenes se encuentran erosionadas en casi todo el tramo de muestreo debido al acceso continuo de personas y ganado. El agua ocupa más del 75% del canal disponible, sin presencia de aceites u olores extraños y con una turbidez leve debido al material disuelto.

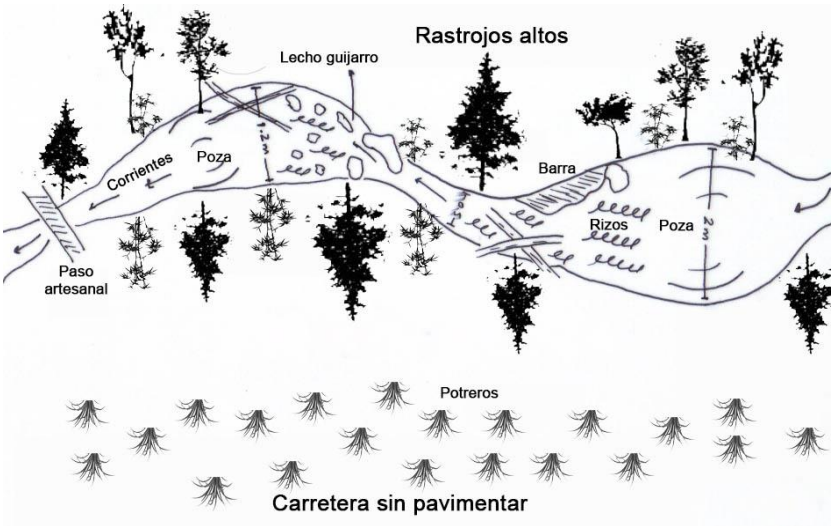



Figura 3-55 - Estación SE1-Quebrada Cerro Verde. Esquema del sitio de muestreo de acuerdo con el protocolo de Ausrivas para cuerpos de agua de alto gradiente

### Estación SE2: Afloramiento Quebrada Santa Elena

El sitio de muestreo está ubicado en la vereda el Cerro en el Sector de Santa Elena, donde se desarrollan actividades agrícolas de importancia comercial como cultivos de papa, fresas moras y flores de exportación como Rosas y Claveles. Justo en el sitio de muestreo en la ribera derecha en dirección de la corriente se observa una finca que genera impactos directos debido a las descargas, uso doméstico que hacen sobre el cuerpo de agua, y las aves de corral que recorren el predio. Adicional a esto el canal es atravesado por una carretera con un box culvert rectangular de aproximadamente 5 metros de longitud.

La vegetación en las riberas se compone principalmente por rastrojo alto con abundantes gramíneas, helechos y arbustos existen también algunos Pino Ciprés de más de 10 metros de altura en la ribera izquierda, así como algunas especies ornamentales entre la que se encuentra *Meriania nobilis Triana* (Amarraboyo). Se observan también algunos briofitos adheridos a los troncos y gran cantidad de material vegetal suspendido sobre el cuerpo de agua.

El cauce tiene aproximadamente 1.5 metros ancho, presenta rocas subangulares distribuidas a la largo del sitio y barras puntuales de roca sin vegetación. El canal no presenta grandes ondulaciones, tiene forma de U aplanada y ofrece un paso parcialmente restringido para los peces debido a la estructura artificial presente. El agua ocupa más del 75% del canal disponible con un lecho cuya partícula dominante es el guijarro. Moderadamente compactado está compuesto principalmente por corrientes y pozas de casi 80 cm de profundidad. Las márgenes presentan una erosión moderada con altas posibilidades de deslizamientos en momentos de lluvias torrenciales. No hay presencia de aceites ni en el agua, ni en el sedimento; pero se perciben olores de aguas residuales y una leve turbidez por el material suspendido sobre el canal, lo cual puede ser producto de la entrada de aguas residuales provenientes de las descargas domésticas. En la Figura 3-56, se presentan algunas imágenes y esquemas del sitio de muestreo.

Figura 3-56 Estación SE2-"Afloramiento Quebrada Santa Elena". Esquema del sitio de muestreo de acuerdo con el protocolo de Ausrivas para cuerpos de agua de alto gradiente

### Estación SE3: Quebrada el Cedro.

El punto de muestreo se ubica dentro del predio "La ¨Pradera" en la Vereda el Cerro. Esta finca es residencial y tiene un estanque piscícola dedicado al cultivo de trucha en la margen izquierda, el cual descarga sus aguas sobre la quebrada además de la escasa vegetación, se observa inestabilidad de la ribera. Aguas más arriba se observa una manguera de extracción de agua. La quebrada también se encuentra canalizada en la zona cercana a la vía que conduce a la vereda el cerro y es atravesada por un box culvert rectangular hacia otro predio de la vereda.

La vegetación se compone principalmente por helechos y plantas ornamentales. En general, se clasifica como rastrojo bajo con presencia de praderas exóticas y algunos árboles que no superan los 10 metros de altura.

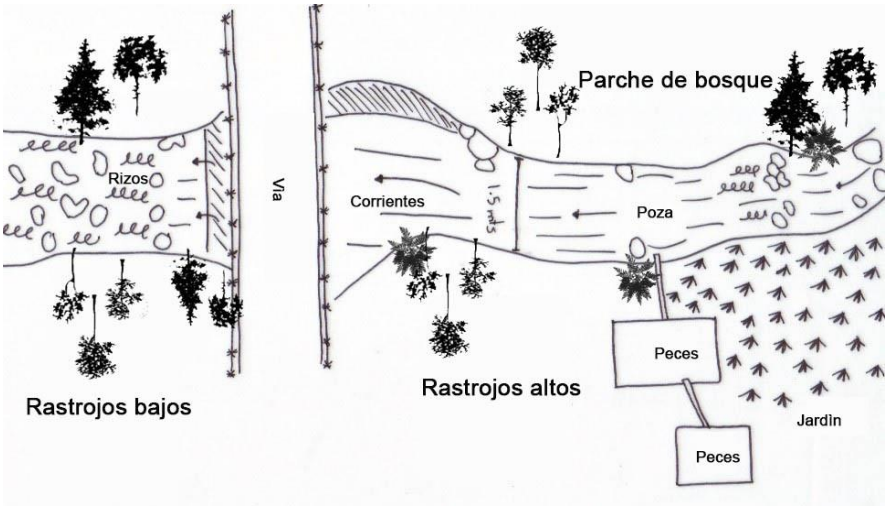



Figura 3-57 - Quebrada El Cedro. Esquema del sitio de muestreo de acuerdo con el protocolo de Ausrivas para cuerpos de agua de alto gradiente

El cauce tiene 1.5 metros de ancho. En el momento del muestreo se presenta un flujo bajo y poca presencia de troncos caídos que obstruyan el paso de los peces o den paso a la formación de palizadas. El canal presenta forma de caja ancha y el lecho lo compone principalmente las rocas de 10 cm de diámetro con una compactación media. Se trata de un lecho estable sin muchos signos de erosión en las riberas. En el sitio dominan las corrientes, las pocas pozas no son muy profundas (30 cm aproximadamente). Ambas riberas son de pendiente moderada (30-60°) y forma cóncava. Hay una construcción de concreto como medida de protección de la ribera izquierda en el la zona contigua al estanque piscícola, lo cual en cierta forma mitiga la erosión presentada en esta ribera. En el agua se perciben olores extraños provenientes de vertimiento del agua residual del estanque, además el agua se observa turbia a causa del material suspendido.

### Estación SE4: Quebrada el Cedro 1

El cuerpo de agua se ubica en la vereda El Cerro, antes de la desviación de la vía hacia el la zona denominada el Mirador de Santa Elena a sus alrededores se desarrollan principalmente, cultivos agrícolas transitorios, tales como papa y papa criolla. En el punto de muestreo se encuentra un tanque de captación de agua del cual salen mangueras de ½, 1 y 1 ½ pulgadas de diámetro, adicional a esto se observan estanques piscícolas con vertimientos directos hacia la quebrada, con la captación para los mismos aguas más arriba del cauce.

La vegetación riparia se compone principalmente de helechos y arbustos, no se observan muchos árboles de más de 10 metros de altura. La ribera derecha presenta terrenos con vegetación despejada, buena parte del área está dedicada a las actividades agropecuarias, mientras que, a lo largo de la ribera izquierda, la vegetación es más abundante. La zona en general, se encuentra en rastrojo bajo e incluso alcanza a obstruir gran parte del cauce. El ancho del canal no sobrepasa el metro de ancho, con un flujo muy bajo de agua, se trata de un canal recto en forma de U aplanada con un paso muy restringido para el paso de los peces, debido a los depósitos de sedimentos a lo largo del tramo, asi como al bajo nivel del agua.

Las riberas son cóncavas de pendiente baja (10-30°). La partícula dominante del lecho es el légamo con piedras subangulares en algunos sectores del tramo. El sitio de muestreo está compuesto en su totalidad por corrientes de muy bajo caudal (2,5 l/s). El agua ocupa menos del 75% del canal disponible. En las márgenes se evidencia un alto grado de erosión, especialmente en las zonas sin vegetación y sin ninguna medida de protección natural o artificial, sobre ellas. En los sedimentos y en el agua se perciben olores a materia organica en descomposición y típica de reacciones anaeróbias. Adicional a esto el agua se observa turbia por el lavado de las plantas.

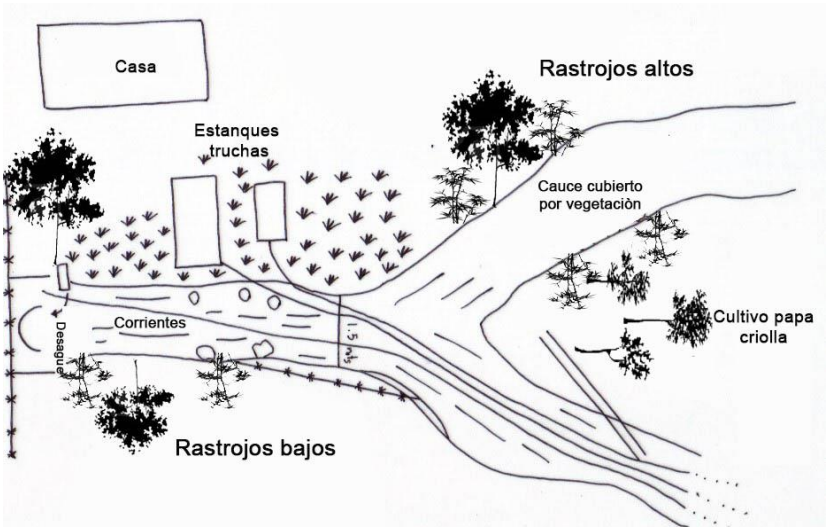



Figura 3-58 - Estación El Cedro I Esquema del sitio de muestreo de acuerdo con el protocolo de Ausrivas para cuerpos de agua de alto gradiente

### Estación SE5: Quebrada Santa Elena,- Finca Villa Alejandra.

El tramo de muestreo se encuentra ubicado en la finca Villa Alejandra, ubicada en la vereda el Cerro del corregimiento de Santa Elena. La zona se caracteriza por presentar una vegetación despejada en la ribera derecha, compuesta de pastos limpios pero sin presencia de ganado, hacia la ribera izquierda se observa una margen de bosque de aproximadamente 3 metros compuesta de Chusquea, Meriania nobilis (Amarraboyo) y helechos principalmente; e inmediatamente después, una zona de potreros. La quebrada en la ribera derecha presenta un afluente bastante contaminado, se observa basura y olores desagradables producto de las aguas vertidas.

El cauce mide 2,5 metros. Presenta un flujo bajo lo que posiblemente no favorece el asentamiento de peces de gran tamaño en la zona, adicional a esto, se observan barras laterales de roca, aunque éstas no presentan ninguna restricción para el paso de los peces. Se trata de un lecho compuesto principalmente por rocas de aproximadamente 30 cm de diámetro de compactación baja, las zonas predominantes sobre el lecho son las corrientes aunque también se observan algunas pozas de aproximadamente 60 cm de profundidad. Las márgenes son de pendiente escarpada con presencia de raíces que pueden otorgarle cierta estabilidad, a pesar de la posible presencia de ganado en la zona. Se observa material vegetal caído sobre el sustrato que puede ser una oferta potencial para el mantenimiento de la epifauna. El caudal medido en el momento del muestreo fue de 54,3l/s.

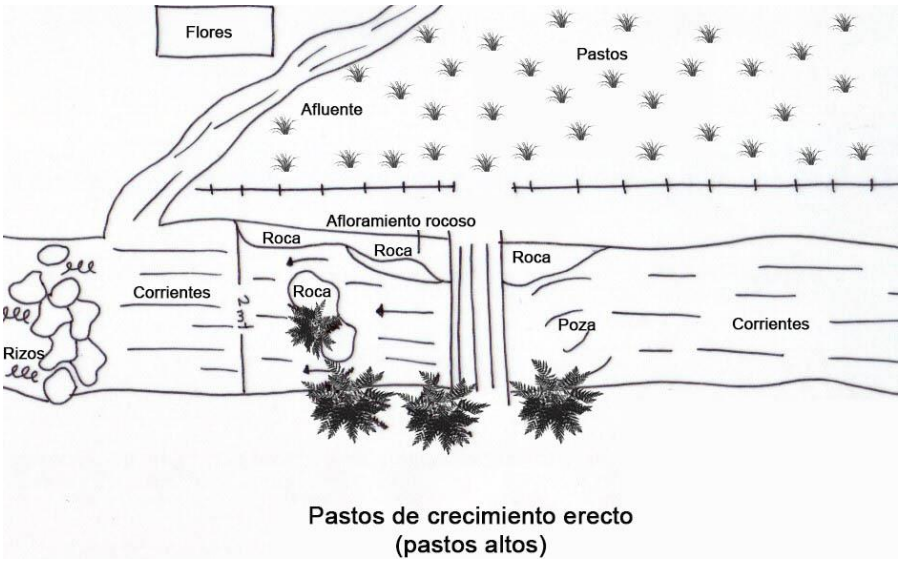



Figura 3-59 - Estación SE5. Quebrada Santa Elena- Finca Bella Alejandra Esquema del sitio de muestreo de acuerdo con el protocolo de Ausrivas para cuerpos de agua de alto gradiente

### Estación SE6 Quebrada la Escorrentía

El cuerpo de agua pasa por el predio Rancho Carrieles, en la Vereda el Cerro. En general, la zona aledaña se encuentra bastante perturbada. En la ribera derecha se observa un área dedicada a la exploración avícola, y en la ribera derecha, cultivos de papa, y mora también hay una captación artesanal para el mantenimiento de unos estanques de trucha que descarga sus aguas a la quebrada nuevamente más abajo. También hay evidencia de un pequeño represamiento para el mantenimiento de patos y se observa ganado equino sobre la ribera izquierda que impacta el cuerpo de agua por la escorrentía. La vegetación en la zona riparia se compone de helechos y

arbustos que se distribuyen en una pequeña franja antes de darle paso a las zonas destinadas para las actividades agrícolas.

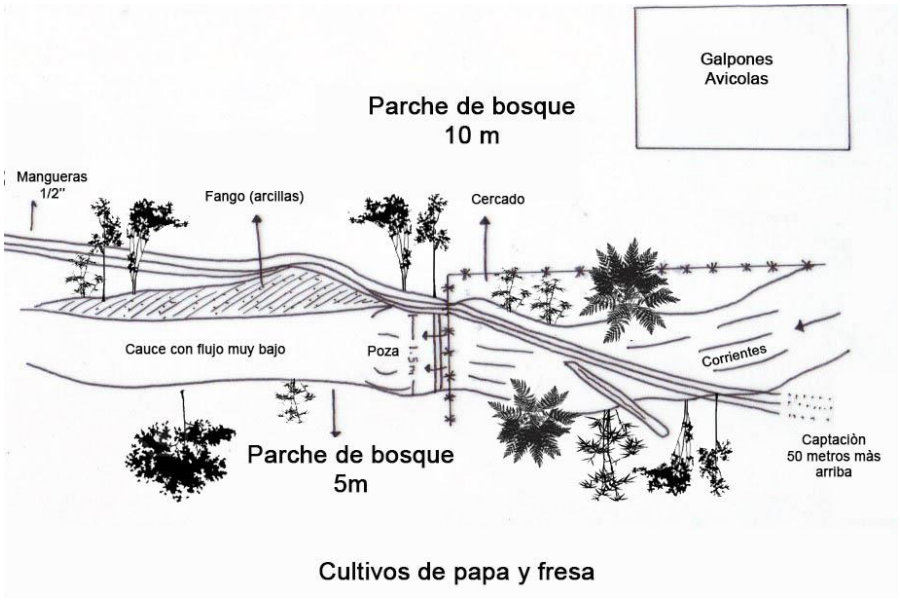



Figura 3-60 - Estación SE6 Quebrada La Escorrentía Esquema del sitio de muestreo de acuerdo con el protocolo de Ausrivas para cuerpos de agua de alto gradiente

El cauce, mide casi 1 metro de ancho en su parte más angosta. Se observan algunas barras centrales con vegetación. El lecho está en su totalidad compuesto de légamo sin ningún grado de compactación, el flujo de agua en el momento de muestreo fue bajo, lo cual hace que predominen las zonas de corriente de bajo caudal (1,1l/s). Ambas riberas tienen pendiente plana y no hay ningún factor que le ofrezca protección a la misma, es por esto que las márgenes presentan una erosión severa, también se registra presencia de micrófitas, y algunos briofitos a lo largo del sitio. Los aceites en el sedimento son moderados y en el agua se presentan en forma de manchas en algunas áreas, que sobresalen sobre la turbidez general del sitio.

### Estación SE7 Confluencia San Ignacio-Santa Elena

La quebrada pasa por las oficinas del Acueducto Multiveredal de Santa Elena, y sigue por toda la vía principal del corregimiento. En la ribera derecha se observa vegetación despejada, debido a que se trata de una zona residencial, así como la evidencia de talas, mientras que en la ribera

izquierda, la vegetación se compone de rastrojo alto con presencia de Pino Pátula, gramíneas, *Meriania nobilis* (amarraboyos) y *Thumbergia alata* (ojo de poeta) distribuidos a lo largo de la ribera.

El cauce mide casi 5 metros, con presencia de barras laterales de sedimento y algunas estructuras de concreto haciendo parte del mismo. El flujo de agua presentó un caudal de 121,7 l/s, sin ninguna restricción a pesar de la existencia de barras laterales en algunas áreas del sitio. El lecho se compone principalmente de rocas de aproximadamente 10 cm de diámetro que le otorgan una estabilidad moderada al lecho. Las zonas predominantes son los rizos y las corrientes. Las márgenes no presentan evidencia de erosión, la pendiente en ambas riberas es escarpada y de forma convexa. En el sitio de muestreo, a pesar de ser una zona con ciertos niveles de perturbación, no presenta olores extraños ni se observan vertimientos cercanos.

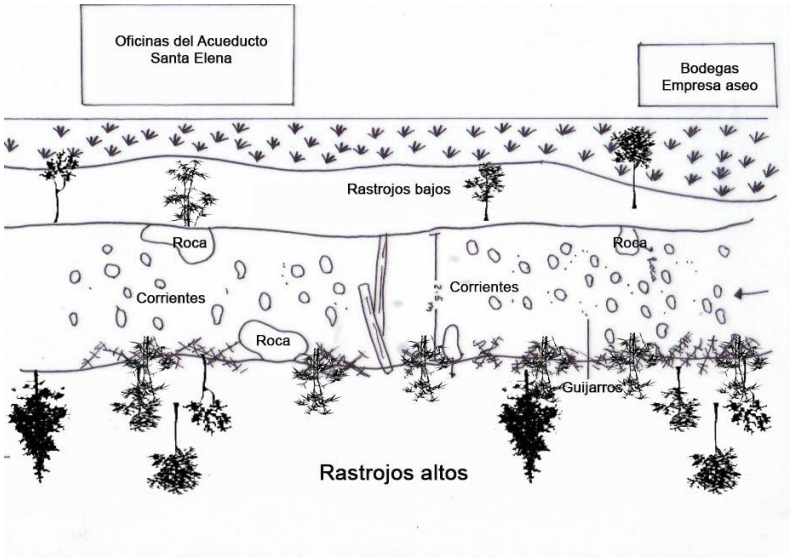



Figura 3-61 - Confluencia San Ignacio- Santa Elena Esquema del sitio de muestreo de acuerdo con el protocolo de Ausrivas para cuerpos de agua de alto gradiente

### Estación SE8 Quebrada La Avícola

El sitio se ubica en el sector central de Santa Elena(al lado del centro médico), el cual se encuentra muy urbanizado. La forman la confluencia de los afluentes La Cerca y la Avícola y descarga sus aguas en la quebrada Santa Elena después de atravesar la vía principal del corregimiento por un box coulvert. La perturbación sobre el sitio es bastante alta, se observan vertimientos de aguas residuales, antes de la confluencia de los dos afluentes y justo antes de la vía. La vegetación riparia

es rastrojo alto. En la ribera izquierda se observa una cerca viva de gramíneas de la familia Chusquea con algunos árboles ocasionales, mientras que en la ribera derecha, los árboles son muy dispersos y gran cantidad de helechos.

El cauce mide 2 metros de ancho. Presenta un flujo bajo a pesar de que el día anterior al muestreo, se presentaron fuertes lluvias en la zona. Los microhábitats predominantes son las corrientes (4,4l/s). El sustrato se compone principalmente de grava con presencia de rocas subangulares de por lo menos 20 cm de diámetro. A lo largo del sitio. el canal tiene forma de caja ancha, en las márgenes se observan señales de una canalización que existió, ya que se encuentran unas estructuras artificiales de concreto, que a su vez funcionan como medidas de protección de riberas; debajo de estas estructuras se observan áreas arcillosas. Se perciben olores característicos de aguas residuales pero la turbidez en el momento del muestreo fue leve, quizás por el lavado derivado de las lluvias presentadas la noche anterior.

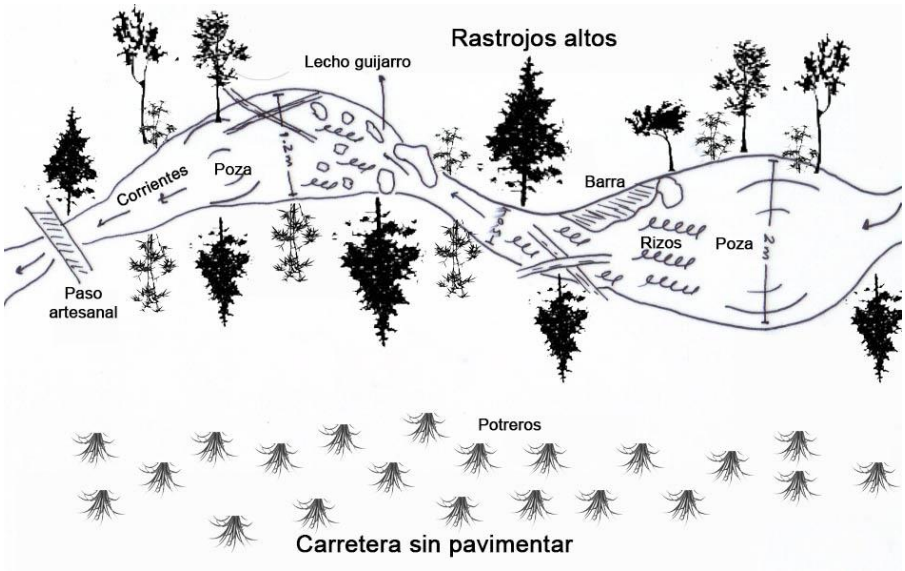



Figura 3-62 - Estación SE8 Quebrada La Avícola Esquema del sitio de muestreo de acuerdo con el protocolo de Ausrivas para cuerpos de agua de alto gradiente

### Estación SE9 Quebrada Santa Teresa

El punto de muestreo se encuentra dentro de la parcelación Santa Teresa, en la zona central de Santa Elena. La parcelación es solo de uso urbano no se observan actividades agrícolas o

ganaderas. Se determinaron unas mangueras de captación de agua, que abastecen algunas viviendas de la parcelación. En el punto, la zona ribereña se encuentra en rastrojo alto, hay evidencias de talas en la ribera izquierda, y en la ribera derecha hay un fragmento de bosque con presencia de Pino Ciprés, Pino Pátula y Eucaliptos, así como también algunos individuos de la especie *Meriania nobilis*.

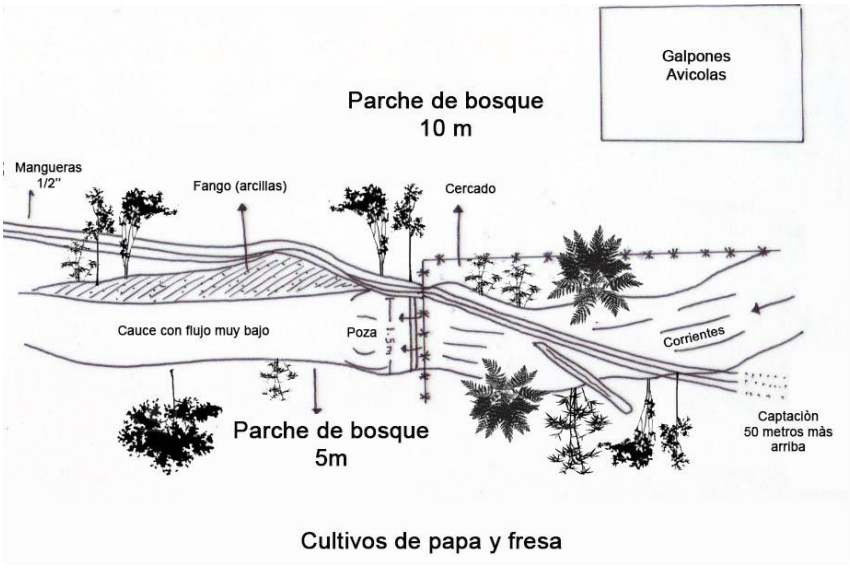



Figura 3-63 - Estación SE9: Quebrada Santa Teresa, Esquema del sitio de muestreo de acuerdo con el protocolo de Ausrivas para cuerpos de agua de alto gradiente

El cauce del cuerpo de agua mide aproximadamente 60 cm de ancho. Se trata de un lecho pantanoso sin ninguna compactación, por lo cual, no se observan las condiciones necesarias para el mantenimiento de las comunidades de macroinvertebrados, Las zonas dominantes sobre el lecho son las corrientes, aunque por el bajo flujo de agua se forman algunas pozas de muy poca profundidad. El canal tiene forma de U aplanada con una pendiente plana en ambas riberas. La hojarasca en sitio no es abundante, quizá por las lluvias que se presentaron el día anterior. El agua se observa clara y sin señales de contaminación por aguas residuales.

### Estación SE10 Quebrada Paysandú 1

El sitio de muestreo se ubica en la Vereda El Recreo, limita con los predios de la Universidad Nacional de Colombia por la ribera izquierda. En el área se encuentran gran cantidad de Potreros, lo que deriva afectaciones a la quebrada por el paso de ganado y la escorrentía, igualmente en la

parte superior del tramo existe una presa artesanal, aunque sin evidencia de captación. Aguas más abajo del sitio, hay una descarga de aguas residuales domésticas, lo que hace que el agua se observe turbia. Pese a esto, justo en las márgenes de la quebrada, existe un fragmento de vegetación; se observan pinos y algunas poáceas, pero principalmente dominan los arbustos y helechos sobre las márgenes.

El cauce mide 1,5 metros de ancho. El caudal en el momento del muestreo fue de 1,9 l/s, el paso de los peces está restringido por la presa que se encuentra en el sitio, además hay barras laterales de roca, y sedimento sobre ambas riberas. El canal tiene forma de caja ancha con pendiente escapada de forma convexa. El lecho tiene muy baja compactación lo que influye en la turbidez del agua, y en poco sustrato disponible para los macroinvertebrados. Las zonas predominantes son las pozas con una profundidad aproximada de 50cm, y en menor medida corrientes pequeñas que puede no favorecen el asentamiento de una comunidad de peces muy diversa en el sitio. Las márgenes presentan baja erosión gracias al fragmento de bosque que funciona aparentemente como una medida de protección de las riberas.

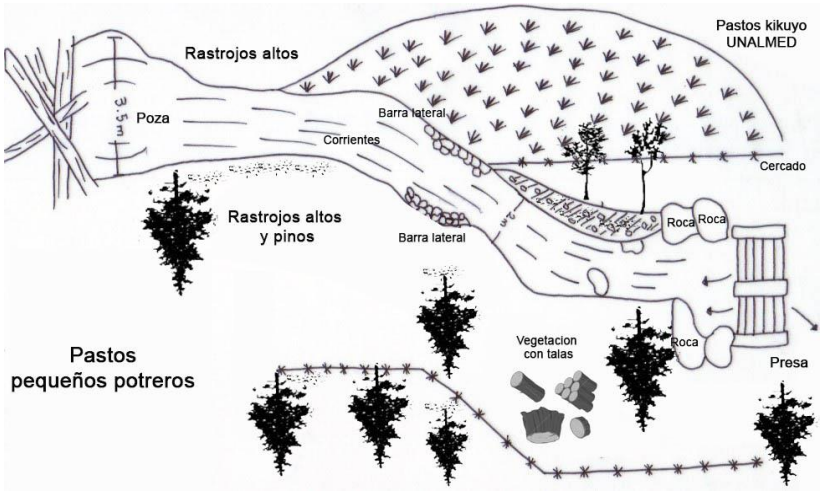



Figura 3-64 - Estación SE10 Quebrada Paysandú 1 Esquema del sitio de muestreo de acuerdo con el protocolo de Ausrivas para cuerpos de agua de alto gradiente

### Estación SE11 Quebrada Paysandú 2

El sitio de muestreo se encuentra ubicado antes de la confluencia con la quebrada Santa Elena en el sector el Recreo. El cuerpo de agua está bastante intervenido. Por ser un área residencial, la

quebrada se encuentra canalizada a lo largo de la ribera derecha, se observan tubos de descarga directamente en la quebrada. En la ribera izquierda, la vegetación esta despejada, con presencia de especies ornamentales exóticas (*Thumbergia alata*) y pocos árboles dispersos principalmente Pinos.

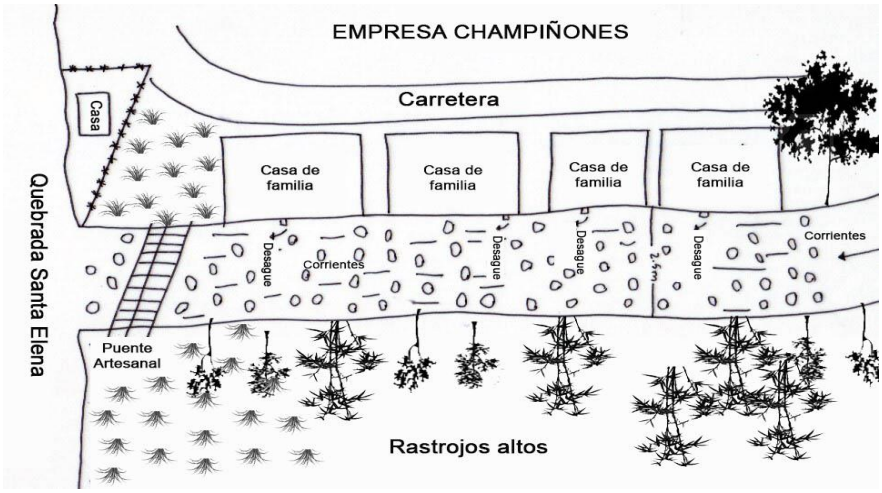



Figura 3-65 - Estación SE11Quebrada Paysandú Esquema del sitio de muestreo de acuerdo con el protocolo de Ausrivas para cuerpos de agua de alto gradiente

El cauce es recto con un lecho principalmente compuesto de rocas de 10 cm de diámetro aproximadamente de baja compactación, predominan zonas de corrientes en todo el sitio. El flujo de agua durante el muestreo fue bajo 5,5 l/s sin embargo, se presentaron fuertes lluvias que aumentaron el nivel del agua en pocos minutos. Sobre el sustrato hay una proliferación de algas que indica la gran oferta que existe de materia orgánica, evidencia de aguas contaminadas.

El canal presenta forma de U aplanada con una ribera izquierda de forma convexa y pendiente moderada, y con la ribera derecha con una canalización en concreto que funciona como base de la vivienda asentada allí; con una alta erosión producto de la baja vegetación que existe en la zona. El agua se observa bastante turbia con un olor característico de aguas residuales al igual que el sedimento, cubierto en su mayoría de algas.

### Estación SE12 Quebrada la Torre

El sitio se localiza detrás del restaurante La Montañita. El cauce está totalmente cubierto por la vegetación, se observa un pequeño hilo de agua que se encharca justo antes de la captación unos 20-30 metros más abajo, que recoge casi toda el agua dejando un rebose pequeño. Hay evidencia

de talas y deforestación en unos 2 metros a los lados de las riberas, posiblemente para facilitar el acceso al tanque y el mantenimiento de la tubería. Hacia la ribera izquierda, se observan pastos limpios, a unos 10 metros más allá del cauce y en la derecha, domina el rastrojo alto. Se perciben olores extraños en el sedimento quizá por la descomposición de la materia orgánica.

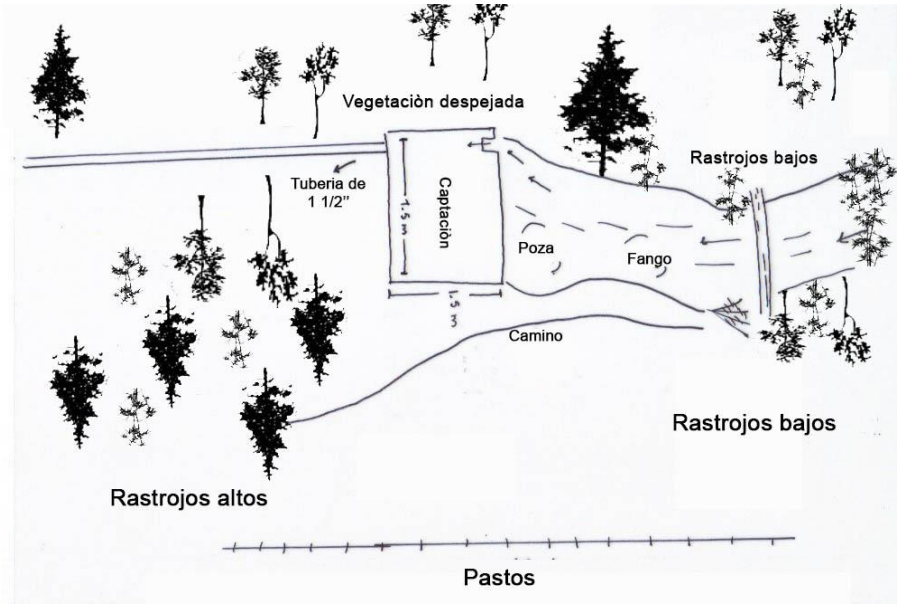



Figura 3-66 - Estación SE12 Quebrada La Torre Esquema del sitio de muestreo de acuerdo con el protocolo de Ausrivas para cuerpos de agua de alto gradiente

El cauce mide aproximadamente un metro de ancho, se observan barras centrales con restos de vegetación. El lecho es pantanoso, de muy baja compactación, dominan las corrientes aunque de muy bajo caudal (0,4l/s). El canal tiene forma de U aplanada, con una erosión moderada sobre ambas márgenes de pendiente plana sin presencia de rocas, lo que desfavorece el asentamiento de macro invertebrados y peces en la zona.

### Estación SE13 Quebrada Santa Lucia

En el sitio de muestreo la quebrada atraviesa la carretera que conduce a la vereda El Plan, pasa además por un predio dedicado al cultivo de flores, sin embargo, en ese predio el cuerpo de agua atraviesa por un potrero y el cauce está totalmente cubierto por pastos de crecimiento erecto. La

vegetación justo en el tramo de muestreo, se encuentra en rastrojo bajo, con dominancia de helechos, en medio de un valle plano.

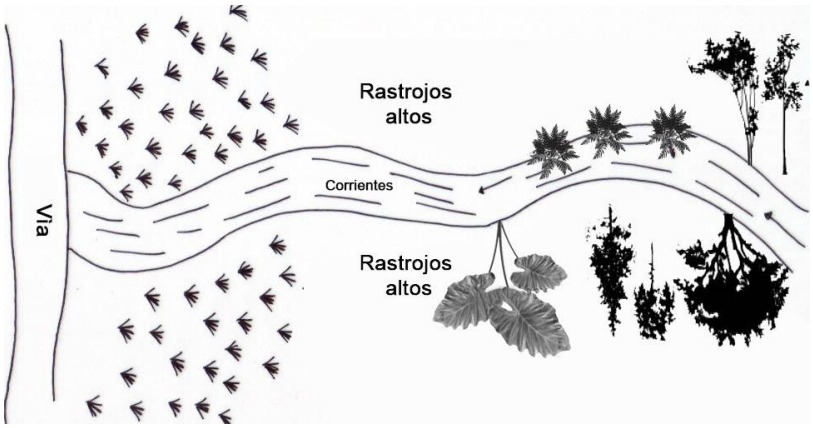


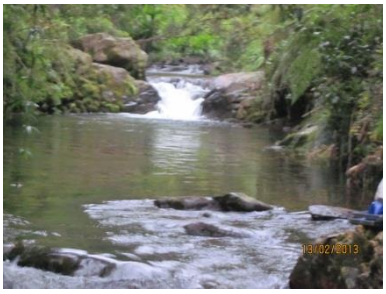

Figura 3-67 - Estación SE13 Quebrada Santa Lucia Esquema del sitio de muestreo de acuerdo con el protocolo de Ausrivas para cuerpos de agua de alto gradiente

El cauce no alcanza el metro de ancho, presenta un canal en forma de U profunda con más de 90 centímetros de profundidad, un lecho pantanoso sin ninguna compactación, hasta que llega al box culvert, por lo tanto no se presenta sustrato adecuado para el asentamiento de una diversa comunidad de macroinvertebrados. Sobre las márgenes se observan partículas de sedimento que le otorgan al agua un color cobrizo, sin presencia de olores y con moderadas trazas de aceite en el sedimento. Las características del flujo podrían asociarse a una poza, en todo el tramo de muestreo, que se desborda hacia una acequia artificial en dirección de la vía que ésta atraviesa.

### Estación SE14 Quebrada Santa Elena 2

En este punto, la quebrada Santa Elena ha aumentado considerablemente su caudal, (869 l/s). Se ubica en el sector de Santa Elena Central municipio de Medellín. Se trata de un valle de pendientes de ángulo agudo, en la parte superior de la ribera derecha se encuentran asentadas unas viviendas y se observan cultivos de frijol y papa, las cuales son fumigadas con agroquímicos, que pueden llegar al cuerpo de agua por efectos de la escorrentía. En la ribera izquierda en cambio hay un bosque con varias especies nativas *Meriana nobilis* (Amarraboyo) y varias melastomatáceas, así como especies exóticas principalmente pinos. El sitio posee un afluente de un afloramiento a unos 100 metros de la ribera derecha. Se observan afloramientos rocosos en algunos del tramo de muestreo en ambas riberas.

El cauce mide aproximadamente 8 metros de ancho con gran cantidad de rocas subangulares de aproximadamente 50 centímetros, con briofitos adheridos a ellas, el lecho lo componen rocas de 10 ó 20 centímetros de diámetro que le otorgan una buena estabilidad. El canal tiene una U aplanada. Los microhábitats presentes son muy diversos, dominan los rizos y los rápidos, pero también se observan saltos, corrientes y pozas de un poco más de un metro de profundidad, lo que favorece la colonización de diversidad de especies ícticas en el sitio. Las márgenes en ambos lados de la quebrada son bastante estables, debido al sustrato rocoso, no hay señales de erosión ni depósitos de sedimento sobre las orillas. El agua se observa clara y no se perciben olores extraños.



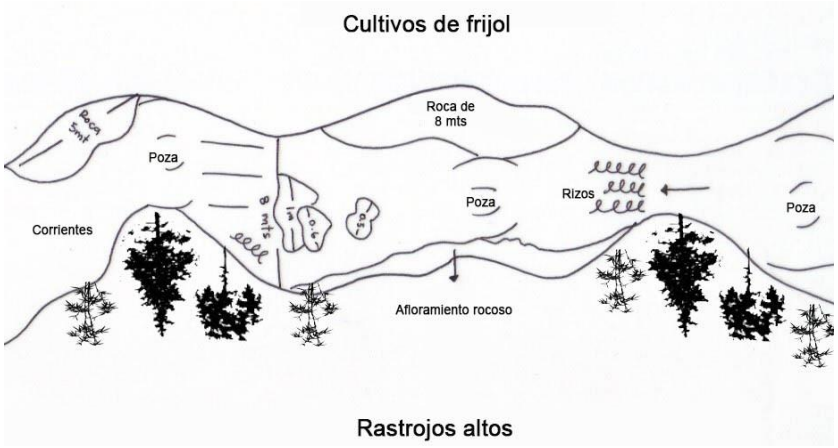



Figura 3-68 - Estación SE14 Quebrada Santa Elena 2 Esquema del sitio de muestreo de acuerdo con el protocolo de Ausrivas para cuerpos de agua de alto gradiente

### Estación SE15: Quebrada El Yarumo

El cuerpo de agua se ubica en el predio Los Arrayanes, granja de la fundación San Gabriel a dos kilómetros antes del parque de este corregimiento. Esta granja cuenta con un terreno de trece hectáreas, en la mitad del terreno se encuentran diferentes cultivos en invernaderos hidropónicos de hortalizas, aromáticas, también cuenta con criaderos de cabras, ovejas, patos y gallinas. La zona presenta una vegetación bastante conservada rodeada de un bosque poco intervenido y con una plantación de roble en sectores aledaños, sin embargo, se realiza la captación del agua de la quebrada para el mantenimiento de la granja, dejando muy poca agua de rebose en el período seco.

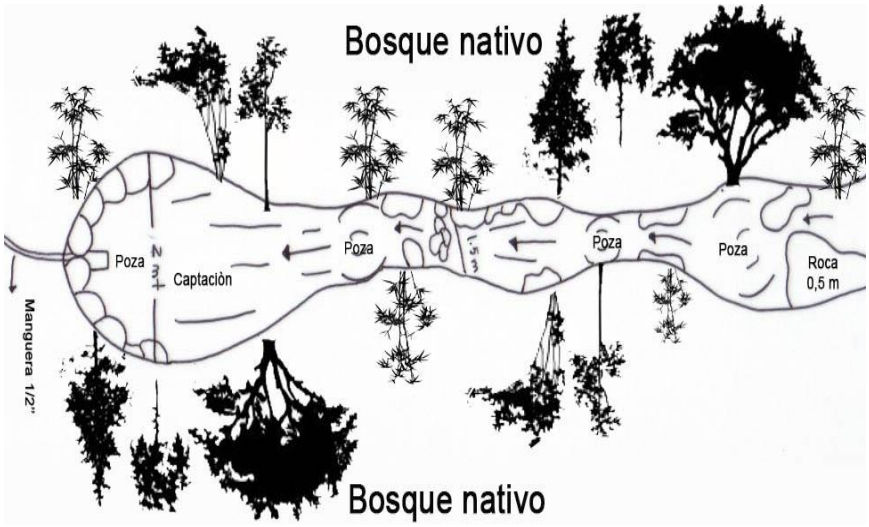



Figura 3-69 - Estación SE15 Quebrada el Yarumo Esquema del sitio de muestreo de acuerdo con el protocolo de Ausrivas para cuerpos de agua de alto gradiente

El cauce no alcanza el metro de ancho, tiene un canal en forma de U profunda con un lecho arcilloso de muy baja compactación. Existen briofitos adheridos a los leños y las pocas rocas presentes en el lecho que dan cuenta de la humedad de la zona, debido a la cobertura vegetal. La vegetación obstruye gran parte del cauce, y los leños caídos ofrecen un sustrato potencial para el asentamiento de la epifauna, sin embargo, la presa artesanal construida en el sitio para la captación bloquea el flujo y dejan un tramo del cauce seco. La forma predominante sobre el lecho son las pequeñas corrientes (Q=1,4l/s). Las riberas presentan una pendiente plana con señales de poca erosión.

### Estación SE16 Confluencia El Yarumo y Las Antenas

El sitio de muestreo está ubicado en el sector del Silletero en el corregimiento de Santa Elena. Se trata de una zona con una cobertura vegetal en rastrojo alto, con abundancia de helechos y arbustos. Hay evidencia de una canalización hecha en el pasado, dado que se observa un box coulvert rectangular por el que atraviesa la quebrada y sobre el cual existe un bosque en regeneración; y unos 50 metros después hay dos que dirigen el cuerpo de agua debajo de la vía principal de Santa Elena.

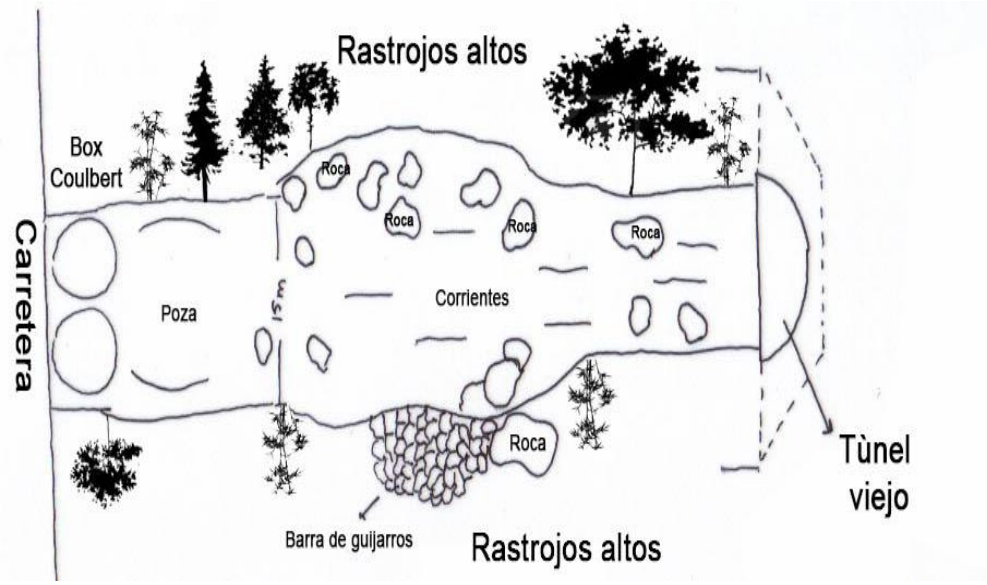



Figura 3-70 - Confluencia El Yarumo y Las Antenas Esquema del sitio de muestreo de acuerdo con el protocolo de "Ausrivas para cuerpos de agua de alto gradiente"

El cauce mide 1,50 metros de ancho, tiene un canal en forma de U aplanada con un flujo bajo de agua (24,1 l/s). Se observan barras laterales de roca y arena y briofitos adheridos a las estructuras artificiales en el sitio. Es un cuerpo de agua con una alta pedregosidad lo que le confiere cierta estabilidad al lecho, en el cual dominan zonas de rizos y corrientes, aunque se observa un salto y una poza de más de un metro de profundidad. Las riberas tienen pendiente escarpada con las márgenes poco erosionadas, debido a que las canalizaciones que hacen parte de cada estructura le dan estabilidad a la ribera. El agua se observa clara a lo largo del sitio de muestreo, pero en la poza se torna turbia quizá por la acumulación de sedimento.

### Estación SE17: Quebrada El Placer parte alta

La estación de muestreo está ubicada en la vereda el Placer, en una zona en su mayoría compuesta por potreros pero con un pequeño fragmento de bosque por el cual atraviesa el cuerpo de agua, allí se encuentran especies como Meriana nobilis (Amarraboyo), (Pteridium aquilinum) helecho marranero y Pinos se observan vertimientos se aguas domésticas y cultivos de astromelias cercanos al sitio de muestreo. Los impactos generados por el acceso de ganado a la fuente hídrica y la vegetación despejada más arriba caracterizan al sitio con un perturbación extrema.

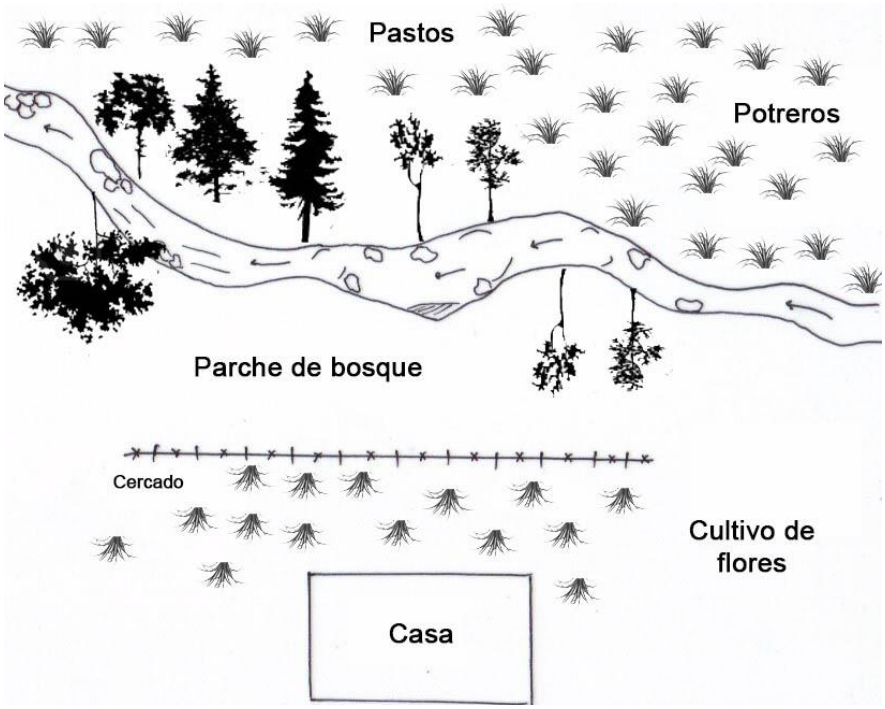



Figura 3-71 - Quebrada El Placer parte alta Esquema del sitio de muestreo de acuerdo con el protocolo de Ausrivas para cuerpos de agua de alto gradiente

El cauce no supera el metro de ancho, en forma de U aplanada y con un lecho pantanoso con algunas rocas subangulares en algunas partes del tramo, las zonas dominantes son las corrientes, hay gran cantidad de hojarasca y leños caídos sobre el sustrato además de barras laterales de sedimento fino, las riberas son planas, erosionadas y de poca estabilidad se observan espumas sobre el agua con una turbiedad y olores característicos de la presencia de aguas residuales.

### Estación SE18 Quebrada El Placer aguas abajo

La quebrada pasa por el sector del Silletero. El cuerpo de agua cruza la vía principal del corregimiento de Santa Elena, éste se encuentra en medio de un bosque en regeneración donde se observan algunas melastomatáceas, y otras especies nativas características de la zona, también hay presencia de epifitas y briofitos adheridos sobre los troncos y las rocas.

El cauce mide aproximadamente 2 metros de diámetro, con un canal en forma de U aplanada y un lecho compuesto principalmente de rocas de 10 cm de diámetro que le confieren una baja estabilidad, con barras laterales de guijarro sobre la ribera izquierda. Las zonas predominantes

sobre el sitio son los rizos aunque se observan algunas corrientes y pozas de hasta 60 centímetros de profundidad aproximadamente. Se observa unas buenas condiciones para el asentamiento de comunidades de macroinvertebrados, debido a la disponibilidad de hojarasca sobre el sustrato.

El agua en el momento del muestreo tuvo un caudal de 58,6 l/sg con ninguna restricción para el paso de los peces, Las riberas tienen una pendiente moderada sin señales de erosión severa sobre las márgenes. El agua se observa con una turbidez leve y no presenta olores extraños.

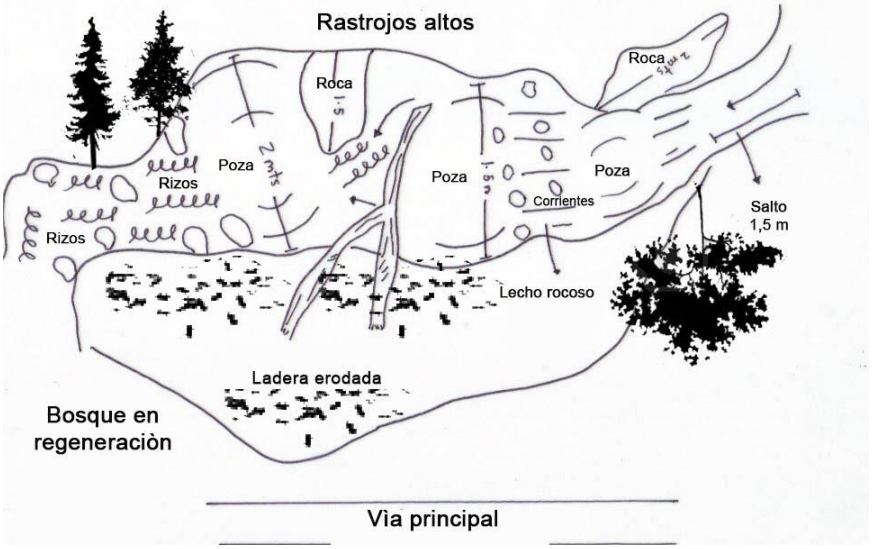



Figura 3-72 - Quebrada El Placer aguas abajo Esquema del sitio de muestreo de acuerdo con el protocolo de “Ausrivas para cuerpos de agua de alto gradiente

### Estación SE19 Quebrada Santa Elena 3

El sitio de muestreo se encuentra ubicado dentro de un predio antiguamente dedicado al procesamiento de los huesos de ganado, se trata de un valle profundo con un banco ancho justo en las márgenes de la quebrada. La vegetación ribereña está compuesta por Eucaliptos, Pinos Ciprés y Pino Pátula sobre la ribera izquierda y pastos de crecimiento erecto y *Pteridium aquilinum* (helecho marranero) sobre la ribera derecha. No hay evidencia de vertimientos, pero la quebrada atraviesa todo el sector de Santa Elena Central por lo que en este punto el agua se observa turbia y perciben leves olores a aguas residuales, así como basura represada en las barras.

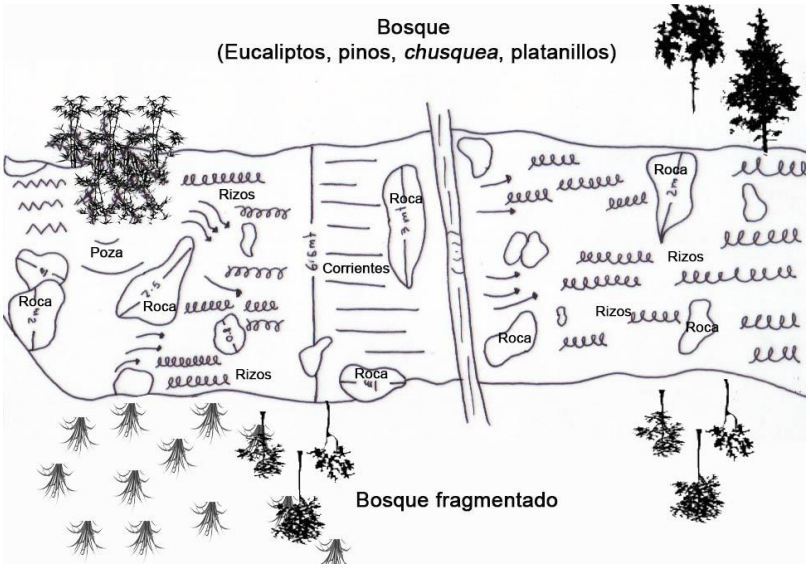



Figura 3-73 - Quebrada Santa Elena 3 Esquema del sitio de muestreo de acuerdo con el protocolo de Ausrivas para cuerpos de agua de alto gradiente

El cauce mide 6,6 metros de ancho se observan grandes rocas a lo largo del tramo formando barras laterales, el agua baja con un caudal de 702 l/s. El canal presenta forma de U aplanada con un lecho compuesto por rocas de gran tamaño y guijarro principalmente. Tiene microhábitats muy diversos en los que dominan los rizos y los rápidos, las pozas alcanzan los 60 centímetros de profundidad, lo que permite el establecimiento de una comunidad íctica muy diversa. Las riberas son de una pendiente escarpada pero sin signos de erosión.

### Estación SE20 Quebrada Santa Bárbara Parte Alta

El sitio de muestreo se encuentra ubicado bajando por la vía principal de Santa Elena hacia la vereda Media Luna, contigua a la parcelación El Mirador de Santa Elena. Es la fuente de abastecimiento del acueducto media luna, por lo cual se presentan tubos de captación de dos (2) y dos y media pulgadas en el sitio, así como una tubería de tres pulgadas destinada a transportar el agua que forma la cascada artificial de la parcelación. La vegetación en las riberas, está compuesta por un bosque en rastrojo alto con abundancia de gramíneas y helechos (*Pteridium aquilinum*) y Pinos de más de 10 metros de altura. En la ribera derecha hay señales de deforestación e intervención antrópica, debido a la presencia de basura y pastos secos, mientras que en la ribera izquierda se observa un camino de piedra y zonas bastante conservadas.

El cauce mide alrededor de 3 metros de ancho y un canal en forma de U aplanada con un sustrato en el cual predominan las rocas de aproximadamente 10 centímetros de diámetro, presencia de rocas subangulares a lo largo de todo el tramo de muestreo con briofitos adheridos, se observan barras de sedimento fino, sin embargo, no hay restricciones para el paso de los peces; además sobre el canal hay buena disponibilidad de hojarasca lo que otorga buenas condiciones de hábitat para las comunidades de macroinvertebrados. Las formas predominantes del lecho son las corrientes y las pozas de aproximadamente 60 cm de profundidad. Las riberas presentan una pendiente moderada hacia la izquierda con algunos signos de erosión, y, escarpa a la derecha en dirección de la corriente, con unas formaciones rocosas que le brindan estabilidad a la ribera. El agua es clara y no tiene evidencia de aceites u olores extraños.

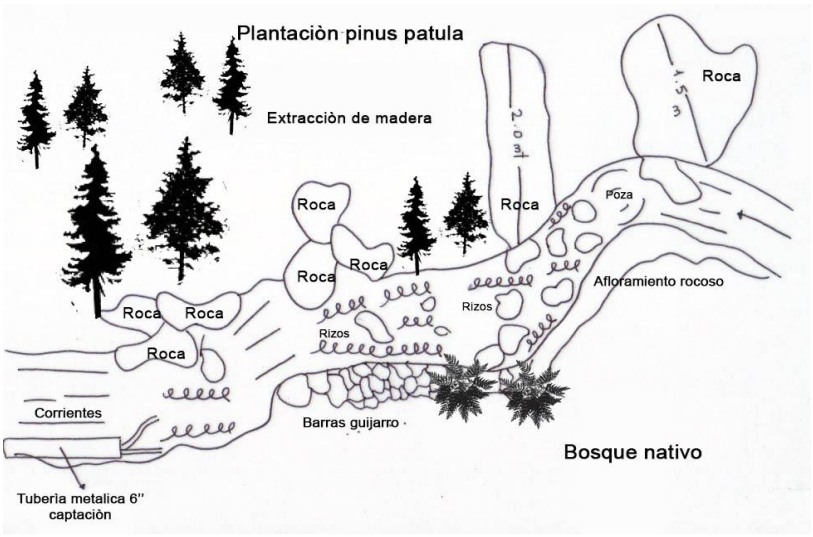



Figura 3-74 - Estación SE20 Quebrada Santa Bárbara Parte Alta Esquema del sitio de muestreo de acuerdo con el protocolo de "Ausrivas para cuerpos de agua de alto gradiente

### Estación SE21: Quebrada La Espadera

La quebrada se encuentra ubicada en la vereda El Plan, donde la disolución de la roca a través de planos de debilidad creó una red de drenaje subterránea y rasgos superficiales que permiten calificarlo como una zona de relieve cársico característico para la formación de dolinas. La quebrada La Espadera se considera un valle cársico, debido a que sus aguas se pierden en un sumidero y afloran nuevamente en el sector de Buenos Aires, por donde cruzará la vía cielo abierto. En el sitio de muestreo se observa el sumidero, sin embargo, hay una acequia que

transporta parte del agua que no permite la infiltración total de la misma y por ser periodo seco el cauce en esa zona estaba sin agua.

En el sitio de muestreo se observan tramos de vegetación despejada, céspedes pertenecientes a una zona de uso residencial, rastrojo bajo sin árboles de gran tamaño pero con arbustos y helechos que funcionan como medida de protección para las riberas y cultivos de mora fumigados con agroquímicos que generan afectación sobre la ribera y el cuerpo de agua.

A lo largo de la estación de muestreo se observan diferentes condiciones de hábitat; hay una primera parte aproximadamente de 50 metros donde el cauce no supera los 50 centímetros de ancho, y el canal es profundo, estrecho y de poca corriente, el lecho es pantanoso de baja compactación, y se observan restos de poda sumergida. Después de un salto de más o menos un metro, el ancho del cauce aumenta, se reduce la profundidad del canal y se observan unos afloramientos rocosos sobre ambas márgenes, además el caudal que genera el salto (12,3 l/s) es aprovechado para la captación de agua hacia otro predio. Después de un rápido disminuye la velocidad, se forma una poza y parte del flujo se infiltra en el sumidero, el cual tiene restos de animales, razón por la cual se perciben olores a materia orgánica en descomposición. En esta zona hay mayor evidencia de erosión y una menor estabilidad del lecho. El agua no presenta olores extraños aunque y se observa turbia a lo largo de todo el sitio.

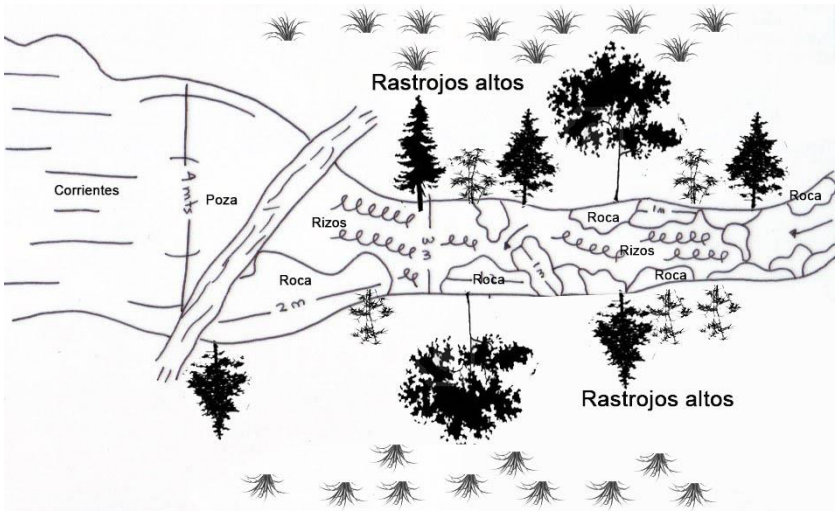
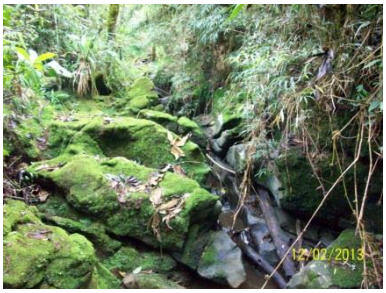



Figura 3-75 - Estación SE21: Quebrada La Espadera

## Estación SE22: Quebrada la Bisarra

Se ubica en la vereda El Plan, en el sector el Chispero. Al igual que La Espadera tiene formación de dolinas y se infiltra en medio del cauce. La vegetación de la zona riparia se compone principalmente de Pinos Ciprés y *Pteridium aquilinum* (helecho marranero), aunque también se observan otros árboles nativos, sin embargo, por fuera de las márgenes hay una zona de potreros y cultivos de papa y mora, que pueden afectar el cuerpo de agua por la escorrentía.



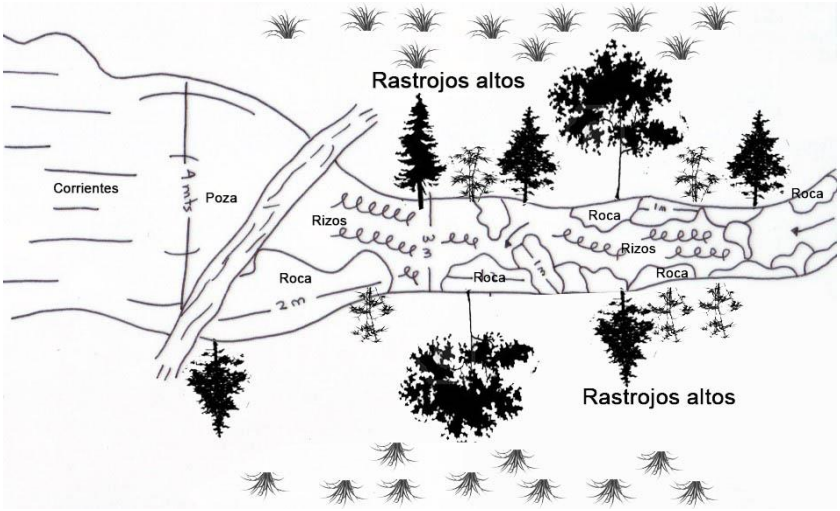



Figura 3-76 - Estación SE22 Quebrada la Bisarra Esquema del sitio de muestreo de acuerdo con el protocolo de Ausrivas para cuerpos de agua de alto gradiente

El cauce mide aproximadamente 1,5 metros de ancho con un lecho compuesto de rocas de gran tamaño (entre 1 y 4 metros de diámetro) y briofitos adheridos sobre ellas. Se observan evidencias del caudal que alcanza este cuerpo de agua, sin embargo en el momento del muestreo, presentó un flujo bajo donde predominaron principalmente pozas de distintas profundidades formadas entre los espacios dejados por las rocas del lecho. Se observan afloramientos rocosos sobre las márgenes, los cuales sirven de soporte para evitar la erosión de las riberas, que presentan una pendiente moderada de forma convexa. El agua es clara y no se perciben olores o aceites en el sedimento.

### Estación SE23 Quebrada La Aguadita- Portal Occidental

El punto se encuentra ubicado en el portal occidental del túnel de Santa Elena. El predio donde se encuentra esta estación, pertenece a la Gobernación de Antioquia, dada la restricción en el acceso por parte de particulares, el predio cuenta con cierto grado de conservación, sin embargo, existen

evidencias de intervenciones pasadas, como el tanque de captación de agua, la carretera de piedra y los filtros artesanales de hojarasca que se ubican a lo largo del tramo, sumada la presencia de algas adheridas al sustrato, indicadoras de una alta concentración de materia orgánica. La vegetación es principalmente rastrojo bajo con una gran abundancia de la especie *Thunbergia alata* y otra vegetación rastrera.

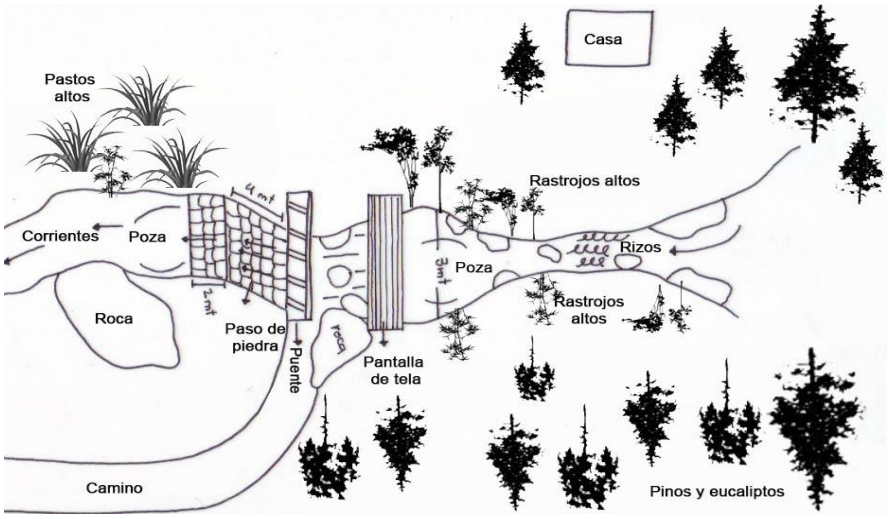



Figura 3-77 - Quebrada La Aguadita- Portal Occidental Esquema del sitio de muestreo de acuerdo con el protocolo de Ausrivas para cuerpos de agua de alto gradiente

El cauce es de aproximadamente un metro de ancho, presenta forma de U aplanada con un paso restringido, dado al salto que provoca la carretera que atraviesa el cauce. El lecho está compuesto por rocas de 30 centímetros de diámetro, las cuales pueden desalojarse fácilmente del sustrato. El flujo presenta un caudal de 5,9 l/s; las formas predominantes en el lecho son los rizos. Ambas riberas tienen pendiente plana antes de cruzar la carretera, pero después del cambio de pendiente, se torna escarpada de forma cóncava sin evidencia de erosión en las márgenes. El agua se observa levemente turbia pero sin olores o aceites.

### Estación SE24 Quebrada la Bocaná o Bonanza

El sitio de muestreo está ubicado en la vereda Media Luna antes de comenzar el tramo de vía cielo abierto en dirección Medellín. La vegetación riparia se encuentra en rastrojo alto con una gran presencia de coníferas, Pinos y Eucaliptos.

El cauce está totalmente cubierto por la vegetación, posiblemente se infiltra y cuando aflora es captada casi completamente por un tubo de 3 pulgadas que la transporta a otro tubo de mayor dimensión, que finalmente arroja el agua nuevamente al cauce unos 100 metros abajo para captarse de nuevo por un tanque ubicado en inmediaciones de la carretera, con un rebose mínimo por el canal natural del cuerpo de agua, sin embargo, en este canal se observan filtros de hojarasca y otras mangueras de captación, generando afectaciones sobre el lecho, derivando tramos de lechos seco, lo que evita el asentamiento de fauna íctica sobre el sitio.

El cauce mide casi dos metros de ancho. Presenta un lecho compuesto principalmente de guijarro de baja compactación. Las riberas son de pendiente moderada con forma cóncava. Se observa erosión en las márgenes, pero el agua disponible sobre el canal se observa clara, sin olores ni aceites, con un caudal de 15,4 l/s.

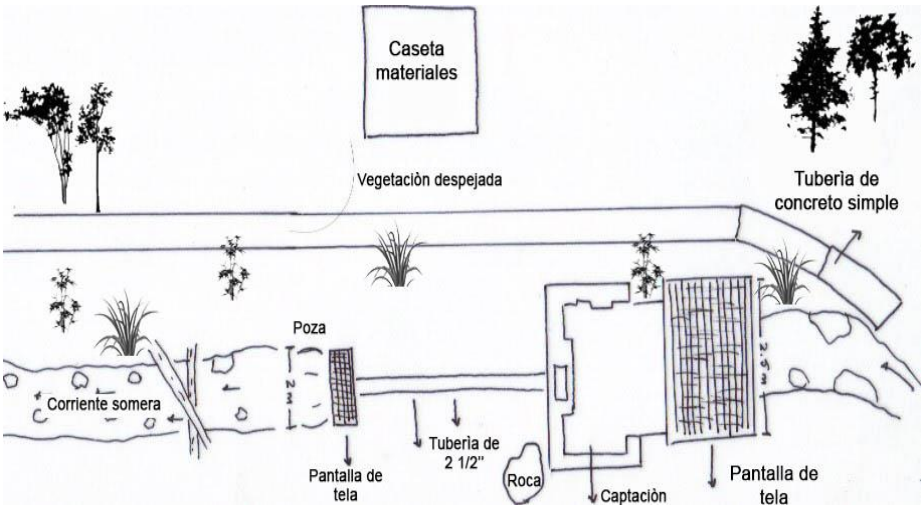



Figura 3-78 - Quebrada la Bonanza Esquema del sitio de muestreo de acuerdo con el protocolo de Ausrivas para cuerpos de agua de alto gradiente

### Estación SE25 Quebrada Chiqueros

La Estación de muestreo se ubica en la vereda Piedra Gorda y abastece el acueducto Las Flores, el cual tiene un construido un embalse para el represamiento de la quebrada 40 metros abajo del sitio. La quebrada tiene construida una pequeña presa de 4,5 metros de ancho que alimenta una motobomba ubicada sobre la ribera izquierda; el rebose de la presa continua por el canal hasta llegar al embalse. La vegetación que bordea la zona corresponde a rastrojo alto en el cual es

posible idetificar Pino Pátula, *Chusquea* y Eucaliptos, así como también una especie nativa característica de la región.

El cauce mide aproximadamente un metro, es un canal de pocas ondulaciones, en forma de U profunda que puede alcanzar hasta 60 centímetros de profundidad. El lecho es pantanoso constituido principalmente de arcilla de baja compactación, el flujo es de corriente lenta con un caudal de 3,9 l/s por la presencia de la presa, no se observan rocas a lo largo del tramo ni un buen sustrato para el asentamiento de una diversa comunidad íctica. Las riberas son de pendientes planas con márgenes erosionadas, no existen medidas de protección de las riberas y hacia la parte superior del tramo, el cauce está totalmente obstruido por la vegetación riparia imposibilitando el acceso. El agua se observa turbia, debido al material suspendido, sin embargo, no presenta olores extraños.

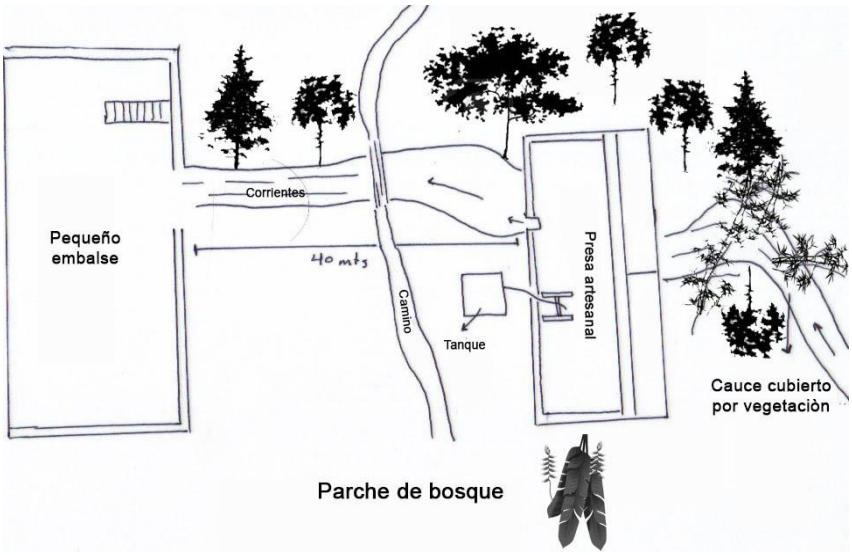



Figura 3-79 - Quebrada Chiqueros Esquema del sitio de muestreo de acuerdo con el protocolo de Ausrivas para cuerpos de agua de alto gradiente

### Estación SE26 Santa Elena-La Cascada

El sitio está ubicado justo arriba de la captación del Acueducto Circuito la Cascada de EPM que abastece el barrio La Sierra, el acueducto más representativo de la cuenca. El acceso es restringido por las condiciones de conservación que presenta la vegetación. Se trata de un bosque fragmentado en regeneración, se evidencian Yarumos en ambas riberas, existe también una gran abundancia de la especie exótica trepadora *Thumbergia alata* (Ojo de Poeta) y algunos Pinos.

Se trata de un canal trenzado, de unos 8 metros de ancho con un lecho rocoso y varias barras laterales de roca de aproximadamente 30 centímetros en la ribera izquierda. El sitio presenta una gran pendiente lo que hace que las aguas sean rápidas (Q=709,12l/s) con un cauce lavado sin ninguna acumulación de material particulado. Se observan rápidos, grandes saltos y algunas corrientes como formas predominantes del lecho. Hay afloramientos rocosos sobre ambas riberas que confieren estabilidad a las márgenes e impide el desarrollo de procesos erosivos. El agua se observa clara, no se perciben olores producto de aguas residuales o material orgánico, pese que la quebrada recoge todos los afluentes del corregimiento, debido a que las características del lecho proporcionan una oxigenación del agua suficiente para mineralizar los aportes de materia orgánica por oxidación.

### Estación SE27 Confluencia La Bocaná-Santa Elena

El sitio se encuentra ubicado en la vereda Media Luna. Presenta afectaciones sobre la fuente hídrica derivadas de una granja avícola existente sobre la ribera derecha. El sitio se encuentra ubicado justo después de la confluencia con la quebrada Bocaná. En un valle profundo. La vegetación en ambas riberas es bastante heterogénea. En la ribera derecha se observa un suelo dedicado al pastoreo y a las actividades productivas de la granja, se observa un deslizamiento y pocos Pinos dispersos a lo largo del cauce; mientras que la ribera izquierda no presenta intervención. Se trata de un bosque secundario con predominancia de Pinos Ciprés, Pino Pátula, Eucaliptos y algunos árboles nativos, tiene una gran abundancia de *Thumbergia alata* (Ojo de Poeta) sobre toda la vegetación riparia, afectando otros individuos.

El cauce mide 8 metros de ancho, con un lecho compuesto principalmente por rocas de gran tamaño con partículas de guijarro y arena, que le ofrece gran disponibilidad de hábitat a los macroinvertebrados. Los microhábitats son muy diversos, predominan los rápidos, los rizos y las corrientes. La zona es de aguas rápidas lo que favorece la oxigenación, sin embargo, se perciben olores extraños en el sedimento provenientes probablemente de la actividad agrícola que se desarrolla sobre el cuerpo de agua.

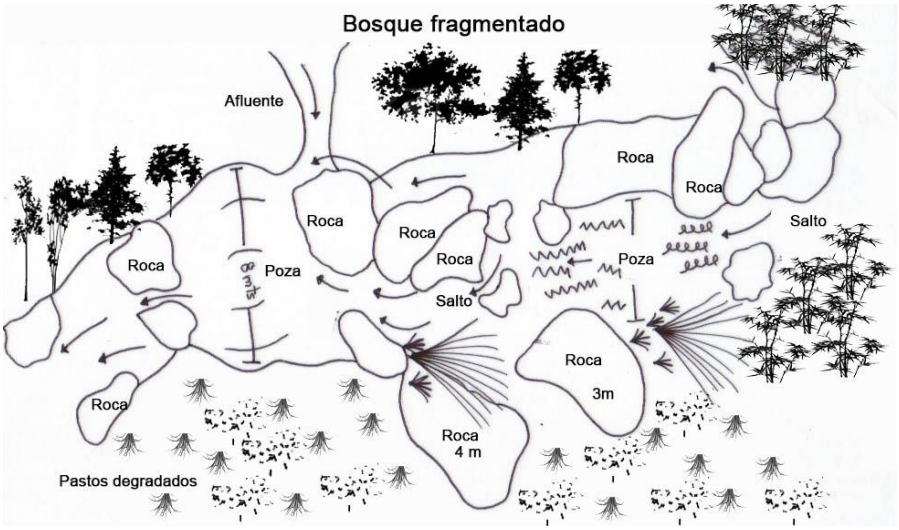



Figura 3-80 - Confluencia La Bocana – Santa Elena. Esquema del sitio de muestreo de acuerdo con el protocolo de Ausrivas para cuerpos de agua de alto gradiente

#### 3.2.5.1.4 Subcuenca San Ignacio

En la Subcuenca de la Quebrada San Ignacio se encuentra la Reserva Natural de la Sociedad Civil Montevivo, registrada por el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial con la Resolución 181 del 28 de junio de 2.005, siendo un lugar donde se practican actividades turísticas y de recreación. Algunas de las quebradas que hacen parte de esta Subcuenca abastecen el acueducto veredal de “Asuasi”.

Sobre la subcuenca de la quebrada San Ignacio se encuentran ubicadas 6 estaciones dentro de la zona de influencia del túnel. Los sitios de muestreo están distribuidos estratégicamente abarcando los cuerpos hídricos más relevantes.

**Estación SI1: Quebrada San Ignacio**

El punto de muestreo se encuentra ubicado dentro de un predio de propiedad del municipio de Medellín, en este predio no se observaron actividades agrícolas ni pecuarias; aunque se estaban adelantando actividades de reforestación de laderas y algunos sembrados de aguacate. En el sitio de muestreo, la vegetación se compone de algunos parches de bosque fragmentado con presencia de helechos, arbustos, Eucaliptos y algunos Pinos de más de 10 metros de altura en la zona riparia con gran cantidad de musgo adherido a los troncos y las rocas.

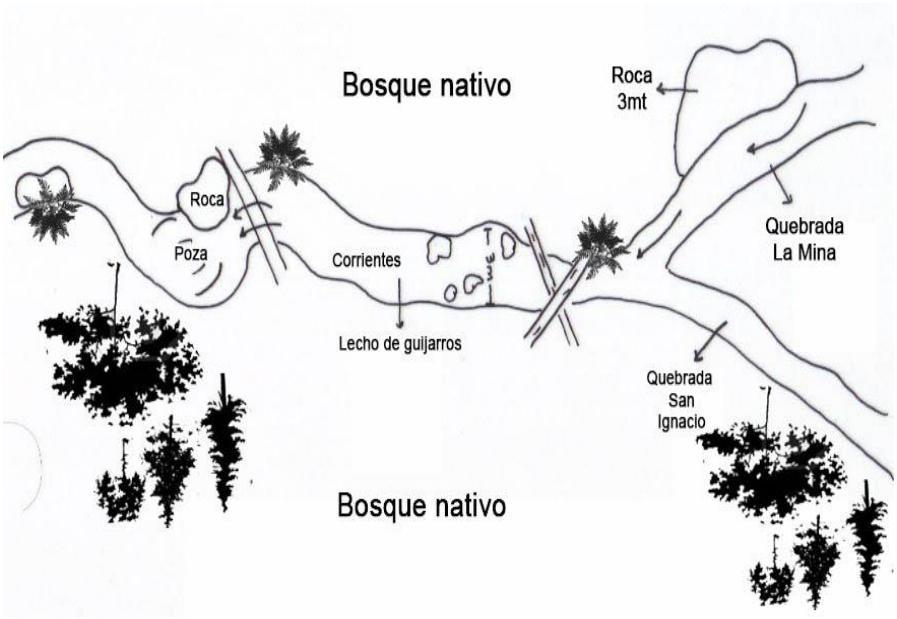



Figura 3-81 - Estación SI1- Quebrada San Ignacio. Esquema del sitio de muestreo de acuerdo con el protocolo de Ausrivas para cuerpos de agua de alto gradiente

El cauce tiene aproximadamente 3 metros de ancho, presenta rocas subangulares distribuidas a lo largo del sitio y algunas barras de sedimentos finos. El canal, tiene forma de U aplanada y ofrece un paso moderadamente restringido para los peces. El agua ocupa más del 75% del canal disponible con un lecho, cuyas partículas dominantes son el guijarro y la roca, moderadamente compactado y compuesto principalmente por corrientes. No se perciben olores extraños en el sedimento ni en el agua; la turbidez es leve a causa de material disuelto. En general el sitio es una mezcla de hábitat estable, con pocas alteraciones en el canal y las coberturas en las orillas medianamente estables.

### Estación SI2: Quebrada "La Matilda"

El punto de muestreo se encuentra ubicado en la finca La Matilda, ubicada al frente de la vía que de Santa Elena conduce a la vereda El Cerro. Es afluente de la quebrada San Ignacio, donde la vegetación de las riberas se compone en un 90% de un pequeño bosque fragmentado, con presencia de helechos, arbustos del tipo *Chusquea, Meriania nobilis* (Amarraboyo), eucaliptos y pinos de más de 10 metros de altura.

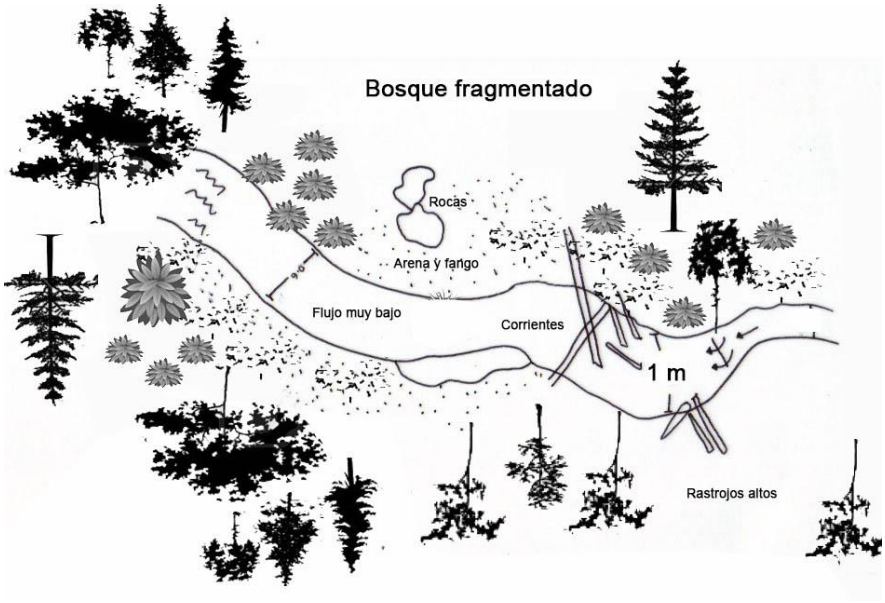



Figura 3-82 - Estación SI2- Quebrada "La Matilda" (afluente San Ignacio). Esquema del sitio de muestreo de acuerdo con el protocolo de Ausrivas para cuerpos de agua de alto gradiente

El cauce tiene aproximadamente 2 metros de ancho, presenta rocas subangulares en algunos puntos en el sitio, el canal tiene forma de U aplanada, no presenta ningún tipo de barras y ofrece un paso sin restricciones para los peces. El agua ocupa un 50% del canal con pequeñas corrientes algunas pozas, muy poco compactado y compuesto principalmente por sedimentos finos.

No se percibieron olores ni en el sedimento ni en el agua; la turbidez es leve a causa de material disuelto y de la gran cantidad de sedimentos. El sitio es una mezcla de hábitat estable, con muy baja perturbación antrópica y con un buen sustrato para la conservación de especies ícticas.

### Estación SI3: Quebrada Afloramiento (lago)

El punto de muestreo se ubica dentro del predio Reserva Natural de la Sociedad Civil Montevivo. Es un afloramiento que pasa por el lado de una de las cabañas de la reserva, llamada "Casepalo". La vegetación presente en el sitio, pertenece a bosque maduro intervenido, con especies representativas como *Meriania nobilis* (Amarraboyo), *Tibouchina lepidota* (Siete cueros), *Pteridium aquilinum* (Helecho marranero), y algunas epifitas, además de pinus patula, y *Cupressus sempervirens* (Pino ciprés). En el sitio hay una captación con mangueras de media pulgada que sirven para abastecer las cabañas de la reserva.

El cauce mide 2,5 metros en la zona más representativa. Presenta un flujo bajo, lo que posiblemente no favorece el asentamiento de peces de gran tamaño en la zona. El lecho es muy arcilloso, por lo cual presenta características de baja compactación con pocas rocas, distribuidas de forma equitativa dentro del sitio. No se observan barras ni deposiciones de ningún material a causa del flujo de la quebrada. Las márgenes son de pendiente baja unos 20º aproximadamente, con formas cóncavas en las riberas. El agua se observó clara sin ningún tipo de olor extraño. El punto de muestreo corresponde a un lugar conservado con apropiadas características para la colonización de todo tipo de fauna.

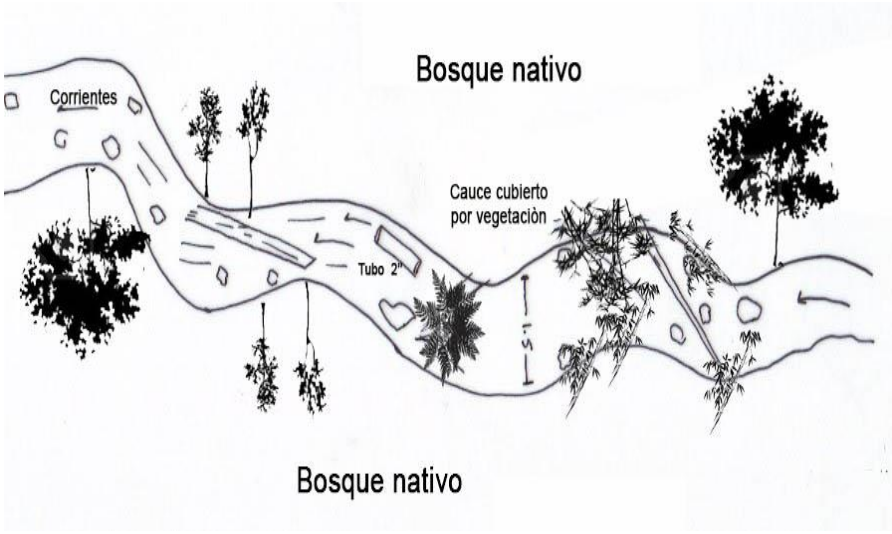



Figura 3-83 - Estación SI3- Quebrada Afloramiento (Lago). Esquema del sitio de muestreo de acuerdo con el protocolo de Ausrivas para cuerpos de agua de alto gradiente

### Estación SI4: Quebrada Los Chorlitos

El punto de muestreo se ubica dentro del predio Reserva Natural de la Sociedad Civil Montevivo. La vegetación de este punto es un bosque maduro intervenido, con características muy similares al punto anterior, sin embargo, es importante señalar, que el sitio se encuentra bastante perturbado, debido a la extracción de maderas en una de las riberas (derecha) de la quebrada y a una tubería de descarga de aguas residuales que se deposita directamente sobre la quebrada, derivando afectaciones sobre el cuerpo de agua.

El cauce del cuerpo de agua mide aproximadamente 1 m de ancho. Se trata de un lecho arcillo - arenoso sin ninguna compactación, por lo cual, no se observan las condiciones necesarias para la

colonización de las comunidades de macroinvertebrados. Las zonas dominantes sobre el lecho son las corrientes, aunque hay un bajo flujo de agua (Q=2,5 l/s). En el sitio más arriba del punto (dirección corriente) se forma una poza de muy poca profundidad. El canal tiene forma de U aplanada con una pendiente plana en ambas riberas y presencia de erosión. El agua se observa clara aunque hay presencia de contaminación por aguas residuales y residuos de la tala. No se perciben malos olores en el agua ni el sedimento.

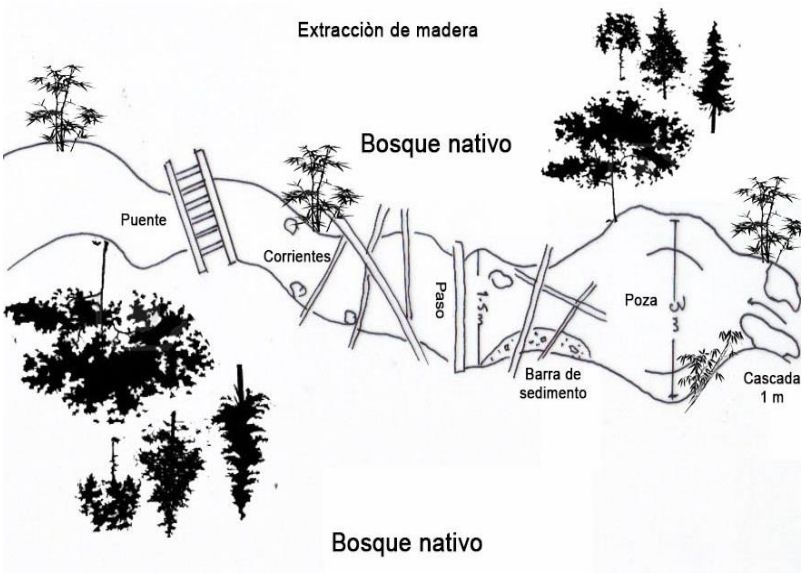



Figura 3-84 - Estación SI4- Quebrada Los Chorlitos. Esquema del sitio de muestreo de acuerdo con el protocolo de Ausrivas para cuerpos de agua de alto gradiente

### Estación SI5: Quebrada "Los Chorlitos en la batea".

El punto de muestreo se ubica en la quebrada los chorlitos, 500 metros más abajo del punto de muestreo SE4. En este punto se observa una baja calidad del agua, dadas las tuberías de descargas de aguas residuales, correspondientes a un pequeño caserío ubicado en la margen derecha de la quebrada y de la carretera de acceso a la vereda El Cartucho (Santa Elena Central). La vegetación en el sitio sólo está presente en la ribera izquierda de la quebrada, compuesta principalmente por rastrojos bajos, chusquea, helechos y algunas heliconias, y algunos costales llenos de tierra como protección ante la erosión en unos 10 metros de la ribera. Sobre la margen derecha pasa una

carretera, por tal motivo hay una pequeña canalización para evitar la pérdida de la banca por acciones del agua.

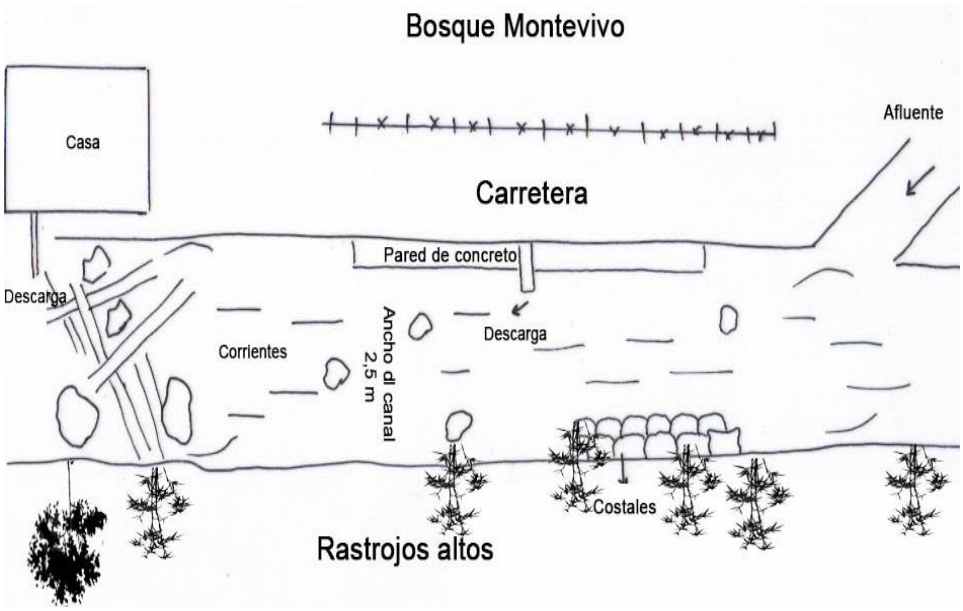



Figura 3-85 - Estación SI5 - Quebrada "Los Chorlitos en la batea". Esquema del sitio de muestreo de acuerdo con el protocolo de Ausrivas para cuerpos de agua de alto gradiente

El canal mide unos 2,5 metros y tiene forma de caja ancha. Las riberas con pendientes escarpadas y cóncavas; el lecho es de una compactación moderada, compuesto principalmente por guijarros y corrientes. El sitio se caracteriza por la presencia de fuertes olores asociados a aguas residuales y al sedimento, sumado algunos glóbulos de aceites y espuma identificados en algunos sitios dentro del punto. El sitio de muestreo no es apto para la colonización de epifauna y es muy intervenido por efectos antrópicos

**Estación SI6: Quebrada "Amagamiento frio".**

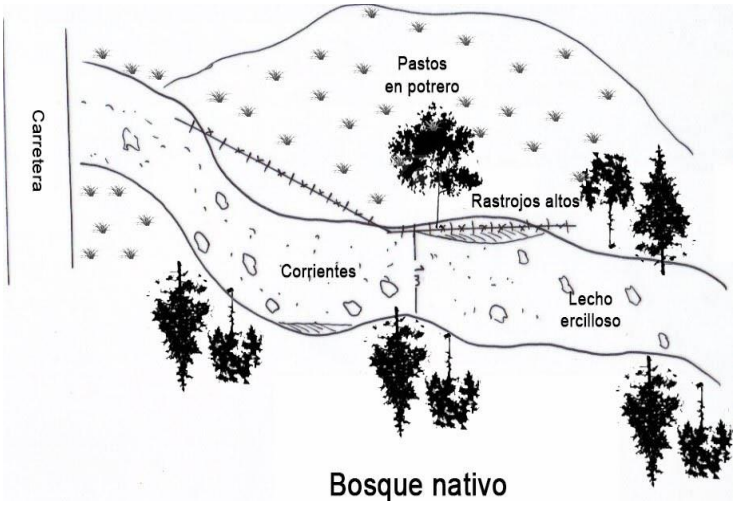



Figura 3-86 - Estación SI6 - Quebrada "Amagamiento frio". Esquema del sitio de muestreo de acuerdo con el protocolo de Ausrivas para cuerpos de agua de alto gradiente.

El punto se ubica en la quebrada "Amagamiento frío". Este cuerpo de agua pasa por el lindero de la Reserva Natural de la Sociedad Civil Montevivo. La vegetación hace parte de un bosque maduro intervenido en la ribera izquierda, y en la derecha se encuentran algunas gramíneas de crecimiento decumbente: Pennisetum clandestinum (kikuyo) haciendo parte de un potrero delimitado por un cercado. Especies como *Meriania nobilis* (Amarraboyo), *Tibouchina lepidota* (Siete cueros), *Pteridium aquilinum* (Helecho marranero), y algunas epifitas, además de *Pinus patula*, y *Cupressus sempervirens* (Pino ciprés) conforman la cobertura vegetal de la zona riparia.

El canal mide 2 metros en su parte más ancha y unos 0,6 metros en la parte más estrecha, tiene forma de U aplanada. El lecho está compuesto por sedimentos finos y algunos guijarros, lo que le brinda características de compactación leve. Se observan casi en la totalidad del punto corrientes muy someras y algunas pozas no muy representativas. Las riberas tenían una pendiente leve: menos de 20º y presentaban una erosión moderada. El agua debido al lavado del sustrato y a residuos de vegetación sobre el cauce presentó una turbidez leve, no se percibieron olores ni partículas extrañas ni el agua ni en el sedimento.

#### 3.2.5.1.5 Subcuenca San Pedro

Sobre esta subcuenca se ubicaron tres puntos estratégicos de muestreo, teniendo en cuenta los puntos aguas arriba y aguas abajo del Acueducto de San Pedro, que abastece toda la vereda el Llano y hace parte de una estrategia de manejo de las aguas residuales de la zona. Sobre esta

subcuenca no se observaron explotaciones agrícolas o pecuarias de grandes proporciones, solo aislados cultivos de flores, papa y especies de pan coger.

### Estación SP1: Quebrada San Pedro parte alta.

El punto de muestreo se encuentra unos 400 metros aguas arriba de la captación del acueducto San Pedro. La vegetación en el punto, corresponde a bosque fragmentado, con presencia de *Cecropia telenitida* (Yarumo blanco), *Meriania nobilis* (Amarraboyo), *Tibouchina lepidota* (Siete cueros), *Pteridium aquilinum* (Helecho marranero), y algunas epifitas, además de pinus patula, y Cupressus sempervirens (Pino ciprés) en ambas riberas. Sin embargo, en la ribera izquierda se observa una importante extracción de madera, y una gran fragmentación de la cobertura vegetal.

El canal, mide en su parte más ancha 4 metros y en la más angosta 2 metros. Tiene forma de caja ancha y un lecho compuesto de rocas, guijarro y arena, brindándole una compactación moderada. El flujo tiene un caudal de 6 l/s. se observaron corrientes algunos rizos y una gran poza de unos 4 metros de ancho y un metro de profundidad. Presenta riberas de pendiente moderada; en algunos tramos se observan zonas erodadas. Se perciben algunos olores extraños al parecer a residuos orgánicos en el sedimento más no en el agua. En general es un lugar medianamente conservado a pesar de la extracción de maderas, el sustrato es bueno para la colonización de la epifauna.

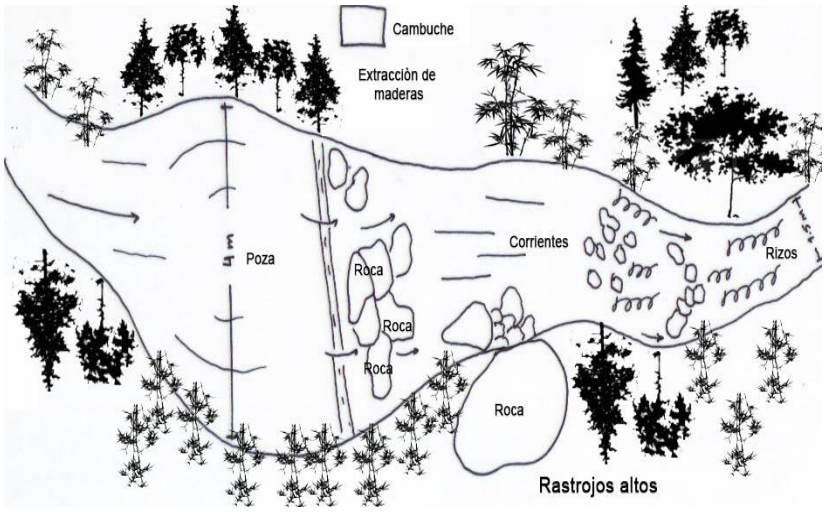



Figura 3-87 - Estación SPI - Quebrada San Pedro parte alta. Esquema del sitio de muestreo de acuerdo con el protocolo de Ausrivas para cuerpos de agua de alto gradiente

### Estación SP2: Quebrada San Pedro (Acueducto).

El muestreo se efectuó contiguo al predio del acueducto San Pedro. Es un punto en el cual se observa contaminación con residuos orgánicos presentes en el cauce, sumados a las descargas de aguas residuales. Aguas arriba del punto de muestreo hay un puente (vía) que pasa encima de la quebrada, que se une con un box culvert que es donde desemboca un canal afluente que conduce aguas residuales de algunas casas de la vereda. La vegetación se compone por rastrojo bajo, helechos y gramíneas en ambas riberas en solo un tramo de la quebrada, debido a que una gran porción del tramo se encuentra entre dos paredes de concreto como medidas de protección contra la erosión.

El canal mide 4 metros de ancho en promedio, el lecho es de compactación media, debido a que hay presencia de sedimentos finos y algunos guijarros que le conceden dichas características; además con zonas de corrientes y una poza de unos 3 metros de ancho justo en la confluencia de la quebrada con el afluente de aguas residuales.

En el punto se perciben olores bastante fuertes producto de aguas residuales en sedimento y en el agua, inclusive se observaron algunos mamíferos roedores (Ratas) asociados a zonas de galerías subterráneas y alcantarillas. El sustrato no presenta características óptimas para la colonización de fauna acuática.

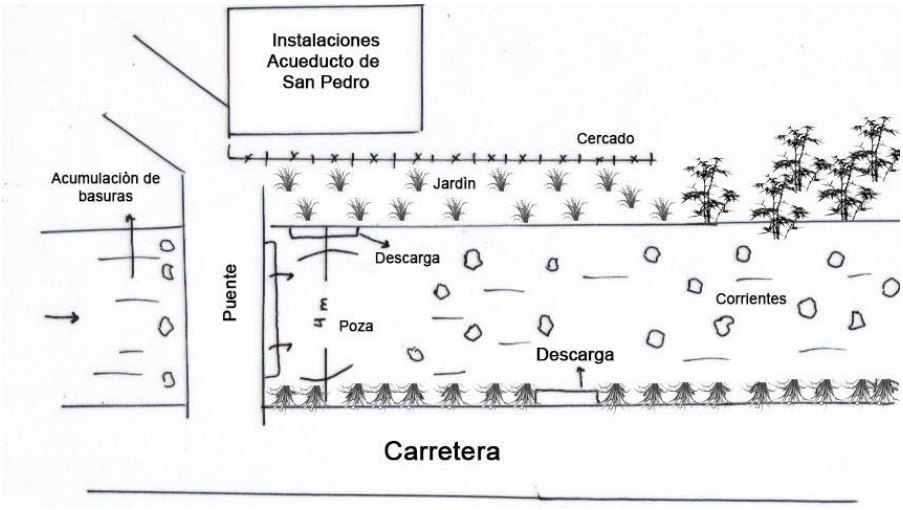



Figura 3-88 - Estación SP2 - Quebrada San Pedro (acueducto). Esquema del sitio de muestreo de acuerdo con el protocolo de Ausrivas para cuerpos de agua de alto gradiente

### Estación SP3: Quebrada San Pedro (Aguas abajo acueducto).

El muestreo se hizo unos 400 metros aguas abajo del acueducto, con un tramo de 100 metros hasta llegar a la confluencia con la quebrada Santa Elena. El punto presenta prácticamente las mismas características que aguas arriba. La vegetación que en las riberas es en forma de rastrojo alto, con especies relevantes como el *Meriania nobilis* (Amarraboyo), *Tibouchina lepidota* (Siete cueros), *Pteridium aquilinum* (Helecho marranero) y algunos briofitos sobre rocas en el lecho.

El canal tiene un ancho máximo en una gran poza de aproximadamente 6 metros de ancho y un metro y medio de profundidad. El punto más estrecho mide unos 3 metros de ancho. En la ribera derecha hay una gran pared de concreto que funciona como medida de protección para la carretera que pasa justo a unos pocos metros de la quebrada. El lecho es de compactación media, debido a que hay presencia de sedimentos finos y algunos guijarros que le conceden dichas características; además con formas de corrientes y una poza.

En el punto obviamente y debido a la contaminación aguas arriba, se percibieron olores bastante fuertes a residuos orgánicos en sedimento y en el agua.

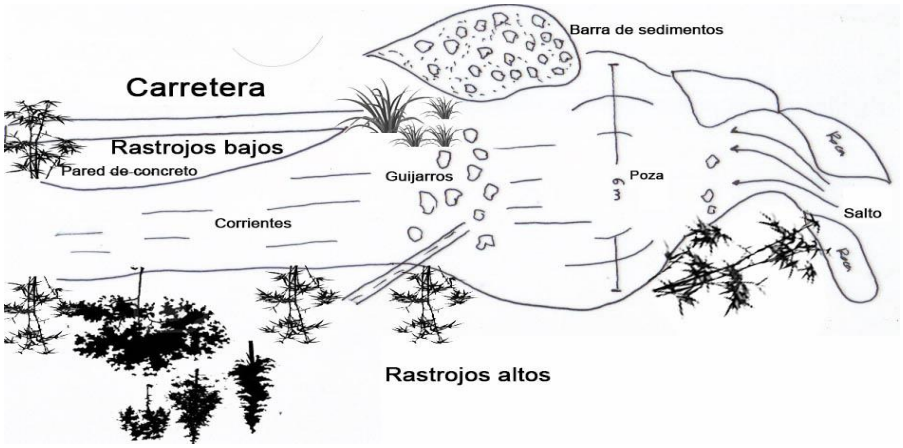



Figura 3-89 - Estación SP3 - Quebrada San Pedro (Aguas abajo del acueducto). Esquema del sitio de muestreo de acuerdo con el protocolo de Ausrivas para cuerpos de agua de alto gradiente

### 3.2.5.1.6 Cuenca la cascada

La cuenca La Cascada se encuentra en la margen izquierda del proyecto y vierte sus aguas en dirección opuesta al proyecto. En esta cuenca fueron establecidas seis estaciones de muestreo, las cuales se encuentran sobre dos subcuencas: La Cascada y la Honda. En la zona se presentan algunas extensiones de tierra dedicadas a la ganadería y la agricultura, también se observan algunas fincas de recreo, sumada la presencia de algunos cultivos especialmente de trucha.

Tabla 3-74- Ubicación de las estaciones de muestreo sobre la cuenca La Cascada, en el municipio de Guarne

| Cuenca | Subcuenca | Código Final | Nombre de la Quebrada | Coordenadas | | | Q (l/s) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | X | Y | Z | |
| La Cascada | La Honda | Ho2 | Villanueva | 845014 | 1177222 | 2540 | 1,3 |
| | | Ho1 | Manguruma | 845460 | 1177483 | 2500 | 27,8 |
| | La Cascada | C1 | Doña Clara | 844802 | 1177616 | 2593 | 0,14 |
| | | C2 | Dos captaciones | 844580 | 1177816 | 2612 | 0,9 |
| | | C3 | Adonay | 844424 | 1177789 | 2639 | |
| | | C4 | La Cascada | 844892 | 1178102 | 2467 | 11,2 |

Fuente: Consorcio SIGA - PLYMA

#### *3.2.5.1.6.1 Subcuenca La Cascada*

Esta subcuenca hace parte de la cuenca La Cascada. Se caracteriza por presentar un bajo nivel de agua, a pesar de ésto, poseen mangueras para la captación de agua, dejando muy poca agua expuesta. Se eligieron cuatro estaciones de muestreo en donde sus principales características serán descritas a continuación:

**Estación C1 Quebrada Doña Clara**

La estación se encuentra ubicada en el punto donde corta el eje del túnel, en la finca Airecitos. La quebrada presenta muy poca agua, el cauce no alcanza un metro de ancho. En ésta se puede observar una manguera para la captación de agua, la cual tiene media pulgada de diámetro, que conduce el agua para un cultivo de peces, que en su mayoría son truchas.

La quebrada está ubicada en inmediaciones a una zona de potreros. La vegetación en la zona de estudio es escasa, hallando cerca a la quebrada una amplia área de potreros. Aguas arriba se pueden observar cultivos de Solanum tuberosum (Papa), los cuales se encuentran, en un lugar de alta pendiente, por lo cual muy seguramente determinará la entrada de aguas con agroquímicos. A estos efectos se suma la entrada de personas y animales a los cuerpos de agua, lo cual podría determinar una gran inestabilidad en la quebrada.

En el cuerpo de agua se observan aceites en el agua y en el sedimento. El agua presenta olores asociados a aguas residuales y a la acidez producida por los procesos de descomposición de la materia orgánica. El caudal obtenido al momento del muestreo fue de 0,14 l/s.

Se pueden observar piedras de tamaño medio entre 50 y 20cm de diámetro, no se presentan barras laterales, podría considerarse que el bajo nivel del agua puede ser un factor limitante para el desplazamiento de algunas especies a lo largo del cauce. El agua en el sitio de muestreo, generalmente presenta una muy baja velocidad, se observan zonas con formación de algunas pozas y algunos tramos de aguas corrientes, el acceso de ganado y la vegetación escasa, podría afectar la estabilidad de la ribera.

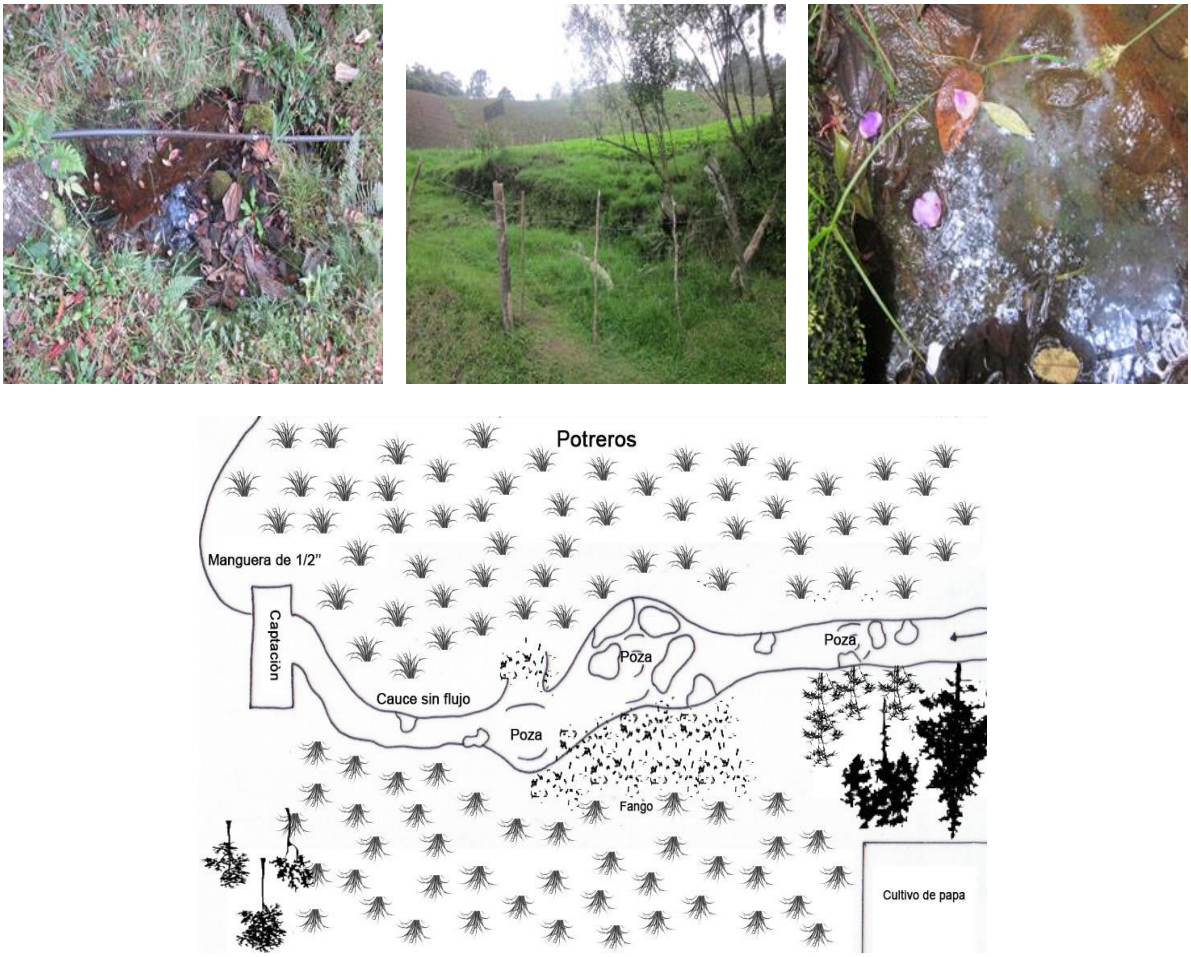



Figura 3-90 - Estación C1: Quebrada Doña Clara. Esquema del sitio de muestreo de acuerdo con el protocolo de Ausrivas para cuerpos de agua de alto gradiente

### Estación C2 Quebrada "dos captaciones"

El sitio de muestreo está ubicado en una zona con topografía escarpada, en la parte más profunda. El tramo de muestreo se encuentra en un nacimiento, el cual se capta inmediatamente aflora. El agua es tomada por nueve mangueras de media pulgada de diámetro, la cual es conducida por otra manguera de mayor tamaño hasta un estanque. Para facilitar la captación de agua en el sitio, se observa un muro de contención, derivando una alta perturbación.

El canal presenta aproximadamente el 75% de agua, mientras que el 25% restante se encuentra sujeto a inundaciones en los momentos de aguas altas. El caudal registrado es de 0,9 l/s. El lecho del cauce está conformado por rocas de menor tamaño, conformado principalmente por guijarros y piedras menores (menores a 10cm de diámetro).

La vegetación está conformada por árboles de mayor tamaño, los cuales se encuentran ocupando una buena parte del área, distribuidos formado un bosque secundario, en un grado de conservación medio, en el cual se observan las rocas y algunos tramos de las márgenes de la quebrada compuestas por musgos, lo cual indica que corresponde a una zona húmeda,

probablemente determinada por la presencia de vegetación, que no permite la entrada de la luz al cuerpo de agua.

No se evidenció la presencia de aceites en el sedimento ni en el agua, y se perciben olores asociados a aguas residuales y materia orgánica en descomposición. El cauce puede presentar una estabilidad media, pues en ésta se presentan descargas por estanques y vertimientos de aguas servidas directamente al cauce, lo cual determina probablemente una turbidez media del agua, en el cual también logra observarse material en suspensión. En ésta dominan pozas de tamaño medio y pequeño, en algunos tramos se observan zonas de aguas corrientes.

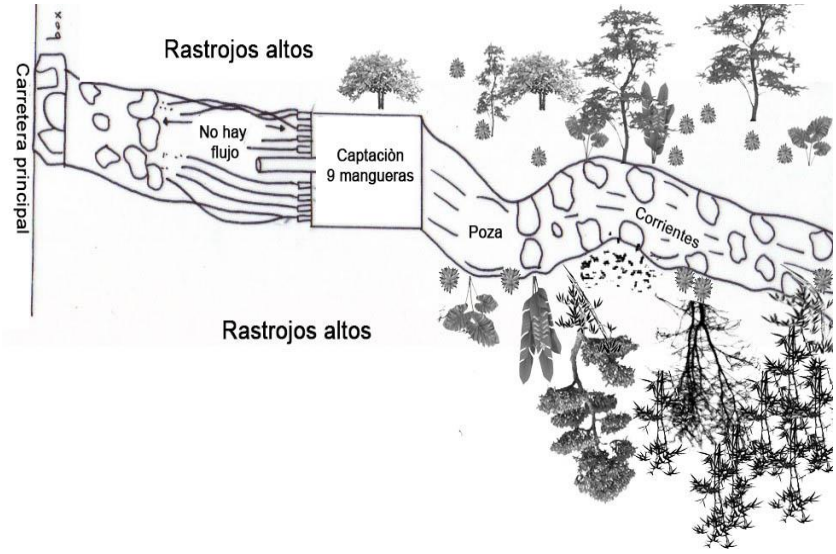



Figura 3-91 - Estación C2: Quebrada Dos Captaciones. Esquema del sitio de muestreo de acuerdo con el protocolo de Ausrivas para cuerpos de agua de alto gradiente

### Estación C3 Quebrada Adonaí.

El sitio de muestreo se encuentra ubicado en una zona con pendientes escarpadas, en las cuales se observa una vegetación, medianamente protegida y conformada por árboles mayores a 10m de altura, formando un bosque secundario y un grado de perturbación bajo. El sustrato está compuesto por rocas de menor tamaño, en algunos casos con cascajo, lo cual desfavorece una colonización importante por parte de los macroinvertebrados acuáticos, atribuido a la

inestabilidad de las rocas presentes en el cuerpo de agua. No se observan barras laterales, ni acumulación de sedimento, las pendientes determinan entrada de diferentes nutrientes por escorrentía. El nivel del agua es muy bajo, lo cual limita el desplazamiento de las especies.

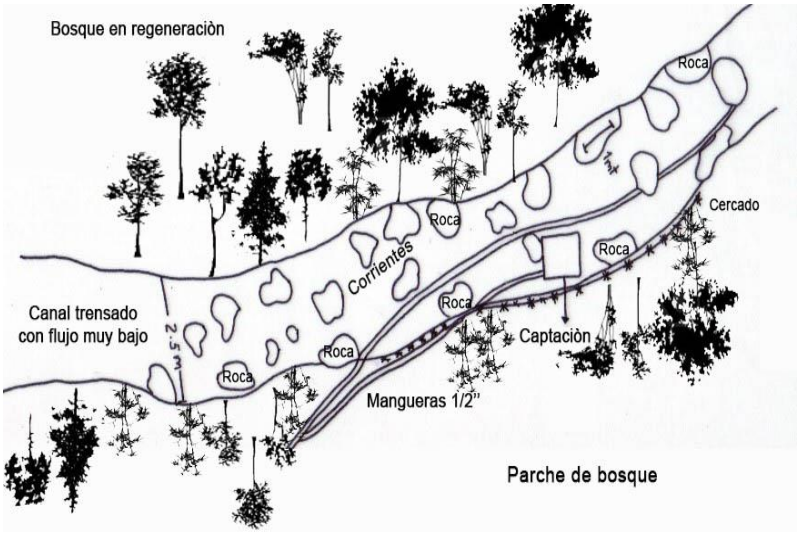



Figura 3-92 - Estación C3 Quebrada Adonaí. Esquema del sitio de muestreo de acuerdo con el protocolo de Ausrivas para cuerpos de agua de alto gradiente

En un sitio de la quebrada se encuentra una captación de dos mangueras, de una pulgada de diámetro, conducida a un tanque en el cual se observa agua corriente y que llega a rebosarse. Esta estructura se considera una barrera para el desplazamiento de las especies de peces. No hay presencia de aceites en el sedimento ni en el agua, sin embargo, los sedimentos y el agua presenta olores asociados a aguas residuales.

### Estación C4 Quebrada la Cascada

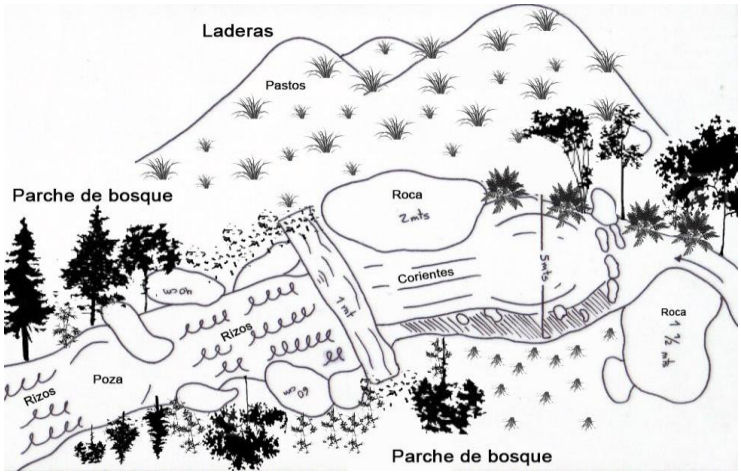



Figura 3-93 - Estación C4: Quebrada la. Cascada Esquema del sitio de muestreo de acuerdo con el protocolo de Ausrivas para cuerpos de agua de alto gradiente

El cauce de la quebrada presenta máximo un metro de ancho, en éste se observan algunas rocas de tamaño medio (aproximadamente 50cm de diámetro). El sitio de muestreo está conformado por un bosque mediamente conservado en el cual se identifican árboles de gran tamaño, presencia importante de helechos, los cuales en gran medida limitan la entrada de luz al cuerpo de agua, ésto es corroborado por la presencia de musgos y algunas plantas de zonas con bajas temperaturas.

El agua es cristalina, al parecer sin entrada de sedimentos, y aguas residuales. Presenta un caudal de 11,2 l/s. El sustrato es rocoso con presencia en algunos tramos de guijarro y cascajo, este tipo de sustrato no es muy favorable para el establecimiento de comunidades de macroinvertebrados muy diversos.

### *3.2.5.1.6.2 Subcuenca La Honda*

Esta subcuenca hace parte de la cuenca La Cascada. Se caracteriza por presentar amplias zonas de pastoreo, siendo la ganadería la principal actividad económica generada allí. En esta cuenca se eligieron dos estaciones de muestreo, a continuación se describen las características más relevantes de cada una de éstas.

**Estación Ho1 Quebrada Manguruma**

El sitio se encuentra en la unión de dos afluentes de la cuenca La Cascada, presenta forma de valle poco profundo. La vegetación de la zona riparia está compuesta en su gran parte por hierbas, helechos, arbustos, pastos y especies exóticas pertenecientes al género Cupressus (Pino Ciprés); presenta un alto grado de perturbación.

El agua ocupa entre el 25 y 75% del canal disponible, la quebrada tiene un ancho aproximado de noventa centímetros, y un caudal de 27,8 l/s. El flujo del cauce tiene paso parcialmente restringido para los peces, el agua se encontró clara y libre de aceites y olores, con formas predominantes de corrientes, y rizos o caballitos; no se encuentran barras laterales, el canal no tiene ninguna modificación, tiene forma de box, ambas riberas tienen pendiente baja y forma cóncava, se presentan afloramientos de roca únicamente en la ribera izquierda (40%).

Las riberas son moderadamente estables, las áreas con erosión son poco frecuentes y en gran parte pueden restaurarse, entre el 5 y el 30% de las márgenes presentan este fenómeno, además su estabilidad se puede ver afectada por el acceso humano y la vegetación escasa.

Figura 3-94- Estación Ho1 Quebrada Manguruma. Esquema del sitio de muestreo de acuerdo con el protocolo de Ausrivas para cuerpos de agua de alto gradiente

### Estación Ho2 Quebrada Villanueva

Esta estación se encuentra ubicada en la vereda El Progreso, específicamente en la finca Villanueva, presenta forma de valle poco profundo, el cauce tiene un ancho aproximado de sesenta centímetros, en el canal se encuentra muy poca agua, equivalente a un caudal de 1,3 l/s,

en gran parte se encuentra turbia producto de material orgánico (excremento bovino) y del lavado de las plantas, pues como puede observarse, el sitio de muestreo se encuentra rodeado por un potrero, el continuo acceso de personas y ganado ha determinado que el cauce se vea inestable, adicionalmente, dentro del sustrato, son comunes las piedras de menor tamaño las cuales están embebidas en una matriz de sedimento.

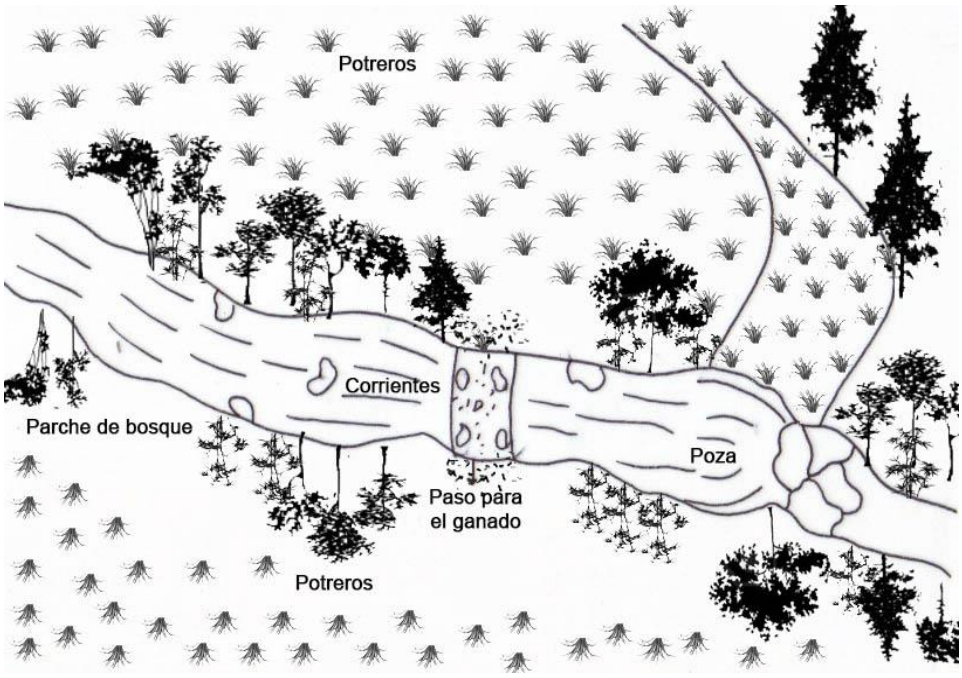



Figura 3-95 - Estación Ho2 Quebrada Villanueva. Esquema del sitio de muestreo de acuerdo con el protocolo de Ausrivas para cuerpos de agua de alto gradiente

Las formas predominantes son muchas pozas poco profundas y algunas corrientes. La vegetación de la zona riparia está compuesta por árboles menores a 10m de altura, hierbas, Pteridium aquilinum (helecho marranero), arbustos, y pastos. Los principales efectos que se presentan son el acceso humano, el acceso de ganado y la vegetación despejada que podrían afectar la estabilidad de la ribera ocasionando un grado de perturbación muy alto.

El flujo del cauce tiene paso muy restringido para los peces, no se encuentran barras laterales, el canal no tiene ninguna modificación, tiene forma de U aplanada, ambas riberas tienen pendiente baja (10-30°) y forma cóncava, se presentan afloramientos de roca.

#### 3.2.5.1.7 Cuenca del Rio Negro

La cuenca del río Negro, se encuentra hacia la margen oriental del proyecto, próxima al portal oriental. Esta cuenca pertenece a la cuenca del Río Nare y se subdivide en cuatro subcuencas que hacen parte del área de influencia local de proyecto Conexión Vial Aburrá Oriente y sus vias complementarias: Salazar, Yarumal, La Hondina, y La Floresta, donde fueron establecidas 30 estaciones de muestreo.

En esta cuenca se desarrollan diferentes actividades antrópicas entre las cuales una de la más relevante es el asentamiento de fincas de recreo, y sectores urbanos residenciales. Otras actividades económicas importantes son las actividades agrícolas y ganaderas de algunos sectores, se hace la salvedad que no en todos los sectores es de tipo comercial sino más bien de seguridad alimentaria o tradición cultural.

##### *3.2.5.1.7.1 Subcuenca La Hondina:*

La subcuenca confluye con la quebrada Yarumal, está ubicada en el municipio de Rionegro, entre las veredas Yarumal y El Progreso. Se muestrearon seis puntos de relevancia para la caracterización de la cuenca, dentro de ésta se incluyen los puntos aguas arriba y aguas abajo de dos acueductos que abastecen a la población. En general, la cuenca presenta buen estado de conservación, sin embargo, en la zona se desarrollan actividades agrícolas de cultivo de mora, tomate de árbol, aguacate y fresas que pueden generar afectaciones sobre el cuerpo de agua.

**Estación H1: Quebrada El Cerro (Afluente a la Yarumal)**

El sitio de muestreo se encuentra ubicado aguas arriba del acueducto de los Atehortua, en la finca Bella Vista. En la margen derecha del cuerpo de agua se observa la planta de tratamiento del acueducto. A lo largo del cauce se encuentran aproximadamente cinco mangueras para la extracción de agua, las cuales presentan un diámetro de media pulgada, también existen captaciones de agua más abajo que no pertenecen al acueducto. La vegetación de la zona riparia es parche de bosque compuesta en su mayor parte por árboles de más de 10 m de altura, hierbas, helechos, sin embargo, se podría catalogar como extremo el grado de perturbación, ya que en la zona se encuentra la vegetación despejada, y zonas destinadas a las actividades agrícolas, existen cultivos de tomate de árbol, fresa y papa.

El ancho del cauce alcanza 2,90 metros, en la parte más ancha, la vegetación obstruye el canal dando la apariencia de un cauce más angosto. Se observan barras laterales de guijarro que obstruyen el flujo. En el cauce puede encontrarse un sustrato compuesto en su mayor parte por rocas de menor tamaño (10 cm de diámetro hojarasca suspendida sobre el sustrato. El bajo nivel de agua y la falta de sustratos firmemente empacados desfavorece en gran medida, la presencia de fauna acuática diversa. En el tramo de muestreo pueden identificarse algunos hábitats que podrían favorecer una diversidad de especies particular, pues a pesar de que se presenta en un sitio de pendiente considerable, en algunos tramos pueden observarse algunas pozas y sitios de aguas corrientes, aunque los rizos y zonas de muy bajo nivel del agua son las predominantes. En el

sitio de muestreo la entrada de luz es baja, lo cual obedece a la vegetación protegida para cada uno de los sitios.

El agua se observa cristalina, lo cual debe ser el resultado de la vegetación protegida aguas arriba, aunque se aprecia vegetación despejada en la zona aledaña, lo cual puede ser un factor que altera la estabilidad de la ribera, adicional a esto, el sitio de muestreo tiene libre acceso de personas, sin embargo, a pesar de las perturbaciones no se observa aceite en el agua o en el sedimento, ni olores típico a materia orgánica. Durante la toma de muestras hidrobiológicas, el estado del tiempo fue soleado sin presencia de lluvias. El caudal reportado en el punto de muestreo fue de 1,8 $m^3/s$.

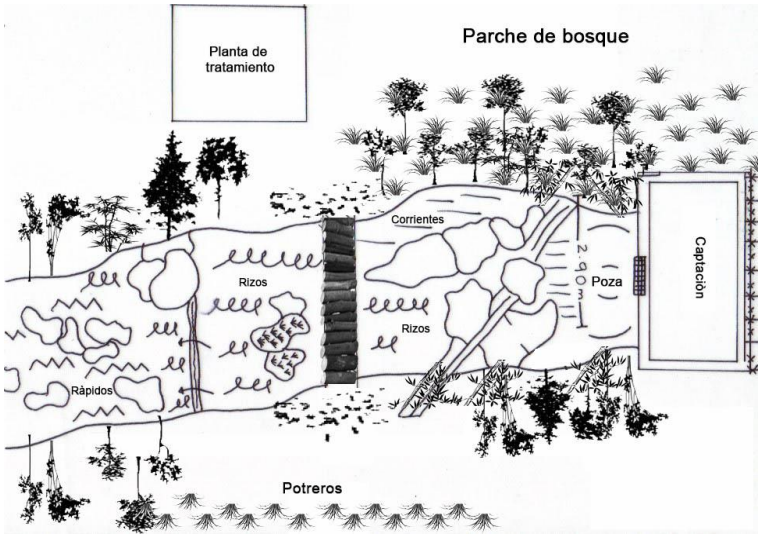



Figura 3-96 - Estación H1: Quebrada Cerro Verde Esquema del sitio de muestreo de acuerdo con el protocolo de Ausrivas para cuerpos de agua de alto gradiente

### Estación H2: Quebrada el Cerro Aguas abajo Atehortua

El punto se encuentra ubicado aguas abajo del acueducto el progreso, en la carretera que conduce a la vereda del mismo nombre. En el sitio se observa una captación de agua cruda, la cual se realiza a través de la conexión de dos mangueras (dos pulgadas de diámetro). La quebrada corre a través de una zona profunda donde la vegetación de las riberas se encuentra en rastrojo alto, incluso la vegetación abundante limita la entrada de luz al tramo de muestreo, está compuesta en su mayor parte por hierbas, helechos y árboles de más de 10 m de altura. En general, la zona

riparia se encuentra bastante conservada pese a la existencia de la carretera y la captación, ya que no hay acceso de personas ni ganado al sitio y se encuentran pocas viviendas en la zona.

El ancho del cauce no supera los 2 metros. Hacia la margen izquierda se encuentran barras laterales de roca con briofitos adheridos, lo cual indica que es una zona bastante húmeda. El canal tiene forma de U aplanada con un lecho de compactación moderada donde predominan las rocas de 20 cm aproximadamente. En el momento del muestreo el flujo de agua fue bajo con el paso totalmente restringido para el desplazamiento de los peces a causa de un salto de 10 metros aproximadamente aguas más abajo. La pendiente de ambas márgenes tiene forma convexa. La extensión de la orilla del arroyo presenta áreas de erosión, igualmente hay evidencia de que ésta es una quebrada torrencial, pues se observan sitios con palizadas, hasta los cuales probablemente llega el agua en momentos de altas lluvias. No hay presencia de aceites ni de olores en el sedimento ni en el agua, sin embargo, se observó espuma en el agua y además se identificó turbia producto de material suspendido.

Durante la toma de muestras hidrobiológicas el estado del tiempo fue nubado con pocas lluvias. El caudal en el punto de muestreo fue de 3,1 l/s.

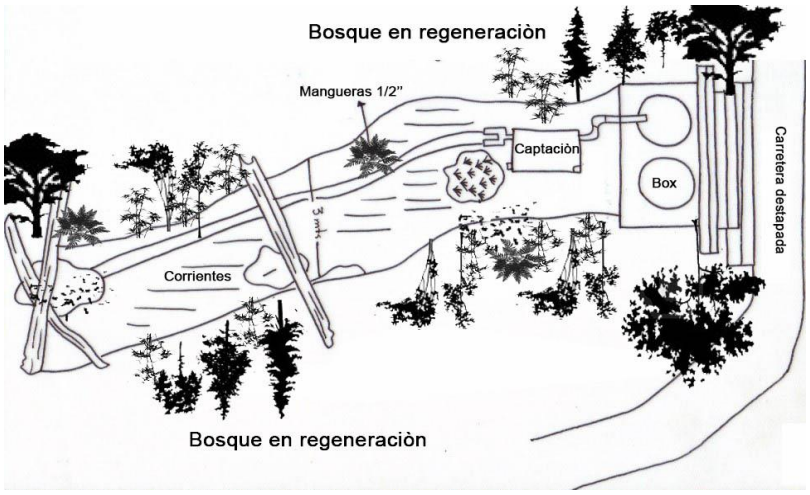



Figura 3-97 - Estación H2: Quebrada Cerro Verde aguas abajo acueducto los Atehortua. Esquema del sitio de muestreo de acuerdo con el protocolo de Ausrivas para cuerpos de agua de alto gradiente

### Estación H3: Aguas arriba acueducto de los Parra

El punto se encuentra ubicado aguas arriba del acueducto los Parra, en el Municipio de Rionegro-Vereda el Progreso. La vegetación de la zona ribereña está compuesta en su mayor parte por árboles nativos mayores a 10 m de altura y helechos. En general se trata de un bosque muy conservado, debido a que el acceso es restringido para la conservación del agua del acueducto. No se presentan asentamientos humanos en la zona y el canal tiene buena visibilidad. Se observan unas mangueras de captación de agua en desuso evidenciando posibles captaciones agua en el pasado.

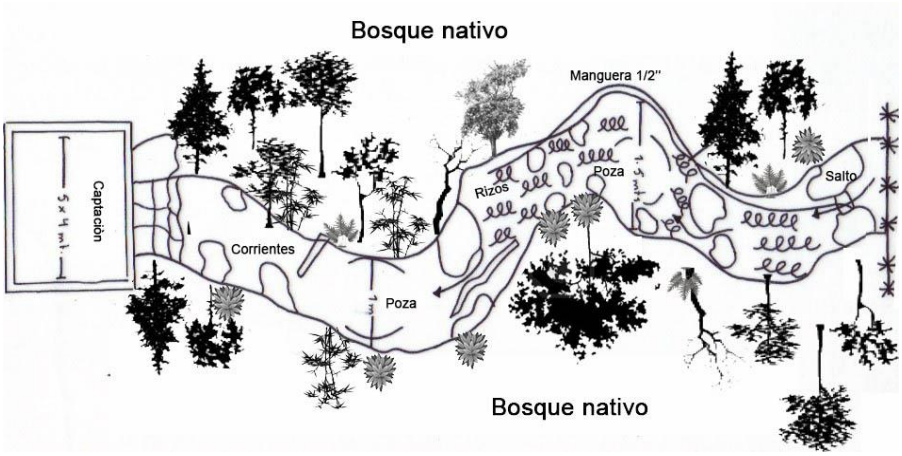



Figura 3-98 - Estación H3 Aguas arriba del acueducto de los Parra. Esquema del sitio de muestreo de acuerdo con el protocolo de Ausrivas para cuerpos de agua de alto gradiente

El cauce mide 1,5 metros, no se encuentran barras laterales que obstruyan el paso de los peces. Pero el tanque de agua construido por el acueducto bloquea totalmente el paso de la fauna acuática. El canal tiene forma de U aplanada, con piedras subangulares de aproximadamente 50 cm a lo largo de todo el tramo de muestreo. El lecho de la quebrada es estable, constituido por rocas de 20 cm en promedio. Las zonas más predominantes sobre el lecho son los rizos pero se observan algunas pozas y rápidos en el sitio. La ribera izquierda tiene pendiente moderada mientras que la derecha presenta una pendiente escarpada; ambas riberas son estables, las evidencias de erosión o de fallas en la orilla son mínimas con un bajo potencial de problemas futuros. No hay presencia de aceites ni de olores en el sedimento ni en el agua. El agua se encontró clara, sin señales de contaminación. Durante la toma de muestras hidrobiológicas el caudal en el punto de muestreo fue de 2,9 l/s.

### Estación H4: Quebrada aguas abajo acueducto de los Parra

El punto se encuentra ubicado a una distancia aproximada de 200m aguas abajo de la captación del acueducto de los Parra, más exactamente, después de la carretera que conduce por la vereda El Progreso desde Santa Elena. La vegetación de la ribera está compuesta en su mayor parte por árboles nativos de más de 10 m de altura, algunos helechos. Es un bosque bastante conservado, no presenta ninguna variación con respecto a las características del punto aguas arriba el acueducto, sin embargo, el caudal aumenta con respecto a la salida del tanque de la captación, posiblemente por afloramientos de aguas subterráneas debido a la inclinación de la pendiente. A lo largo del sitio se encuentran 2 mangueras de extracción de agua de aproximadamente media pulgada las cuales no están relacionadas con el acueducto.

El cauce mide aproximadamente 3 metros con un flujo base de paso parcialmente restringido para la fauna ictica, dado que el cuerpo de agua presenta rocas de aproximadamente un metro en todo el tramo, que lo caracterizan como canal trenzado, depositando cierta estabilidad al lecho.

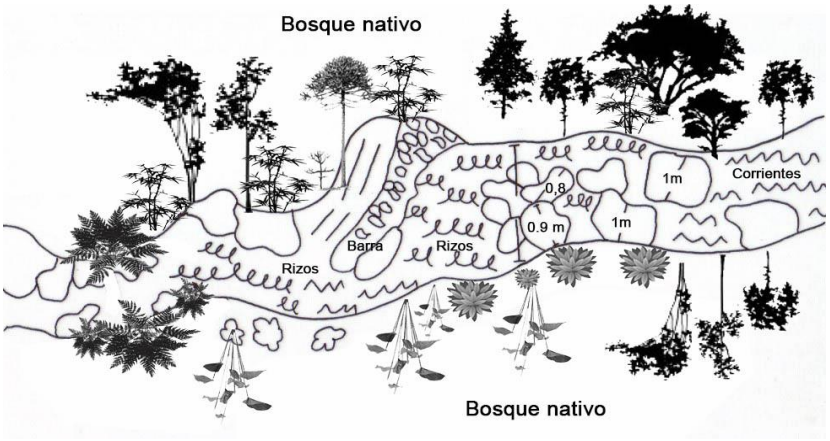



Figura 3-99 - Estación H4: Aguas abajo acueducto los Parra. Esquema del sitio de muestreo de acuerdo con el protocolo de Ausrivas para cuerpos de agua de alto gradiente

Las zonas predominantes son los rizos y los rápidos. No se encuentran barras laterales de sedimento y sobre la rocas hay adheridos briofitos que evidencian la humedad de la zona. La ribera izquierda tiene pendiente moderada mientras que la derecha, presenta una pendiente escarpada, sin evidencias de erosión. No hay presencia de aceites ni de olores en el sedimento o en el agua.

Durante la toma de muestras hidrobiológicas el caudal en el punto de muestreo fue de 1 l/s.

### Estación H5: Quebrada la Hondina 2

El punto se encuentra ubicado al lado de cultivos de tomate de árbol, aguacate y mora, los cuales son regados por agroquímicos y por la topografía de la zona, se favorece la llegada de estos químicos al cuerpo de agua por escorrentía. Sin embargo, en las márgenes hay una parche de bosque que rodea la zona compuesta principalmente por árboles mayores a 10m de altura entre los que se encuentran algunas Melastomateceas, individuos de la especie *Meriania nobilis* (Amarraboyos), se observa también Pinos Ciprés. Según información de los propietarios del predio, no existen asentamientos humanos aguas arriba lo cual mantiene el sitio con una baja perturbación.

El cauce en el sitio de muestreo mide aproximadamente 3 metros de ancho. Su lecho está compuesto por rocas de aproximadamente 30 ó 40 cm de diámetro, que posibilita una compactación moderada. Hay acumulación de rocas en varios sectores de ambas riberas, sin embargo, el paso de los peces no presenta ninguna restricción, en el momento de muestreo hubo un buen flujo de agua (91,8 l/s) y las formas predominantes sobre el lecho fueron corrientes, y rizos. La ribera izquierda es escarpada de la forma cóncava; mientras que la derecha tiene una pendiente moderada. Hay presencia de afloramientos de roca en ambas riberas lo que ofrece estabilidad a la misma. El agua es casi cristalina no se perciben aceites u olores extraños en la fuente hídrica.

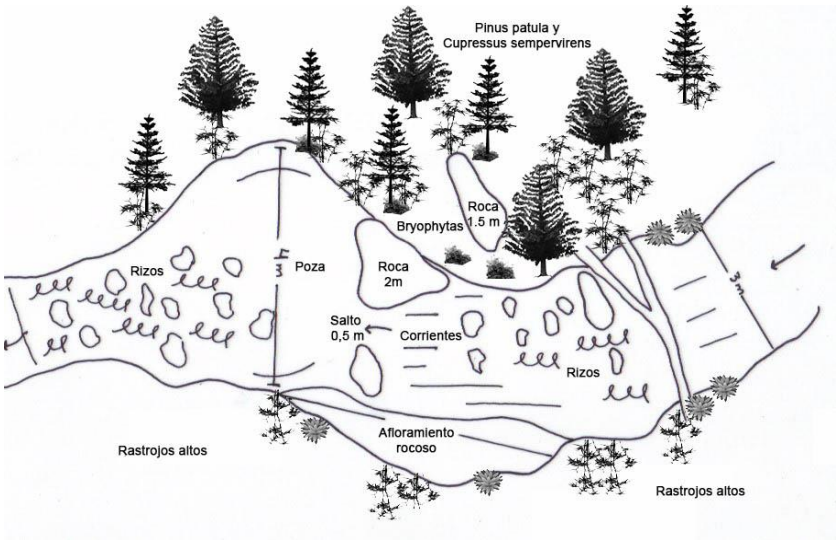



Figura 3-100 - Estación H5 Quebrada Hondina 2. Esquema del sitio de muestreo de acuerdo con el protocolo de Ausrivas para cuerpos de agua de alto gradiente

### Estación H6: Quebrada La Hondina

El punto se encuentra ubicado aguas abajo de una plantación de tomate árbol, es un lugar medianamente conservado. Dentro de los principales impactos asociados a la zona, se encuentran la alta deforestación, el asentamiento de ocho viviendas (aunque no se observaron desagües directos al cuerpo de agua), plantaciones de especies exóticas, acceso de ganado y personas al lecho del cauce de la quebrada. Sin embargo, el sitio es poco transitado lo que puede otorgarle cierto grado de conservación.

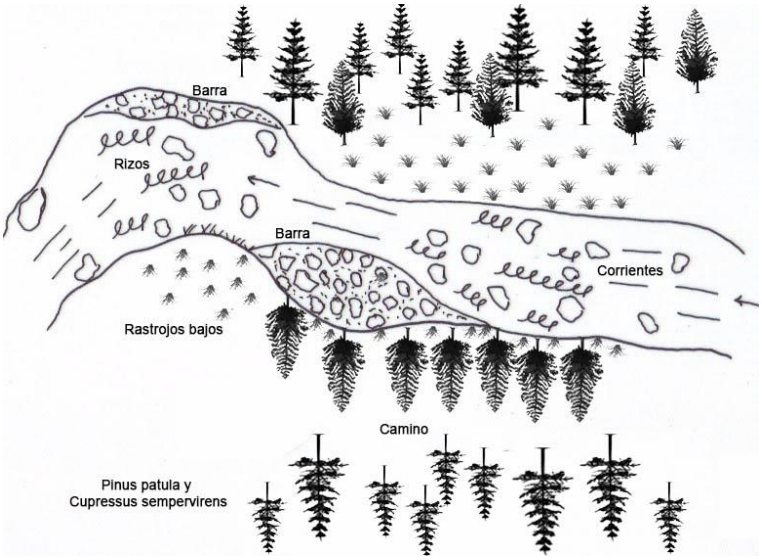



Figura 3-101 - Estación H6 Quebrada la Hondina 1 Esquema del sitio de muestreo de acuerdo con el protocolo de Ausrivas para cuerpos de agua de alto gradiente

El cauce mide aproximadamente 2 metros; el cual está muy seguramente sujeto a inundaciones periódicas. El sustrato está compuesto por rocas de menor tamaño (aproximadamente de 20 cm de diámetro), el cual podría ser un sustrato adecuado para los macro invertebrados acuáticos, no se observan algas perifíticas, las cuales podrían ser un indicador de la entrada de nutrientes. El nivel del agua es bajo, lo cual indica probablemente que las especies de peces que podrían hallarse son de menor tamaño. El flujo del cauce tiene paso moderadamente restringido y un caudal de 173,8 l/s, se encontraron barras laterales de roca sin vegetación hacia la ribera izquierda, pero no hay modificaciones del canal. El agua se observa cristalina, dominan los rizos, con algunas zonas de aguas corrientes, no se observan en ninguno de los puntos de muestreo la formación de pozas.

En ambas márgenes del cauce las pendientes son bajas, ésta cambia aproximadamente a 20 metros de distancia del cauce, aguas más arriba se observan un desplazamiento en zonas próximas al cuerpo de agua, que pudieran determinar la inestabilidad en el sitio de muestreo. A pesar de que se presenta en la zona acceso al ganado y personas de la zona, no se observan aceites ni en el agua ni en el sedimento, tampoco fueron identificados olores asociados a materia orgánica en descomposición. El agua en el punto de muestreo se observa clara, aunque aproximadamente unos 300 metros más arriba, hay un cambio de pendiente y un posible vertimiento de aguas negras, lo que cambiaría las condiciones del agua.

#### *3.2.5.1.7.2 Subcuenca La Floresta*

Esta subcuenca se halla en la zona de influencia del proyecto, forma parte de la gran cuenca del Río Negro, en general estas quebradas se encuentran en lugares medianamente conservados en donde las principales actividades antrópicas observadas en el lugar han sido el direccionamiento de las quebradas a través de estructuras denominadas box culvert, captaciones de aguas por medio de mangueras y por el acueducto Yarumaguas, a continuación se encuentra una descripción de las tres estaciones de muestreo escogidas para este lugar.

**Estación F1 Quebrada La Floresta Parte Alta**

El punto de muestreo se ubica aguas arriba del acueducto Yarumaguas justo antes de la captación, en el lugar se observan presas y tubos para el redireccionamiento del agua. La estación de muestreo presenta forma de valle con pendientes en ángulo agudo, el agua se encontró clara, ocupando más del 75% del canal disponible, zonas de rápidos, rizos o caballitos, una cascada, saltos y pozas poco profundas

Sobre la quebrada que cuenta con un caudal de 78,7 l/s, se encuentran cuatro mangueras para la extracción de agua de aproximadamente una y media pulgadas.

La vegetación de la zona riparia está compuesta en su gran parte por árboles nativos mayores a 10m de altura, arbustos, helechos y por gramíneas de la especie Chusquea (chusque), en general, el lugar se encuentra conservado y presenta un grado de perturbación medio, el cual es derivado especialmente de las captaciones con cierto número de mangueras.

El flujo del cauce tiene paso restringido para los peces, dada la presencia de una presa que lo que hace es retener el agua con el fin de captarla, adicionalmente se observan cascadas y zonas se saltos a lo cual se suma el bajo nivel del agua, que no favorece la conectividad entre diferentes ambientes. Se observan barras laterales sin vegetación, el canal presenta presas y desvíos, tiene forma de box, las dos riberas tienen pendiente vertical y la forma es convexa, se presentan afloramientos de roca en igual cantidad para ambas riberas (80%).

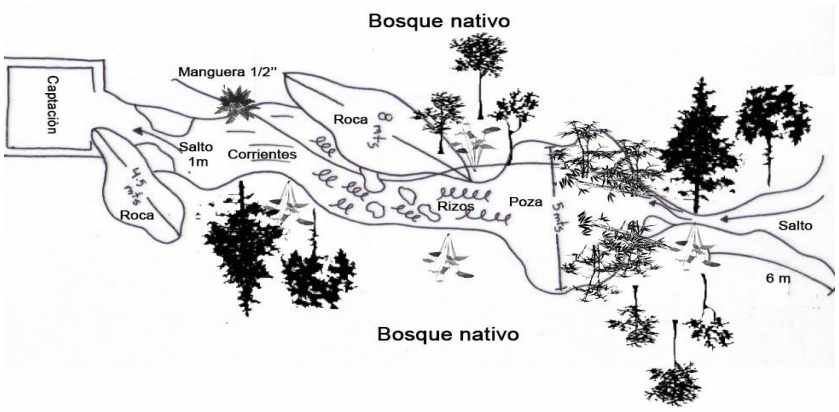



Figura 3-102 - Estación F1 Quebrada La Floresta Parte Alta Esquema del sitio de muestreo de acuerdo con el protocolo de Ausrivas para cuerpos de agua de alto gradiente

### Estación F2 Quebrada La Floresta 1

Esta quebrada se encuentra ubicada en el acueducto Yarumaguas. En el último tramo de muestreo la quebrada atraviesa la vía a través de dos box culvert que permiten el paso del agua, presenta forma de valle poco profundo, el cauce mide aproximadamente siete metros de ancho. Se identificó el agua clara, con más del 75% del canal ocupado, el 25% restante es ocupado muy seguramente durante los momentos de aguas altas. En la quebrada se observan zonas de corrientes, rizos o caballitos, rápidos y pozas profundas, en el momento de muestreo el caudal fue de 37,5 l/s.

La vegetación de la zona riparia se compone de arbustos, árboles menores a 10m de altura, hierbas y helechos, en general las riberas están rodeadas por bosque fragmentado que presenta un grado de perturbación alto, próximo a la quebrada se observan pastos en ambas márgenes, el sustrato está conformado especialmente por piedras de menor tamaño (generalmente menores a 30cm de diámetro), las cuales favorecen el establecimiento de macroinvertebrados acuáticos.

El flujo del cauce tiene buen paso para los peces aunque los de menor tamaño, no se encuentran barras laterales, el canal fue rectificado o canalizado en el pasado, éste tiene forma de U, las dos riberas tienen pendiente baja (10-30°) y forma convexa, se presentan afloramientos de roca sólo en la ribera derecha (10%). Las riberas son moderadamente estables.

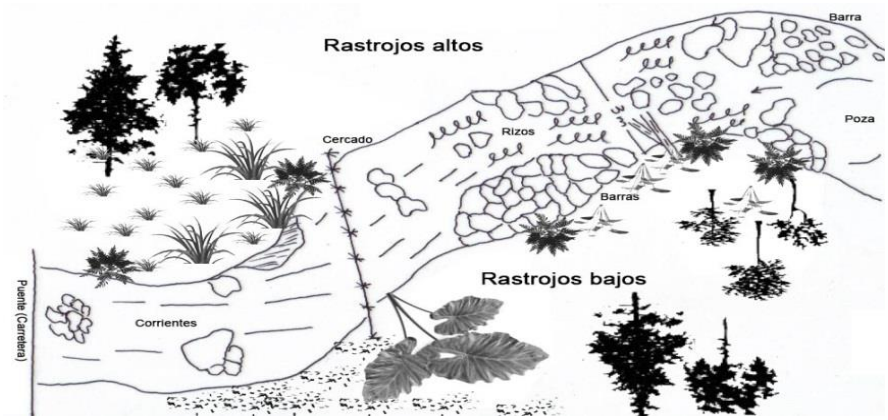



Figura 3-103 - Estación F2 Quebrada La Floresta 1. Esquema del sitio de muestreo de acuerdo con el protocolo de Ausrivas para cuerpos de agua de alto gradiente

### Estación F3 Quebrada La Floresta 2

El sitio se encuentra ubicado aguas abajo de una arenera que le aporta gran cantidad de sedimento fino a la quebrada proveniente de la remoción continua del sustrato. El cauce de la quebrada pasa por debajo de un box culvert, paralelo a la quebrada Yarumal. La estación de muestreo presenta forma de valle poco profundo, el cauce mide aproximadamente cuatro metros de ancho, el agua ocupa entre el 25 y 75% del canal disponible, tiene un caudal de 51,9 l/s. El agua se observa algo turbia, producto de las actividades antrópicas que se desarrollan en la zona, adicionalmente, se pueden percibir en ella olores asociados a aguas residuales, se observa fitoperifiton adheridos a los sustratos lo cual indica que hay entrada de nutrientes que pueden ser aportados probablemente por casas ubicadas aguas arriba de sitio.

Las formas que predominan son corrientes, rizos o caballitos una cascada, y una mezcla igual de pozas grandes y pequeñas, con un profundidad aproximada de cincuenta centímetros.

La vegetación de la zona riparia está compuesta en gran parte por árboles menores a 10m de altura, árboles mayores a 10m de altura, de especies tales como *Cupressus* (pino ciprés), *Eucalyptus* (eucaliptos), *Tibouchina* (siete cueros), y potreros, presentando un grado de perturbación alto.

El flujo del cauce tiene paso parcialmente restringido para el desplazamiento de los peces; se encuentran barras laterales de arena y sedimento, el canal fue canalizado en el pasado, por lo cual el agua pasa a través de una estructura de cemento. La ribera izquierda tiene pendiente baja (10-30°) y la ribera derecha pendiente moderada (30-60°) y su forma es cóncava y convexa respectivamente, no se presentan afloramientos de roca. Se observaron muros de contención laterales para evitar la erosión, ya que hay factores como el acceso de ganado y tubos de desagüe que podrían afectar la estabilidad de la ribera.

Figura 3-104 - Estación F3 Quebrada La Floresta 2. Esquema del sitio de muestreo de acuerdo con el protocolo de Ausrivas para cuerpos de agua de alto gradiente

### *3.2.5.1.7.3 Subcuenca La Yarumal*

Esta subcuenca se encuentra ubicada en la zona de influencia más baja del proyecto, hace parte de la gran cuenca del Río Negro, presenta actividades antrópicas como producto de las zonas de canteras y minería artesanal allí existentes, también se encuentran algunos cultivos de aguacate y fincas recreativas, en este lugar fueron elegidas once estaciones de muestreo, donde sus características más importantes son descritas a continuación.

**Estación Y1: Quebrada La Yarumal 1**

El cauce mide aproximadamente un metro de ancho. La zona fue afectada por un deslizamiento de tierra que provocó desprendimiento de óxido de aluminio y hierro lo que le otorga un color rojizo al lecho.

La vegetación de la zona está compuesta principalmente por árboles exóticos en su mayoría pinos, eucaliptos, y rastrojo alto, y en la zona riparia por árboles mayores a 10 m de altura, hierbas y helechos, dándose una perturbación extrema.

El flujo del cauce tiene paso muy restringido para los peces puesto que presenta una barra central con algo de vegetación que divide el cauce, también cuenta con una barra lateral de sedimento sin vegetación. El canal tiene forma de U aplanada, ambas riberas tienen pendiente escarpada de forma cóncava, y no presentan afloramientos de roca. La ribera es moderadamente inestable, entre el 30-60% de la extensión de la margen presenta áreas de erosión, además la estabilidad de la ribera puede afectarse por vegetación escasa.

No hay presencia de aceites ni de olores en el sedimento ni en el agua. En el punto de muestreo se calculó un caudal de 3,7 l/s, se hallaron zonas de corrientes, rizos o caballitos, y adicionalmente se encontraron pozas poco profundas y pequeñas.

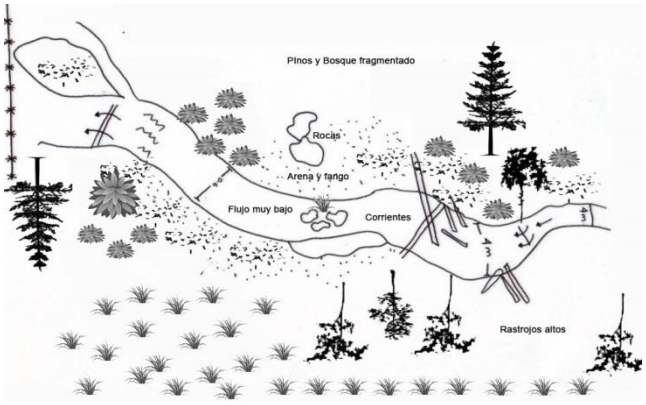



Figura 3-105 - Estación Y1. Quebrada La Yarumal 1. Esquema del sitio de muestreo de acuerdo con el protocolo de Ausrivas para cuerpos de agua de alto gradiente

### Estación Y2: Afluente 1 a la Yarumal

La quebrada se encuentra en un fragmento de bosque medianamente conservado, una parte del cauce está cubierto por árboles de diámetro menor a diez centímetros y de altura mayor a diez metros, a su vez la vegetación riparia está compuesta por hierbas, pastos, helechos, especies exóticas del genero *Cupressus* (Pino Ciprés), *Pinus patula* (Pino Patula), *Cecropia peltata* (Yarumo), y árboles nativos como el *Tibouchina lepidota* (sietecueros), en la margen derecha se encuentra una estructura en cemento la cual restringe un poco el flujo de agua, el cauce mide aproximadamente veinte centímetros de ancho, el agua tiene un caudal de 2,1 l/s y ocupa entre el 25 y 75% del canal disponible; todas las características mencionadas anteriormente hacen que la quebrada presente un grado de perturbación alta.

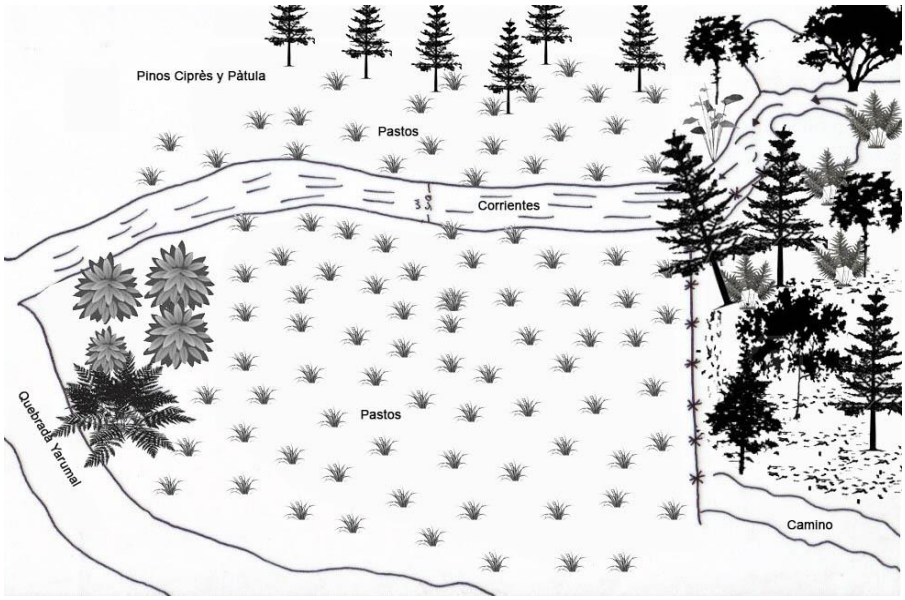



Figura 3-106 - Estación Y2. Afluente 1 a la Yarumal. Esquema del sitio de muestreo de acuerdo con el protocolo de Ausrivas para cuerpos de agua de alto gradiente

El flujo del cauce tiene paso parcialmente restringido para los peces. El canal tiene forma de U aplanada, ambas riberas tienen pendiente plana, de forma convexa. La ribera es estable, la erosión en la orilla es ausente o mínima, sin embargo, la escasa vegetación podría afectar la estabilidad de la ribera.

### Estación Y3: Afluente 2 Yarumal

El sitio de muestreo se encuentra ubicado en el predio Samarcanda, el cuerpo de agua es claro, está libre de olores, aceites y es pequeño, se encuentran zonas de corrientes y pequeñas pozas poco profundas, cuenta con un caudal de 1,6 l/s.

El lecho de la quebrada es estable, presenta compactación moderada. El cauce mide alrededor de cincuenta centímetros de ancho, está cubierto por vegetación en rastrojo bajo limitándole el acceso de luz y aunque no se observan barras tiene un paso moderadamente restringido para los peces debido a vegetación sumergida.

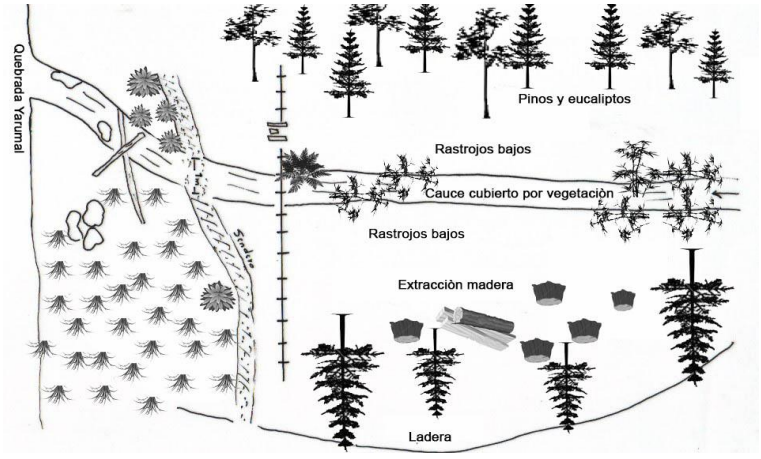



Figura 3-107 - Estación Y3 Afluente 2 a la Yarumal. Esquema del sitio de muestreo de acuerdo con el protocolo de Ausrivas para cuerpos de agua de alto gradiente

La vegetación de la zona riparia está compuesta por hierbas, helechos y árboles mayores a 10 m de altura tales como pinos. La única afectación evidenciada se presenta hacia la margen izquierda en donde varios árboles fueron talados y los restos fueron arrojados sobre el cauce, no obstante el grado de perturbación se cataloga como muy bajo.

### Estación Y4: Afluente 3 Yarumal

El sitio es conservado y de difícil acceso. En cierto punto se encuentra un camino de piedra que conduce hasta la quebrada, el cauce mide aproximadamente ochenta centímetros, el agua alcanza la base de las orillas.

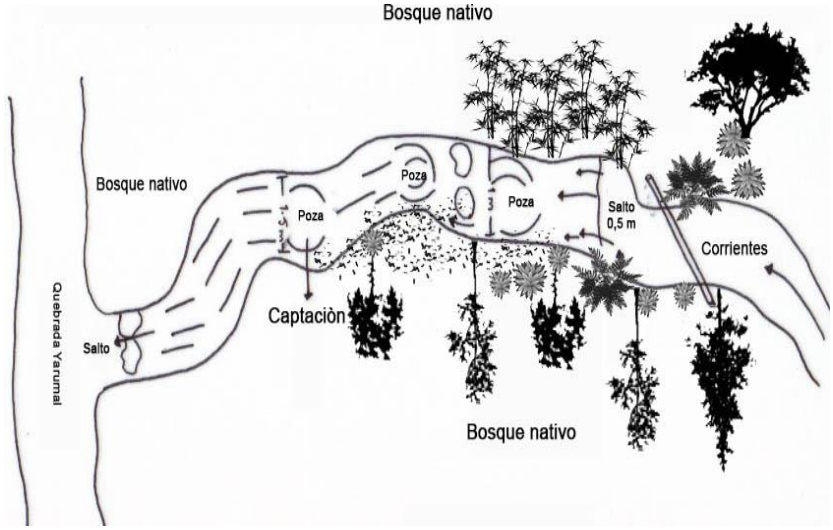



Figura 3-108 - Estación Y4. Afluente 3 a la Yarumal. Esquema del sitio de muestreo de acuerdo con el protocolo de Ausrivas para cuerpos de agua de alto gradiente

La zona riparia está compuesta en su mayor parte por árboles mayores a 10 m de altura, hierbas, helechos, este lugar se podría catalogar como bosque nativo que presenta un grado de perturbación muy bajo. El flujo del cauce tiene buen paso, debido a la ausencia de barras laterales y centrales, tampoco hay modificaciones del mismo, el caudal medido fue 27,9 l/s, se encuentra una pequeña captación en el sitio por medio de una manguera de media pulgada de diámetro.

El nivel de turbidez del agua de la quebrada fue leve debido a material vegetal. En el punto de muestreo las formas predominantes del lecho son rápidos, saltos corrientes, y pozas poco profundas.

### Estación Y5: Quebrada la Yarumal 2

El sitio de muestreo se encuentra ubicado en el predio del señor Martin Forero, presenta forma de valle poco profundo. El cauce de la quebrada se encuentra cubierto por rastrojo alto, mide alrededor de tres metros de ancho, el agua ocupa entre el 25 y 75% del canal y se obtuvo un caudal de 43,8 l/s al momento del muestreo.

La vegetación de la zona riparia está compuesta por gramíneas de la especie Chusquea (chusque), hierbas, helechos, arbustos y árboles mayores a 10 m de altura, entre éstos algunos pinos como Patula (*Pinus patula*) y Cipres (*Cupressus*), también se observaron varios troncos de diámetro mayor a 10 cm sobre la quebrada, provocando un paso restringido moderadamente para los peces, no se evidencian grandes procesos erosivos, el grado de perturbación del lugar es muy bajo, existen barras laterales de roca de diámetro de un metro sin vegetación, se presentan afloramientos de las rocas, en la ribera derecha un 40% y en la izquierda un 10%.

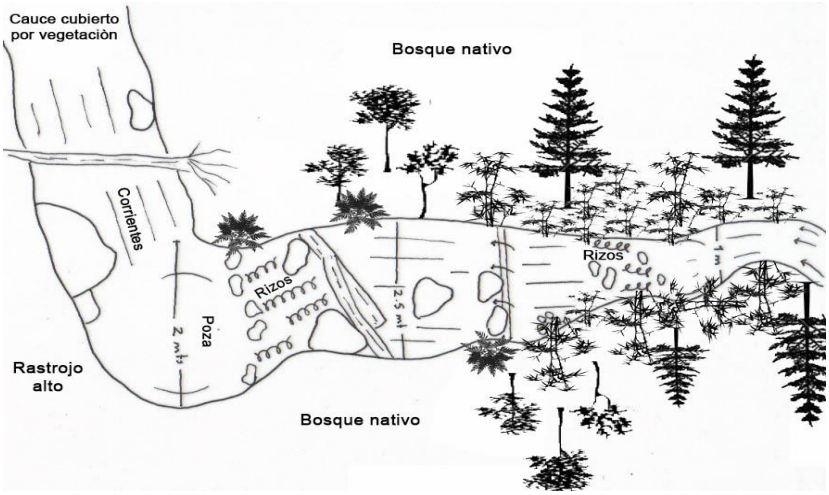



Figura 3-109 - Estación Y5 (E46) Quebrada la Yarumal 2 Esquema del sitio de muestreo de acuerdo con el protocolo de Ausrivas para cuerpos de agua de alto gradiente

Se observaron algunos tramos de aguas corrientes, rápidos, rizos o caballitos y un pequeño salto de aproximadamente 30 cm de alto.

### Estación Y6: Afluente 4 Yarumal

El punto de muestreo se ubica sobre la ribera derecha de la quebrada Yarumal, aguas arriba de la truchera. El cauce mide noventa centímetros de ancho.

Se observaron tres mangueras para la captación de agua, dos de ellas sobre la margen derecha, de diámetro aproximado de media pulgada, y la otra manguera es de dos pulgadas y se encuentra sobre la quebrada. La vegetación de la zona riparia está compuesta en su mayor parte por árboles mayores a 10 m de altura formando un bosque nativo poco intervenido, la ribera es estable, las evidencias de erosión en las márgenes son ausentes o mínimas, presentando un grado de perturbación bajo.

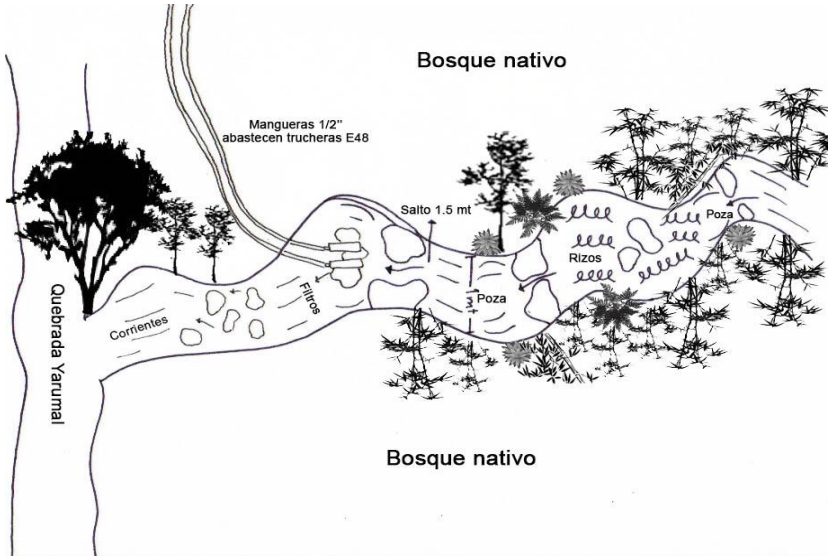



Figura 3-110 - Estación Y6 (E47) Afluente 4 Yarumal Esquema del sitio de muestreo de acuerdo con el protocolo de Ausrivas para cuerpos de agua de alto gradiente

El lecho de la quebrada es estable, se puede observar piedras de sesenta centímetros de diámetro sobre éste, no existen barras, el canal tiene forma de U, se presentan afloramientos de roca en ambas riberas de 50% para cada una.

No hay presencia de aceites y olores en el sedimento ni en el agua. El agua de la quebrada es clara con un caudal de 3,1 l/s y con zonas predominantes de corrientes y saltos.

### Estación Y7: Afluente 5 Yarumal

El sitio de muestreo se encuentra ubicado en el predio la Araucaria (truchera), la quebrada es afluente a la Yarumal, el sitio es de difícil acceso, con un valle estrecho profundo con los lados escarpados, el cauce mide aproximadamente noventa centímetros. La vegetación de la zona riparia está compuesta en su mayor parte por árboles mayores a 10 m de altura, hierbas y helechos, en general es un bosque nativo intervenido con un grado de perturbación bajo.

En el sitio se encuentran varias mangueras que surten de agua a dos estanques de *Oncorhynchus mykiss* (Trucha Arcoiris), una de las mangueras de aproximadamente dos pulgadas capta el agua directamente en el punto y la lleva a uno de los estanques que tiene aproximadamente 2,0 m de largo por 5,0 m de ancho, las otras mangueras de aproximadamente una pulgada captan agua en el punto Y6 para otro estanque. (Figura 3.76 Estación Y7: Afluente 5 Yarumal Esquema del sitio de muestreo de acuerdo con el protocolo de Ausrivas para cuerpos de agua de alto gradiente.

El flujo del cauce tiene paso muy restringido, no existen barras, las riberas tienen pendiente escarpada (60-80°) y con forma cóncava, se presentan afloramientos de roca en ambas riberas siendo en la ribera derecha mayor. El lecho de la quebrada es estable, presenta compactación moderada y rocas angulares.

En el sedimento y en el agua no hubo presencia de aceites u olores. El agua de la quebrada estaba clara. En el punto de muestreo las formas predominantes del lecho son los rizos o caballitos y corriente, las pozas en su mayoría son poco profundas y pequeñas. El caudal en el punto de muestreo fue de 1,2 l/s.

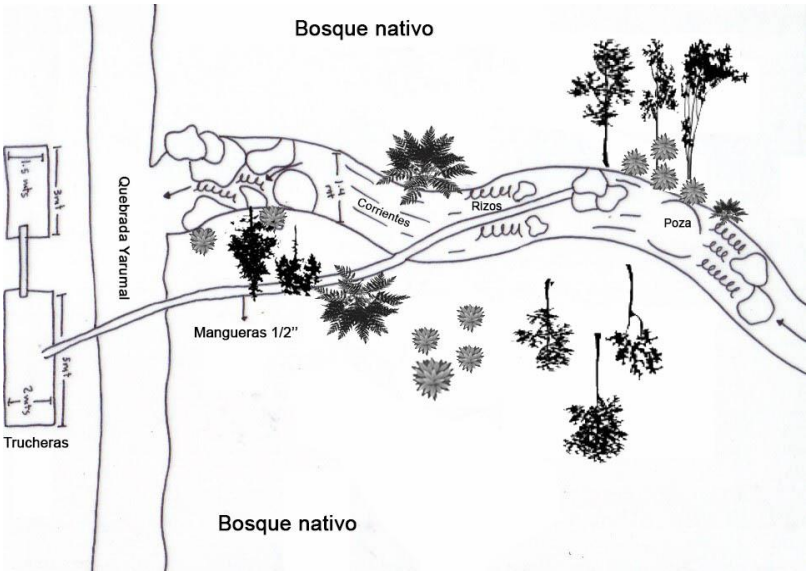



Figura 3-111 - Estación Y7: Afluente 5 Yarumal Esquema del sitio de muestreo de acuerdo con el protocolo de Ausrivas para cuerpos de agua de alto gradiente

### Estación Y8: Quebrada la Yarumal 3

Esta estación se encuentra dentro de una plantación de Persea americana (aguacate), se realizó un análisis de suelos (Piezómetro), la forma de valle poco profundo y el cauce mide aproximadamente dos metros, el caudal registrado fue 57,6 l/s.

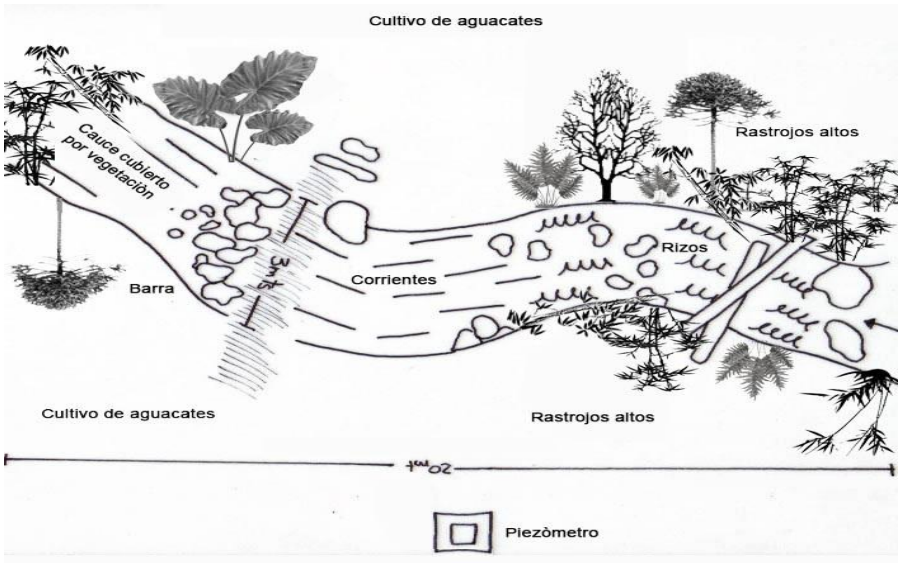



Figura 3-112 - Estación Y8 Quebrada la Yarumal 3 Esquema del sitio de muestreo de acuerdo con el protocolo de Ausrivas para cuerpos de agua de alto gradiente

La zona riparia está compuesta en su mayor parte por árboles menores a 10 m de altura, Adicionalmente las hierbas, helechos, y arboles mayores a 10 m de altura están presentes en cantidades similares, Se observó una poca cantidad de aceites en el sedimento producto del piezómetro ubicado en este sitio, aunque en el agua no había evidencia de estos.

El agua estaba levemente turbia producto de material disuelto de origen vegetal. En el punto de muestreo las formas predominantes del lecho son los rizos o caballitos y corriente. Se presenta un grado de perturbación moderada. La ribera es moderadamente estable, son poco frecuentes las áreas con erosión, sin embargo, existen factores como la escorrentía y la vegetación es escasa que podrían desestabilizar la ribera.

### Estación Y9 Confluencia Yarumal-Hondina

El sitio de muestreo se encuentra ubicado en el predio de la señora Nazaret, a una distancia aproximada de 300 metros al predio “La Sarita”, La quebrada tiene un plano de inundación simétrico, el cauce es de aproximadamente tres metros de ancho, el agua ocupa más del 75% del canal disponible, con un caudal de 171,6 l/s, Se observaron algunas mangueras para su captación de aproximadamente 1,5 pulgadas. Hay presencia de palizadas.

La zona riparia, presenta un alto grado de deterioro debido a la deforestación, solo logran identificarse unos cuantos árboles y arbustos, aunque domina la zona de potrero, en los cuales se encuentran vacas y caballos, el sitios está rodeado por un ambiente colinado, probablemente en los momentos de lluvias aporta por escorrentía una buena cantidad de nutrientes al cuerpo de agua.

Dichas actividades antrópicas han determinado una alta perturbación de la vegetación, además del acceso humano y de animales por todo el cauce de la quebrada. El agua en el momento de muestreo estaba turbia debido a la presencia de material fino suspendido. A pesar de los impactos derivados de la actividad minera no se observa presencia de aceites ni de olores en el sedimento

ni en el agua. El flujo del cauce tiene paso parcialmente restringido, ya que existen barras laterales y barras en medio del canal sin vegetación, compuestas de guijarros y rocas.

En el punto de muestreo las formas predominantes del lecho son corrientes, rizos o caballitos, rápidos, y pozas que en su mayoría son poco profundas y pequeñas o incluso están ausentes.

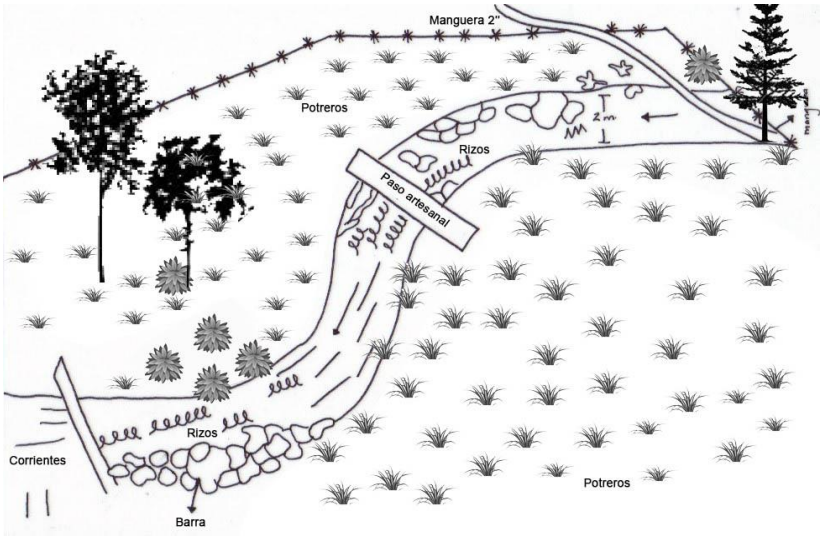



Figura 3-113 - Estación Y9: Confluencia Yarumal-Hondina. Esquema del sitio de muestreo de acuerdo con el protocolo de Ausrivas para cuerpos de agua de alto gradiente

### Estación Y10: Quebrada Yarumal 4

El sitio se encuentra ubicado al frente de la finca la Flora. Aproximadamente a unos 15 m hacia la margen derecha de la quebrada se encuentra una carretera veredal, la estación de muestreo presenta forma de un valle poco profundo. La vegetación de la zona está compuesta principalmente por especies exóticas del genero Cupressus (pino ciprés), Thumbergia alata (ojo de poeta), rastrojo alto y potreros). El ancho del cauce es de cinco metros aproximadamente, el flujo de agua es de 121,1 l/s, tiene paso moderadamente restringido para los peces, se observan barras laterales de arena, roca (4m) y sedimento. En el punto de muestreo las formas predominantes del lecho son los rápidos, los rizos o caballitos.

Los principales impactos en este lugar se originan desde hace más de 20 años (según información suministrada por algunos mineros), a causa de la minería artesanal de oro, que afecta la estabilidad de la ribera y contaminan el agua, ocasionando un color turbio, además presenta fuertes olores asociados a aguas residuales.

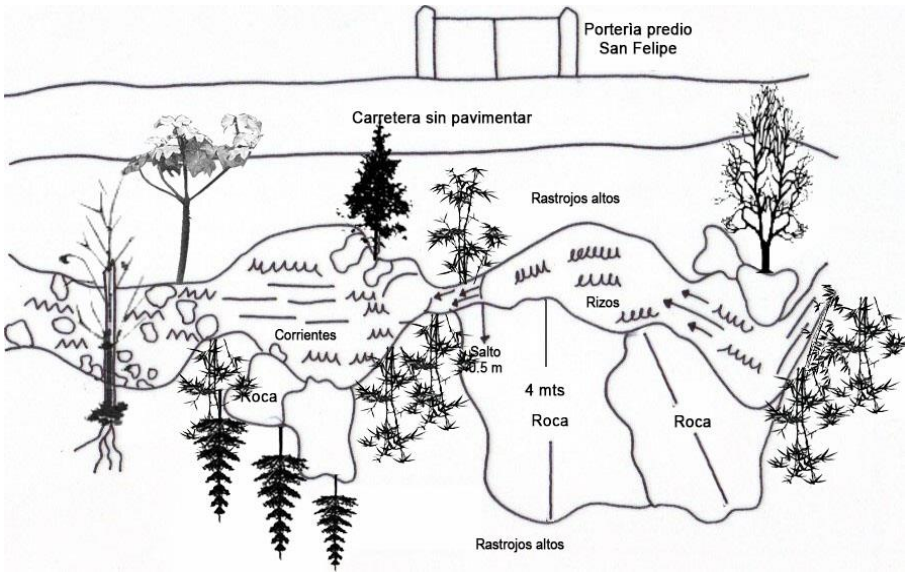



Figura 3-114 - Estación Y10 (E5) Quebrada Yarumal 4. Esquema del sitio de muestreo de acuerdo con el protocolo de Ausrivas para cuerpos de agua de alto gradiente

### Estación Y11: Quebrada La Yarumal 5

El punto está ubicado paralelo a la carretera que conduce a la vereda Yarumal. Hacia la margen derecha se encuentra un box culvert que transporta el agua desde un cuerpo de agua más pequeño hasta la quebrada. El ancho del cauce es de seis metros, el caudal es de 273,9 l/s, el flujo no presenta ninguna restricción para el paso de los peces. Se observan barras laterales y centrales, conformadas por rocas, guijarros y arenas.

Tiene un valle asimétrico que puede estar sujeto a inundación. Se observan pastos; la ribera izquierda está compuesta en su mayor parte de rastrojo bajo, especies exóticas del genero

*Cupressus* (pino ciprés), *Pinus patula* (pino pátula), especies arbóreas como *Cecropia angustifolia* (yarumo negro) y, *Thumbergia alata* (ojo de poeta) abundante. En general presenta un grado de perturbación muy alto debido a la intrusión de especies exóticas en gran cantidad, adicionalmente la estabilidad del cauce de la quebrada se ve afectado por la extracción de material de playa, y por el acceso humano.

El canal presenta una única modificación aparente debida al refuerzo de su ribera derecha con costales que contienen arena a la altura de la carretera. El Cauce presenta forma de U aplanada, la margen derecha tiene pendiente moderada (30-60°) y la ribera izquierda tiene una pendiente escarpada (60-80°) no presentan afloramientos de roca en ninguna de las dos riberas.

No hay presencia de aceites en el sedimento ni en el agua, pero si olores asociados a aguas residuales y a la acidez producida por los procesos de descomposición de la materia orgánica. El nivel de turbidez del agua de la quebrada es leve debido a la presencia de material fino en suspensión. En el punto de muestreo la forma predominante del lecho es zona de corrientes.

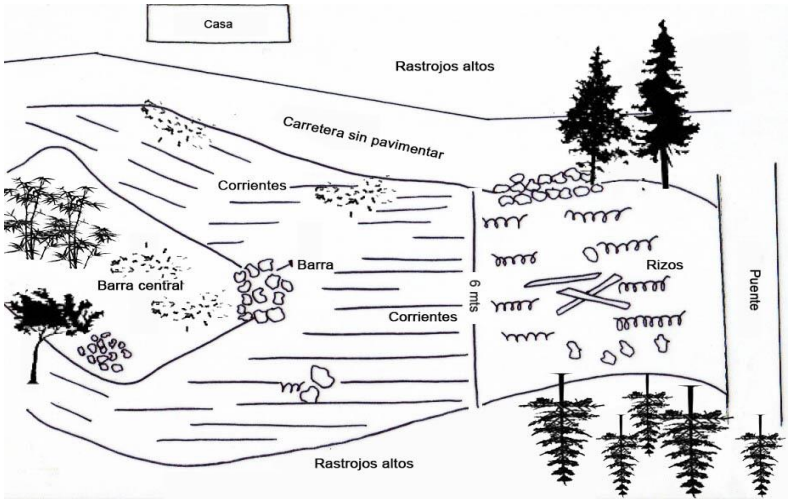



Figura 3-115 - Estación Y11 Quebrada La Yarumal 5. Esquema del sitio de muestreo de acuerdo con el protocolo de Ausrivas para cuerpos de agua de alto gradiente

### *3.2.5.1.7.4 Subcuenca La Salazar*

Esta subcuenca se encuentra ubicada en la zona oriental de proyecto próxima al portal oriental y hace parte de la gran cuenca del Río Negro. Se caracteriza por presentar diferentes actividades antrópicas derivadas especialmente de los amplios asentamientos de fincas recreativas, adicionalmente las actividades agrícolas entre las que se encuentran el cultivo de moras, tomate de árbol, aguacates y en menor medida las actividades ganaderas. En esta subcuenca fueron elegidas 10 estaciones de muestreo, a continuación se describen las características más relevantes de cada uno de los sitios muestreados.

**Estación S1: Quebrada Betania 1**

El sitio de muestreo se ubica en la finca Betania, cercano a una plantación Pino Pátula, sin mantenimiento, en general la zona se encuentra bastante conservada sin ninguna intervención antrópica. La vegetación de sus riberas se compone principalmente por árboles nativos de más de 10 metros de altura tales como Yarumos y algunas Melastomataceas de la región la visibilidad del cauce es reducida debido a la altura de la vegetación.

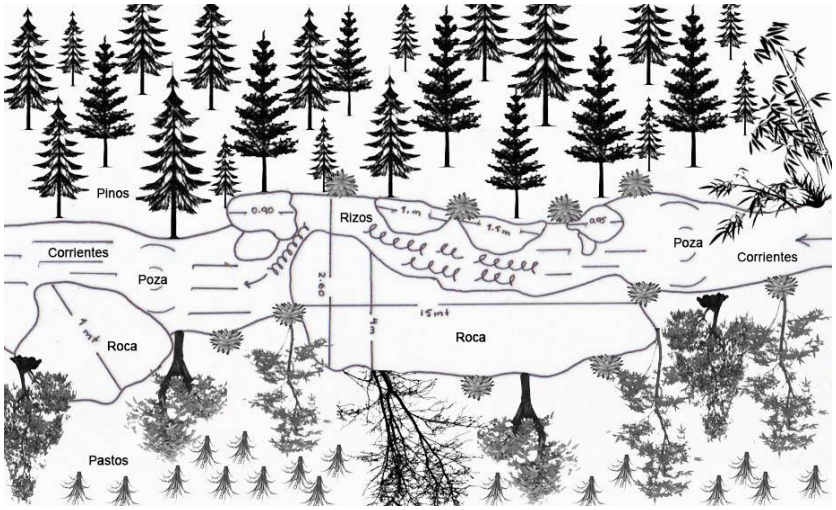



Figura 3-116 - Estación S1: Quebrada Betania 1. Esquema del sitio de muestreo de acuerdo con el protocolo de Ausrivas para cuerpos de agua de alto gradiente

El cauce mide 2,60 metros, presenta un flujo base con un paso muy restringido para el paso de los peces debido a los afloramientos rocosos en ambas riberas que forman un canal con muchas ondulaciones a lo largo del sitio. Además hay presencia de barras de roca y algunos troncos caídos que pueden obstruir el flujo. El canal tiene forma de U profunda aunque tiene zonas donde este es

más plano. El lecho se compone principalmente de roca y sus micro hábitats dominantes son los rizos, aunque también se observan algunas pozas de 60 cm de profundidad aproximadamente. La ribera izquierda presentan una pendiente moderada a lo largo del sitio, mientras que la pendiente de la ribera derecha es escarpada con un angulo entre 60 y 80°. El lecho es estable no hay presencia de erosión las márgenes ni gran acumulación de sedimento fino sobre el lecho el agua es clara sin presencia de olores o aceites.

Durante el muestreo el día estuvo nubado con presencia de pocas lluvias el caudal del cuerpo de agua fue de 6,3 l/s.

### Estación S2: Quebrada Betania 2

El cuerpo de agua aflora en los predios de la finca Betania, la cual corre por un valle profundo y estrecho con los lados escarpados, La vegetación ribereña se encuentra en rastrojo alto, obstruyendo gran parte del cauce de la quebrada y está compuesta principalmente por gramíneas del genero Chusquea hierbas, helechos, y por árboles nativos mayores a 10 m de altura regularmente espaciados a lo largo del sitio.

El cauce mide aproximadamente 5 metros de ancho en su parte más ancha, aguas abajo, justo antes de la confluencia con otro afluente. No se encuentran barras laterales debido a que la pendiente de la quebrada no permite el depósito de sedimentos. El canal tiene forma de U aplanada con un lecho rocoso en todo el tramo de muestreo, se compone principalmente de corrientes, deslizaderos y al final del tramo un salto de 3 metros aproximadamente. Ambas riberas presentan una pendiente escarpada de forma cóncava para la ribera izquierda y convexa para la ribera derecha, la zona no presenta erosión en sus riberas y no existen factores que puedan afectar la estabilidad de la misma. El agua ocupa entre el 25 y 75% del canal disponible. No hay presencia de aceites u olores en el sedimento ni en el agua, se observó clara; sin gran acumulación del material suspendido sobre el cuerpo de agua y aparentemente en un buen estado de conservación.

Durante la toma de muestras hidrobiológicas el cielo estuvo nubado, pero pocas lluvias, el caudal en el punto de muestreo fue de 5,4 l/s.

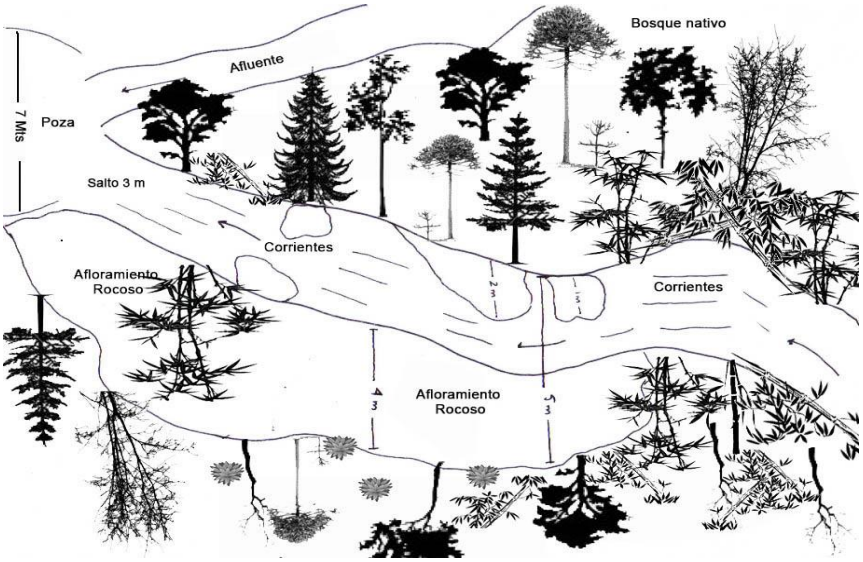



Figura 3-117 - Estación S9 (E41): Quebrada Betania 2. Esquema del sitio de muestreo de acuerdo con el protocolo de Ausrivas para cuerpos de agua de alto gradiente

### Estación S3: Afluente 1 a la Salazar, parte media

El punto de muestreo es un sitio de difícil acceso y poco transitado, sin embargo, en la zona se observan algunas actividades ganaderas que pueden o no afectar la fuente hídrica aguas arriba. La estación de muestreo presenta un valle estrecho y profundo con los lados escarpados, La vegetación ribereña está compuesta principalmente por, gramíneas genero Chusquea. También, hacia la ribera izquierda se observa una plantación de Pino Ciprés, sin mantenimiento, aguas arriba del tramo, el cauce está cubierto por vegetación alta que impide la entrada de luz directa sobre el mismo, pero en general se observa un grado de perturbación bajo.

El cauce mide aproximadamente 2 m, hay pocas formaciones de barras de roca a lo largo del sitio, por lo que el flujo no presenta restricciones para el paso de los peces. El canal tiene forma de U aplanada, cuya partícula dominante es el guijarro, aunque se observan afloramientos rocosos sobre la ribera derecha principalmente. Las dos riberas tienen pendiente baja de forma convexa. A lo largo del tramo de muestreo, las zonas más características sobre el lecho son los rizos y rápidos. En las márgenes no hay evidencia de erosión, las características del lecho le otorgan una buena estabilidad. El agua ocupa entre el 25 y 75% del canal disponible. No hay presencia de aceites en el sedimento ni en el agua, sin embargo, si se perciben algunos olores asociados a la acidez producida por los procesos de descomposición de la materia orgánica. El nivel de turbidez del agua fue leve debido a la presencia de material suspendido.

Durante la toma de muestras hidrobiológicas el estado del tiempo fue despejado sin lluvias, y el valor del caudal en el sitio de muestreo fue de 22,9 L/s.

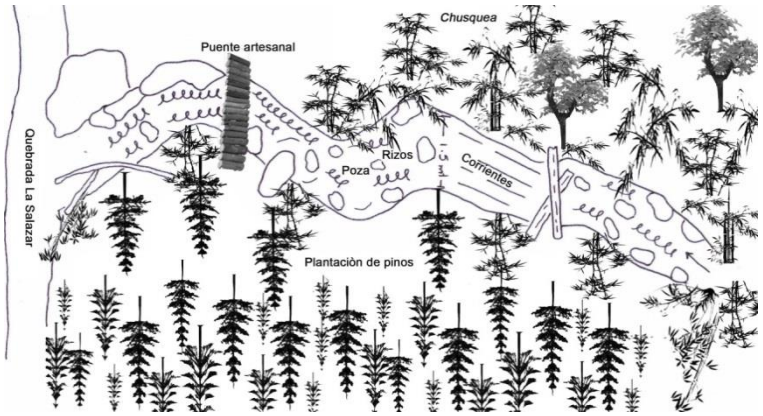



Figura 3-118 - Estación S3: Afluente 1 a la Salazar, parte media. Esquema del sitio de muestreo de acuerdo con el protocolo de Ausrivas para cuerpos de agua de alto gradiente

### Estación S4: Afl*uente* 2 a La Salazar

El sitio de muestreo está ubicado en la vía que conduce desde la Catalana hacia la Rionegro, en la vereda Sajonia. La quebrada pasa por un canal rectificado debajo de la vía. La cobertura vegetal es diferente a los dos lados de la carretera. Bajando hacia Rionegro en el lado izquierdo de la vía se observa un parche de bosque fragmentado con una gran cantidad de helechos y arbustos mientras que hacia la derecha se observan pastos limpios que modifican la forma del valle y las riberas del cuerpo de agua en un tramo no mayor a 5 metros.

El cauce mide aproximadamente 2 metros de ancho. Se encuentran barras laterales con vegetación. El canal tiene forma de U aplanada, con un lecho de baja compactación. En el tramo superior hay piedras subangulares de aproximadamente de 30 cm de diámetro, mientras que hacia el tramo inferior el canal está completamente despejado. Ambas riberas son de forma cóncava; la ribera izquierda tiene pendiente baja y la derecha tiene pendiente moderada. El sitio en general, presenta unas márgenes con erosión moderada. En el punto de muestreo las zonas predominantes del lecho son corrientes, y un pequeño salto. El agua ocupa más del 75% del canal disponible y tiene menos del 25% del sustrato del canal expuesto. No hay presencia de aceites ni de olores en el sedimento ni en el agua, sin embargo, el nivel de turbidez del agua fue leve como consecuencia de material suspendido.

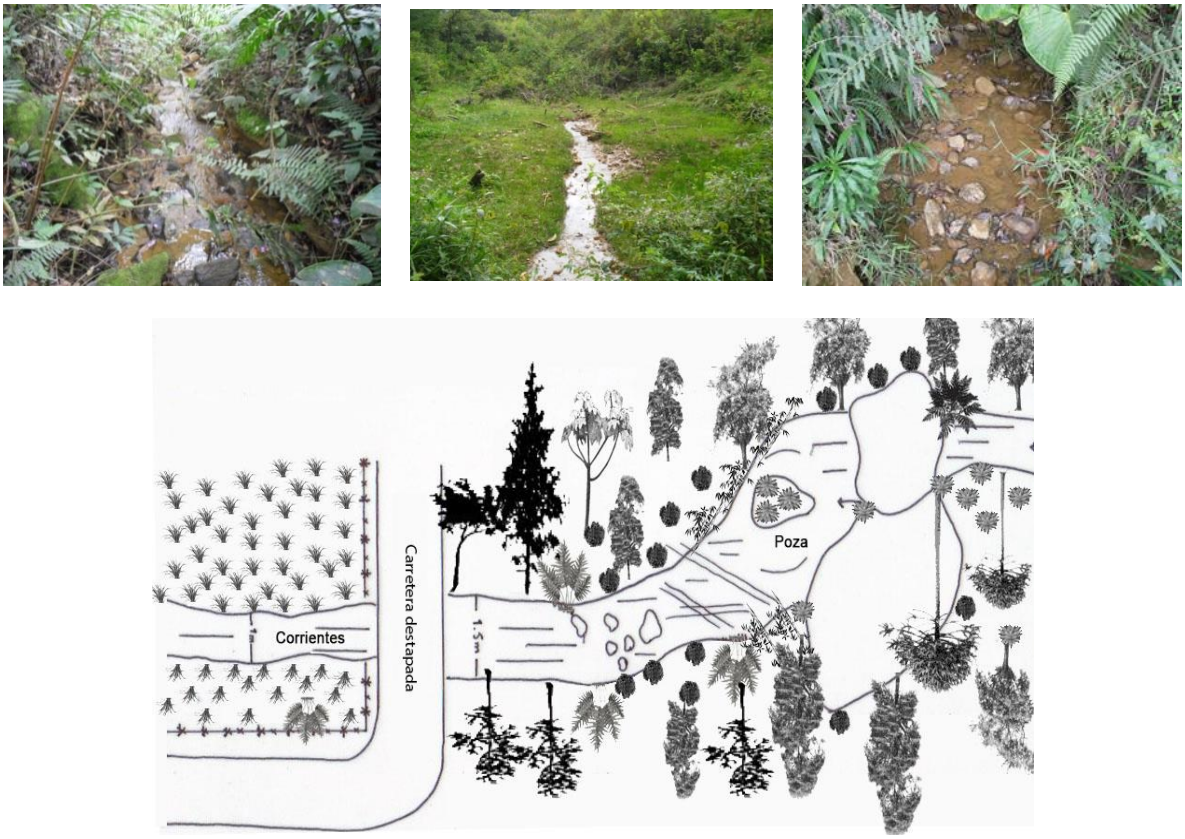



Figura 3-119 - Estación S4: Afluente 2 a la Salazar. Esquema del sitio de muestreo de acuerdo con el protocolo de Ausrivas para cuerpos de agua de alto gradiente

Durante la toma de muestras hidrobiológicas el tiempo fue seco pero el cielo estuvo nubado y con lluvias leves la noche anterior, el caudal en el punto de muestreo fue de 2,9 l/s.

### Estación S5: Quebrada La Escondida

Esta quebrada es un afluente de la quebrada La Salazar, es un sitio de difícil acceso. Ubicado en la carretera que conduce desde Santa Elena hacia Rionegro. A pesar de la presencia de un tanque y para la extracción de agua en la ribera derecha y una manguera de aproximadamente dos pulgadas, la zona en general es un bosque muy poco intervenido con una cobertura boscosa abundante principalmente compuesta por árboles nativos mayores a 10 m de altura, razón por la cual el acceso de luz a la quebrada es poco. La estación de muestreo es valle con pendientes en ángulo agudo.

El cauce mide aproximadamente 50 cm de ancho; tiene un flujo de agua bajo con un paso muy restringido para los peces, debido al material vegetal presente sobre el lecho, no se encuentran barras laterales de sedimento. El canal no tiene ninguna modificación, y tiene forma de U aplanada; la ribera izquierda presenta una pendiente escarpada mientras que la derecha tiene una pendiente moderada, el lecho es lodoso con zonas de corrientes y algunos rápidos aguas más arriba, es de aguas claras sin presencia de aceites ni de olores en el sedimento o en el agua.

Durante la toma de muestras hidrobiológicas el cielo estuvo parcialmente nubado, el caudal en el punto de muestreo fue de 1,8 l/s.

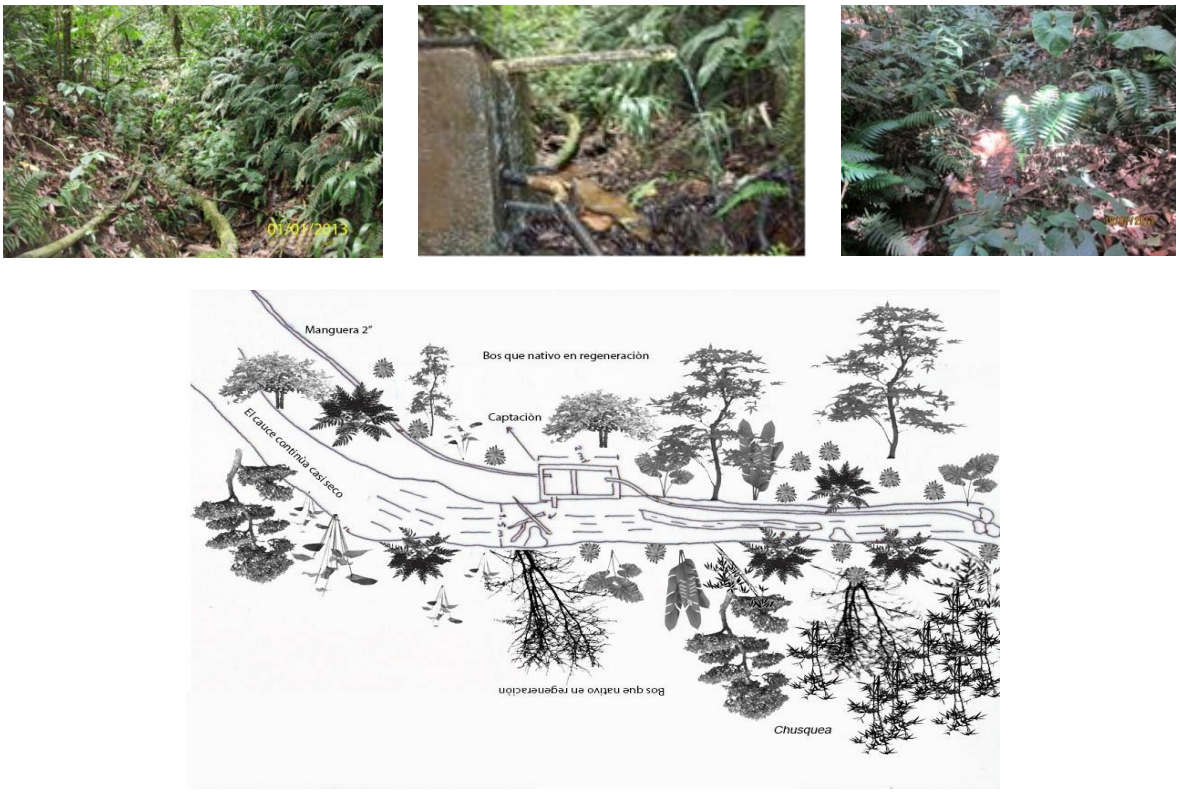



Figura 3-120 - Estación S5: Quebrada la Escondida. Esquema del sitio de muestreo de acuerdo con el protocolo de Ausrivas para cuerpos de agua de alto gradiente

### Estación S6: Quebrada La Salazar Aguas arriba

El punto de muestreo atraviesa un puente de la vía “La Catalana”. La vegetación ribereña se compone de pastos como Pennisetum clandestinum y Lolium multiflorum (kikuyo y ryegrass respectivamente) y rastrojo bajo. El valle es amplio con muy poca presencia de árboles principalmente Pino Ciprés y arbustos, los cuales se encuentran dispersos a lo largo de la ribera. La zona presenta una perturbación extrema con zonas de vegetación despejada a ambas márgenes.

El cauce es de aproximadamente 3 metro de ancho, el canal presenta forma de U aplanada sin ninguna modificación, con la ribera derecha cóncava de pendiente baja (10-30°) y con un pendiente vertical en algunos tramos de la ribera izquierda. Se observa un flujo base (Q=118,3 l/s) con un buen paso para los peces, a pesar de la presencia de algunas barras puntuales de grava, y arena. Se evidencian moderados procesos erosivos en las márgenes, el lecho cuya partícula dominante es el guijarro, y una matriz de sedimentación de estructura abierta, con presencia de piedras subangulares en promedio de 50 cm de diámetro algunas con briofitos adheridos. A lo largo del tramo de muestreo los micro habitas dominantes son los rápidos, seguidos por los rizos y algunas corrientes, aunque también se registran pozas de poca profundidad. Las condiciones de hábitat en el punto de muestreo son moderadamente buenas, por su estructura de lecho rocoso no hay abundante presencia de raíces entrelazadas y ni vegetación sumergida, que permita la

colonización completa pero sí ofrece un potencial para comunidades futuras. El agua ocupa más del 75 % del canal disponible y sus ondulaciones no incrementan la longitud de la quebrada en más de 2 veces. El agua se observa clara y al igual que el sedimento no presenta ni aceites ni olores extraños.

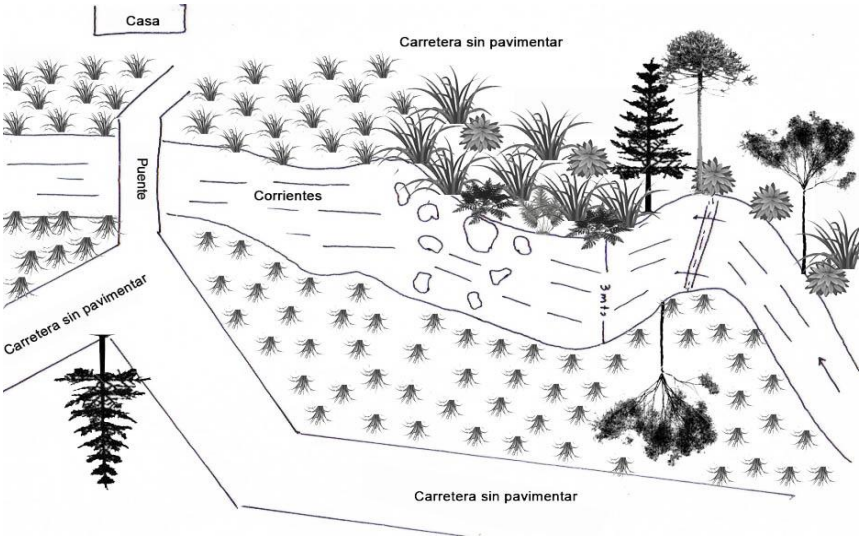



Figura 3-121 - Estación S6: Nombre: Quebrada La Salazar Aguas arriba. Esquema del sitio de muestreo de acuerdo con el protocolo de Ausrivas para cuerpos de agua de alto gradiente

### Estación S7: Quebrada "Las Faldas"

El punto queda ubicado en el predio que tiene su mismo nombre, el agua de la quebrada es captada para el uso doméstico y agrícola de la finca, donde se observan cultivos de aguacates y zonas de pastos limpios, sin embargo, el cuerpo de agua está en medio de un parche de bosque sin intervención lo que le confiere cierto grado de conservación.

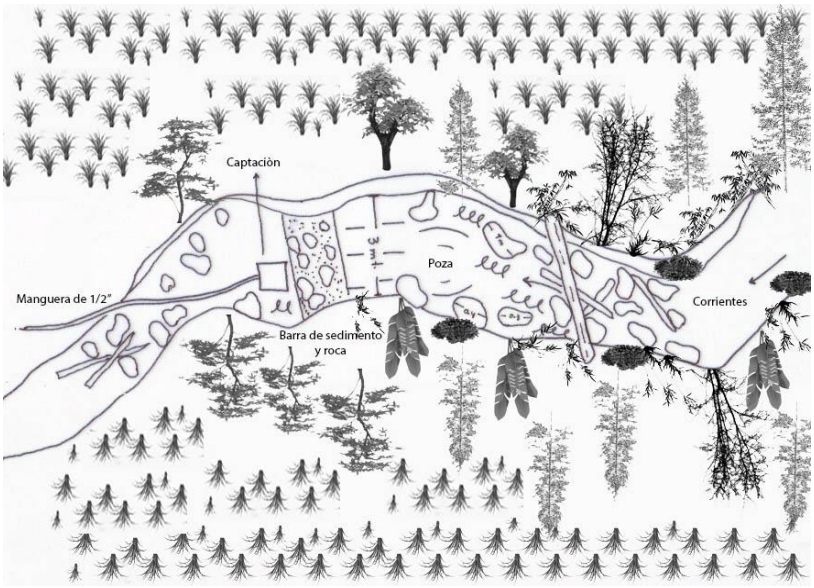



Figura 3-122 - Estación S7: Quebrada las Faldas. Esquema del sitio de muestreo de acuerdo con el protocolo de Ausrivas para cuerpos de agua de alto gradiente

El cauce mide 3 metros, con un canal en forma de caja ancha y con un paso muy restringido para el desplazamiento de los peces, ya que en el momento del muestreo se encontraba muy bajo el flujo de agua formando en si mayoría pozas y algunas corrientes pequeñas a lo largo del tramo. Hay gran cantidad de material vegetal suspendido sobre el canal. El lecho presenta una compactación estable y dominan sobre él piedras un poco más grandes que el guijarro. Las riberas son de forma cóncava con una pendiente escarpada, y erosiónada en algunas zonas a lo largo del sitio. El agua es clara sin aceites ni olores extraños el caudal en el sitio fue de 1,3 l/s.

### Estación S8: Quebrada Salazar – Portal Oriental

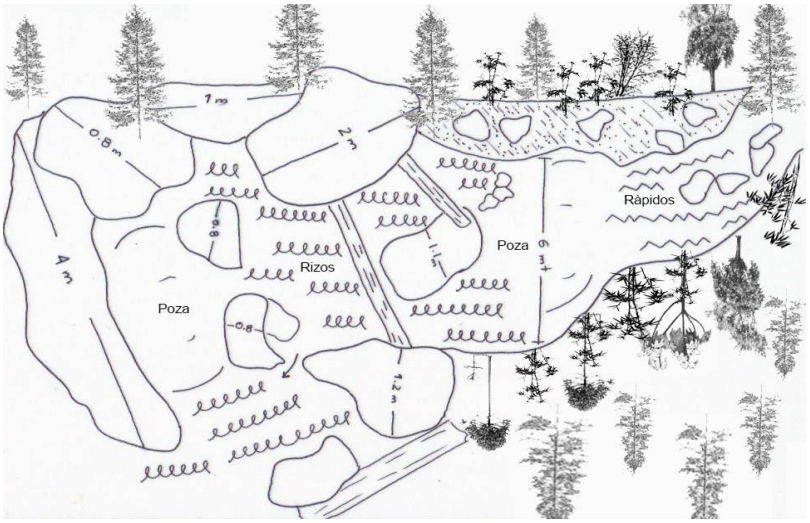



Figura 3-123 - Estación S8-Quebrada Salazar- Portal Oriental. Esquema del sitio de muestreo de acuerdo con el protocolo de Ausrivas para cuerpos de agua de alto gradiente

El sitio de muestreo se encuentra ubicado sobre la plazoleta del Portal Oriental, metros más arriba de la glorieta de Sajonia y dentro del área de influencia directa puntual. Debido a que el sitio se encuentra dentro de los predios de la Concesión Túnel Aburrá Oriente no hay intervención antrópica en el área ya que el acceso está restringido. La vegetación se encuentra en parches de bosque fragmentado en ambas riberas con una zona de vegetación despejada en la ribera derecha. Las especies dominante son la especies nativa *Meriania nobilis* (Amarraboyo), y *Pino Ciprés* y Eucalipto. A lo largo del sitio también hay gran cantidad de arbustos y helechos sobre las márgenes de la quebrada.

El cauce mide 6 metros en su parte más ancha con un flujo base, sin restricciones para el paso de los peces. Hay presencia de rocas de hasta 4 metros y troncos caídos a lo largo del sitio, sin embargo, éstos no obstruyen el canal, hay barras de sedimento y afloramientos de roca sobre la ribera izquierda. El lecho presenta una compactación moderada, se compone de rizos principalmente, aunque hay pozas de hasta 6 metros de ancho y 50 cm de profundidad, Ambas riberas tienen pendientes escarpadas de forma cóncava. Las márgenes presentan evidencias de erosión y desprendimiento que causan el desvío del cauce principal. El agua es levemente turbia debido al material suspendido, pero no presenta olores en el agua o sedimento. El caudal en el punto fue de 133,2 l/s.

### Estación S9: Afluente 1 a La Yarumal

La quebrada está ubicada sobre la vía de la doble calzada en la glorieta de Sajonia en dirección Rionegro, en la Finca La Castanesa dentro del área de influencia directa puntual. El sitio de muestreo presenta una perturbación extrema, debido al pastoreo que se evidencia en el área, a lo que se suma que la quebrada esta canalizada en la proximidad de la vía, para atravesar la carretera a través de un box coulvert. Las márgenes se ven afectadas por la vegetación despejada y el acceso de animales al punto de muestreo, aunque la separación de los límites del predio con cercas funciona como medida.

La vegetación ribereña está compuesta por pastos arbolados con una cobertura boscosa, compuesta principalmente por gramíneas ornamentales y algunos arbustos espaciados regularmente en la ribera derecha. También, se observan pinos, algunos parches de Poáceas (Guadua) y otros árboles de más de 10 metros de altura sobre la ribera izquierda.

El cauce tiene aproximadamente 50 cm de ancho, presenta pocas ondulaciones a lo largo del tramo de muestreo y un flujo bajo sin ninguna restricción para el paso de peces; tampoco se observan barras que obstruyan el cauce. El canal presenta forma de U aplanada con una pendiente baja (10°- 30°) en ambas riberas. Se observan afloramientos de arcilla sobre las márgenes, sin embargo, la partícula dominante en el lecho es el légamo con una compactación moderada y una matriz de sedimentación de estructura abierta sin presencia de piedras, guijarros ni grava. El lecho se compone en su totalidad por deslizaderos de poca corriente con un gradiente de 1° a 3° la cual proporciona un sustrato regular para la epifauna, no se presentan pozas grandes ni profundas sobre el lecho, las márgenes son moderadamente estables con pocas áreas de erosión. No se perciben olores ni en los sedimentos ni en el agua; se presenta una turbidez leve debido al material suspendido como material orgánico, fango y arcillas.

Durante la toma de muestras hidrobiológicas el cielo estuvo parcialmente nubado con algunas lluvias leves, el caudal en el punto 2,1l/s.

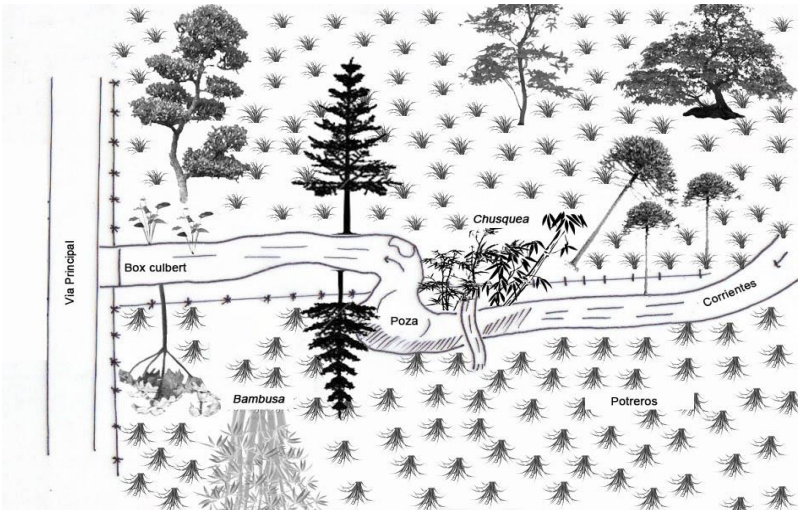



Figura 3-124 - Estación S9-Afluente 1 Yarumal. Esquema del sitio de muestreo de acuerdo con el protocolo de Ausrivas para cuerpos de agua de alto gradiente

### Estación S10: Confluencia Salazar-Yarumal

El sitio de muestreo está ubicado a un lado de la doble calzada dirección Medellín, justo después de la confluencia de la quebrada Salazar y La Yarumal haciendo parte del área de influencia directa puntual. Es atravesada por un puente de la carretera que va de Medellín a Rionegro. La vegetación ribereña la forman las gramíneas altas (Caña Brava), Pino Cipres de más de 10 metros de altura, helechos y otras especies exóticas como la Thumbergia alata (ojo de poeta) distribuidos continuamente a lo largo del tramo de muestreo. Aunque la Caña Brava se considera una gramínea nativa, las riberas se encuentran en un grado alto de perturbación, debido a los impactos que generan las construcciones aledañas al cuerpo de agua.

El ancho del cauce es de 5 a 7 m aproximadamente. Presenta un lecho rocoso, con paso moderadamente restringido, debido a las barras laterales sin vegetación en las cuales dominan partículas como la arena y la grava, ésta de aproximadamente 20 cm de diámetro. El canal tiene forma de U aplanada con la ribera izquierda cóncava en pendiente moderada (30-60°), y una pendiente escarpada ente 60 y 80° en la ribera derecha de forma convexa. Hacia el final de tramo de muestreo, hay un afluente aparentemente de aguas residuales provenientes de un predio aledaño.

El factor que presenta una mayor incidencia sobre la estabilidad de la ribera es el puente de la glorieta de Sajonia, y en la ribera derecha se observa una capa de roca como medida artificial de protección de la misma. No se observan aceites ni en el sedimento ni en el agua, sin embargo, se perciben olores producto de aguas residuales. El agua estaba turbia en el momento del muestreo debido al material suspendido sobre el lecho.

El lecho se compone principalmente de rápidos con presencia de corrientes en algunas zonas del punto de muestreo. Existe también un salto de 2 metros de alto al final del tramo. El sustrato presenta una condición regular para la colonización epifauna. No hay presencia de Pozas en el punto de muestreo debido a las fuertes deposiciones de material fino sobre el lecho.

Durante el muestreo el día estuvo parcialmente nubado sin presencia de lluvias .El agua presentó un caudal de 508,5 l/s.

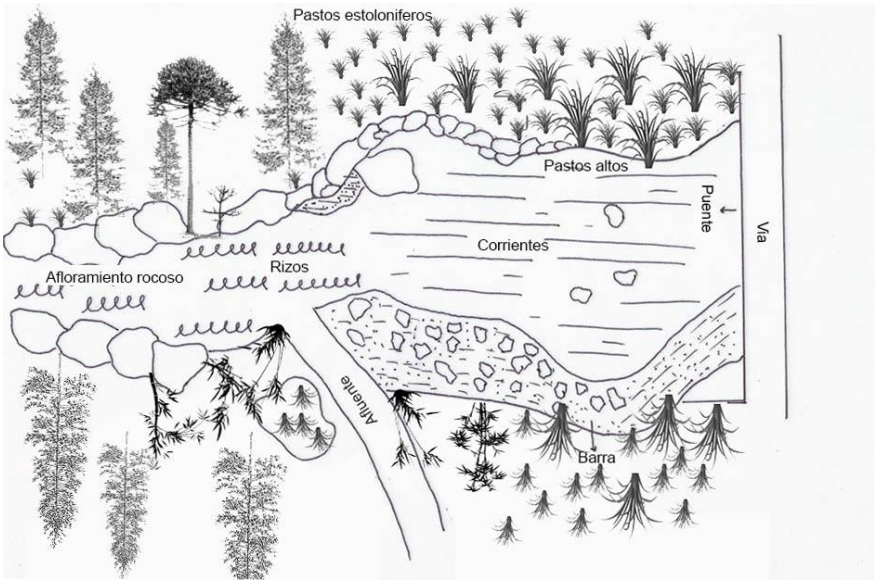



Figura 3-125 - Estación S10 Confluencia Yarumal Salazar. Esquema del sitio de muestreo de acuerdo con el protocolo de Ausrivas para cuerpos de agua de alto gradiente

### 3.2.5.2 Calidad del agua Área de Influencia directa Puntual

#### 3.2.5.2.1 Cuenca Yerbabuena – Portal Sur Túnel Seminario

La calidad fisicoquímica se midió en dos puntos de la cuenca ubicados en el Seminario Mayor Conciliar, debido a la posible afectación que pueda generar la construcción del Portal Sur del Túnel Seminario. Los resultados de las variables fisicoquímicas presentan en la siguiente tabla.

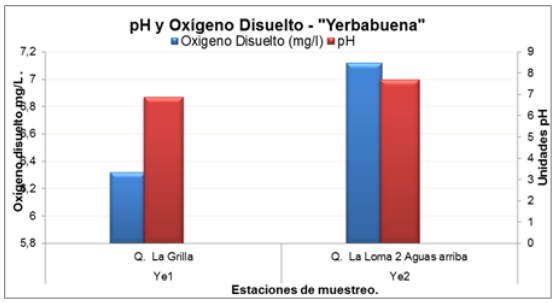
Tabla 3-75 - Análisis fisicoquímicos in situ y ex situ en las estaciones de la Cuenca Yerbabuena

| VARIABLES | Ye1 | Ye2 |
|---|---|---|
| | Q. La Grilla | Q. La Loma 2 aguas arriba |
| T agua(°C) | 18 | 19,5 |
| Oxígeno Disuelto (mg/l) | 6,32 | 7,12 |
| Saturación de Oxigeno (%) | 86,3 | 98,4 |
| Conductividad (µS/cm) | 138 | 275 |

| VARIABLES | Ye1 | Ye2 |
|---|---|---|
| | Q. La Grilla | Q. La Loma 2 aguas arriba |
| pH | 6,88 | 7,7 |
| Oxiqeno Disuelto (mg $O_2$/L) | 7,69 | 7,4 |
| DBO (mg/L) | 1,89 | 1,89 |
| DQO (mg $O_2$/L) | 2,46 | 5,50 |
| Turbiedad (N.T.U) | 10,20 | 26,90 |
| Alcalinidad Total (mg $CaCO_3$/L) | 85,50 | 119,50 |
| Acidez Total (mg $CaCO_3$/L) | 4,00 | 4,00 |
| Amonio (mg $NH^{4+}$/l) | 0,06 | 0,06 |
| Nitritos (mg $NO^{2-}$/L) | 0,05 | 0,05 |
| Nitratos (mg $NO^{3-}$/L) | 0,466 | 1,178 |
| Fósforo Total (mg P/L) | 0,073 | 0,065 |
| Potasio (mg $K^+$/L) | 0,9 | 0,9 |
| HierroTotal (mg Fe/L) | 0,43 | 1,26 |
| Sólidos Totales (mg ST/L) | 145,00 | 234,00 |
| Sólidos DisueltosTotales (mg SDT/L) | 134,00 | 198,00 |
| Sólidos Suspendidos Tótales (mg SST/L) | 12,00 | 35,00 |
| Sólidos Sedimentables (mg/L) | 0,00 | 0,10 |
| Sulfatos (mg $SO4^{-2}$ /L) | 3,05 | 4,92 |
| Cloruros (mg $Cl^-$/L) | 2,12 | 4,94 |
| Grasasv/o Aceites(mg Grasas y Aceites/L) | 12,00 | 9,32 |
| Fenoles (mg $C_6H_6$/L) | 0,003 | 0,001 |
| Detergentes (mg SAAM/L) | 0,05 | 0,05 |
| Dureza Calcica (mg $CaCO_3$/L) | 34,73 | 72,66 |
| Dureza Magnésica (mg $CaCO_3$//L) | 51,27 | 47,75 |
| Cobre (mg Cu/L) | 0,02 | 0,02 |
| Cadmio (mg Cd/L) | 0,003 | 0,003 |
| Plomo (mg Pb/L) | 0,010 | 0,010 |
| Zinc (mg Zn/L) | 0,020 | 0,020 |
| Cromo Total (mg Cr/L) | 0,05 | 0,05 |
| Cromo Hexavalente (mg Cr(VI)/L) | 0,05 | 0,05 |
| Coliformes Totales (NMP/100 ml) | 24200 | 17330 |
| Coliformes Fecales (NMP/100 ml) | 3650 | 1400 |

Fuente: Consorcio Siga-Plyma

La estación que mayor temperatura registró fue Ye2. Con respecto al ph y al oxígeno disuelto está dentro del rango apropiado para mantener la vida silvestre, sin embargo, la estación Ye1 fue ligeramente ácido.



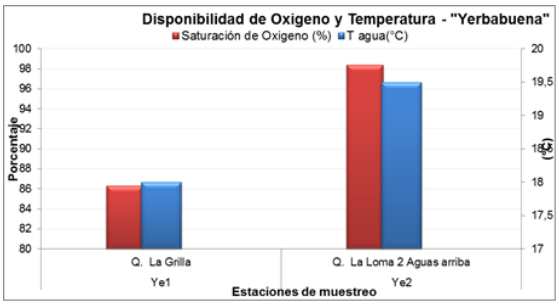




Figura 3-126 - Temperatura, pH, oxígeno y saturación de

oxígeno en la Cuenca Yerbabuena

La mayor concentración de sólidos totales es Ye2 y se encuentran por encima del límite máximo promedio de los ríos neotropicales (<120 mg/L). Los sólidos totales están representados en su mayoría por sólidos disueltos totales, que son altos en ambas estaciones y siguen la misma tendencia de los sólidos totales. Los sólidos suspendidos son bajos en la estación Ye1, pues no supera los 25mg/L propio de quebradas normales en cuencas altas, mientras que Ye2 muestra concentraciones propias de corrientes con ligera contaminación. La estación Ye2 presenta valores por encima del límite permitido tanto en conductividad donde el límite es de 200µS/cm, con un valor de 275µS/cm y la turbiedad con un valor de 26,9NTU. La Dureza Cálcica revela que Ye1 se clasifica como un agua blanda mientras que Ye2 alcanza concentraciones 62,6 mg/L lo que corresponde a las aguas moderadamente duras. Los valores de dureza Magnésica (mg CaCO3/L) arrojan que la estación Ye2 corresponde a aguas duras muy productivas.

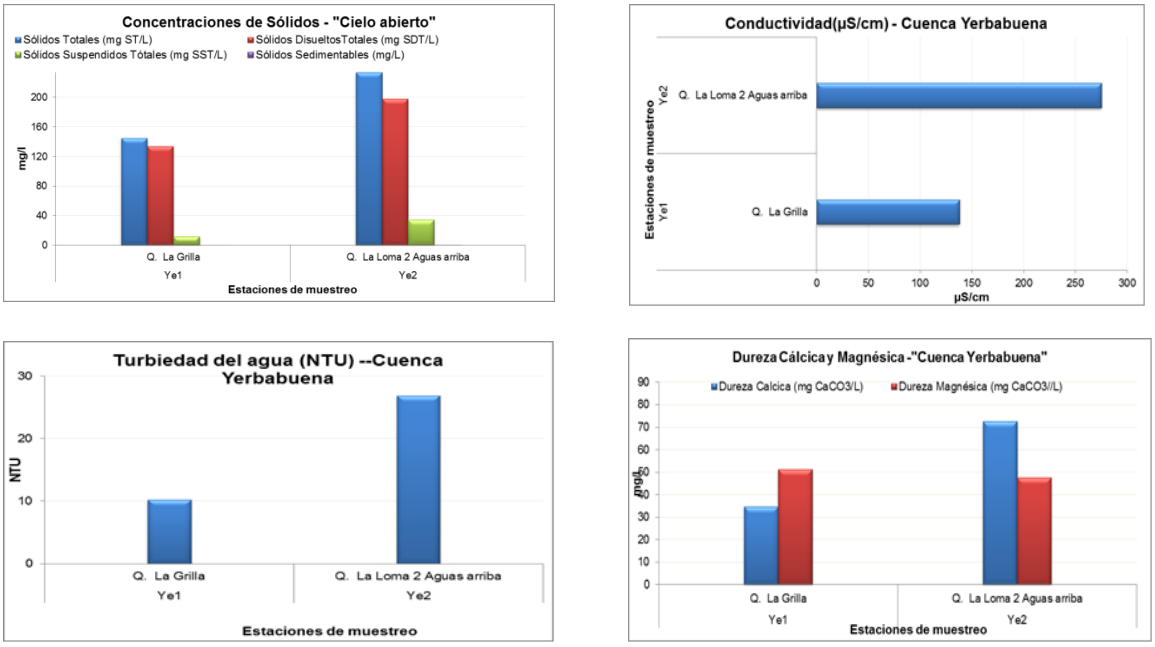



Figura 3-127 - Concentración de Solidos, Conductividad, Turbiedad y Dureza Cuenca Yerbabuena

En relación a los nutrientes, el Fósforo Total (mg P/L), en la estacion Ye2 no es posible saber si el parámetro está por encima de 0,03mg/L que es el límite superior para los diferentes usos del agua, porque el análisis está en el límite de detección del método que es de <0,065mg/L. Por otra parte, la estacion Ye1 presenta concentraciones altas, ambas estaciones indican contaminación fecal, probablemente la fuente debe recibir aguas de escorrentía provenientes de potreros, explotaciones pecuarias o aguas residuales domésticas, y en la región se utilizan fertilizantes y abonos en cultivos y potreros. Los Detergentes (mg SAAM/L), se presentan en todas las estaciones concentraciones por debajo de 0,5 mg/l que es el límite para diferentes usos del agua y por debajo de 0,143 mg/L que es el límite para la conservación de la vida acuática.

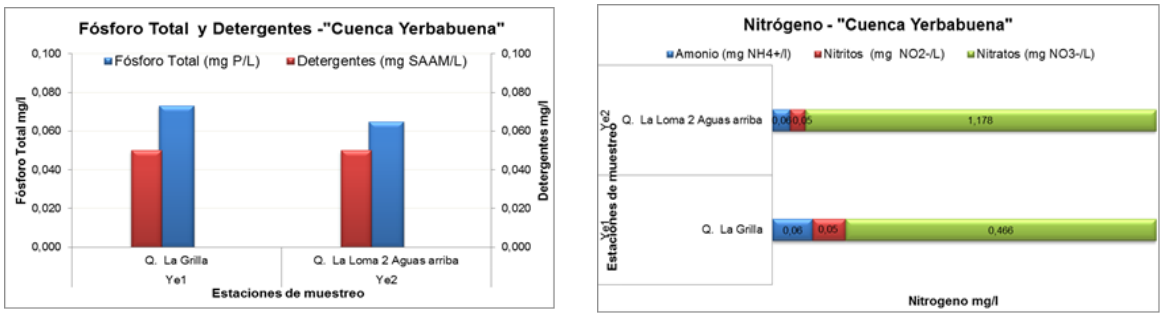



Figura 3-128 - Fosforo total, Detergentes y Nitrógeno (NH4+, NO2- y NO3-) Cuenca Yerbabuena

La concentración de hierro supera el límite de 0,3 mg/l para la recreación, contacto y consumo, adicional a eso en la estación Ye2 (1,26mg/l) se supera la concentración ideal para la conservación de la vida acuática. Las otras sustancias disueltas en el agua y metales pesados no superaron el límite de detección del método, lo que significa que no hay contaminantes provenientes de la industria o actividades agropecuarias.

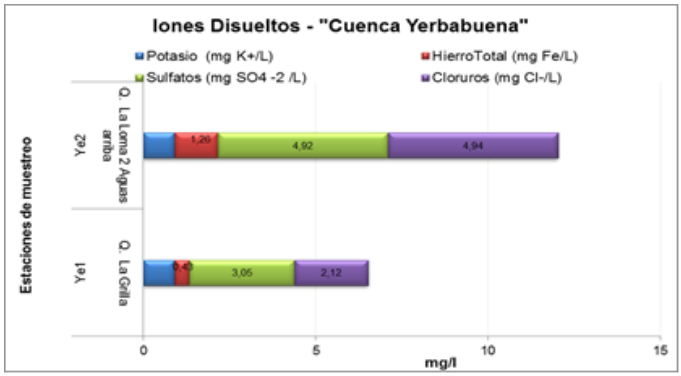



Figura 3-129 - Iones disueltos Cuenca Yerbabuena.

La DQO presenta concentraciones <2,46 mgO2/L que es el límite de detección del método de análisis utilizado. La DBO5, con excepción de la estación CA10 (4,0 mgO2/L) presentó demandas de oxígeno por debajo del límite de detección. La relación DBO/DQO<0,2, lo que hace suponer que estas estaciones reciben escorrentías y/o vertidos inorgánicos, imposible de depurar de forma biológica. Ambas estaciones tienen más de 5000 NMP/100 de coliformes totales por lo que presentan restricciones para uso agrícola y contacto secundario.

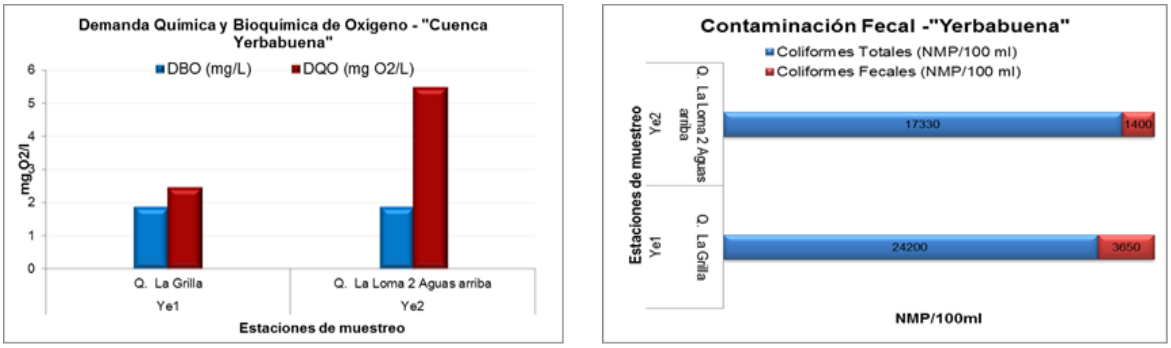


Figura 3-130 - DBO5, DQO y Coliformes totales y fecales Cuenca Yerbabuena

### Índice de calidad del agua de las quebradas del tramo de la vía a Cielo abierto

El ICAfa indica que las estaciones tienen agua de buena calidad. En la estación Ye2 Q. La Loma 2 Aguas arriba, tiene valores de conductividad sobre los 200uS/cm, la contaminación fecal, es más alta en la estación Ye1 Q. La Grilla.

Tabla 3-76 - Calidad del agua en las estaciones de la Cuenca Yerbabuena

| No. Estación | Ye1 | Ye2 |
|---|---|---|
| | Q. La grilla | Q. La loma 2 aguas arriba |
| Ph (unidades ph) | 6,88 | 7,7 |
| DQO ( mg/l o2) | 2,46 | 5,5 |
| DBO5 (mg/l) | 1,89 | 1,89 |
| Sólidos suspendidos totales(sst) | 12 | 35 |
| Fosforo tot (mg/l-p) | 0,073 | 0,065 |
| Conductividad ((usiemens/cm) | 138 | 275 |
| % saturacion oxigeno | 86,3 | 98,4 |
| E coli (ufc/100 ml) | 3650 | 1400 |
| Iph | 0,941 | 1 |
| LDQO | 1 | 1 |
| LDBO5 | 1 | 1 |
| LSST | 0,984 | 0,915 |
| Icond | 0,595 | 0, 20 |
| I%sat | 0,863 | 0,984 |
| I Ecoli | 1 | 1 |
| I fosforo total (po4) | 0,5 | 0,5 |
| ICA fa | 0,87 | 0,84 |
| Descriptor / color | Buena | Buena |

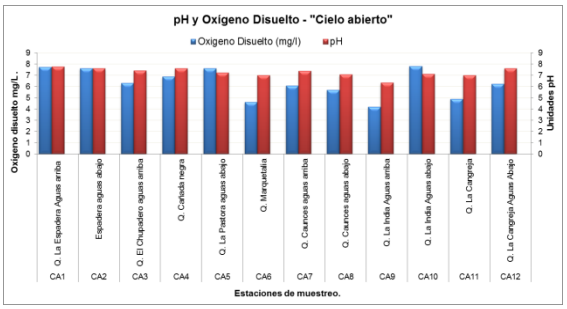
Fuente: Consorcio Siga-Plyma

#### 3.2.5.2.2 Cuenca de la Quebrada Santa Elena en el tramo "Cielo Abierto"

Las estaciones analizadas en el tramo de la de vía Cielo Abierto incluye los cuerpos de agua identificados en todo el recorrido de la vía y el Portal Norte del Túnel Seminario, en esta última se incluyen la quebrada La Cangreja, aguas arriba y abajo del eje del proyecto Conexión Vial Aburrá Oriente (CA11 y CA12 respectivamente). Los resultados de las variables fisicoquímicas de las estaciones de las quebradas del tramo de la vía a Cielo abierto, cuenca media de la Q. Santa Elena, se presentan en la Tabla 3-77.

La temperatura del agua de este tramo tiene un rango amplio entre 15 ºC y 19,5ºC, ya que las estaciones se distribuyen entre 2.043 y los 1.793 msnm. La estación más fría es CA3. El oxígeno disuelto sobrepasa los 6,2 mg/L en la mayoría de las estaciones, que es una buena concentración para sostener la vida silvestre, pero su concentración es baja en CA8 con 5,69 mg/L y es crítica en CA6 con 4,62mg/L, tal vez por tener poca agua, CA9 con 4,19mg/L y CA11 con 4,9mg/L, lo cual indica deterioro de la calidad del agua. El pH, está dentro del rango 6,2-9 unid apropiado para sostener vida silvestre, potabilizar el agua y para uso agrícola y pecuario; es ligeramente básico en todas las estaciones, excepto en las estaciones CA9, CA11. La saturación de oxígeno, con excepción de CA10 (62,7%) y CA11 (66,1%(), en las demás estaciones es alta; CA1, CA2 y CA5

mostraron sobresaturación y saturaciones mayores de 75,5%, lo cual indica que en estas estaciones hay buena disponibilidad de oxígeno para los organismos acuáticos y para oxidar la materia orgánica.



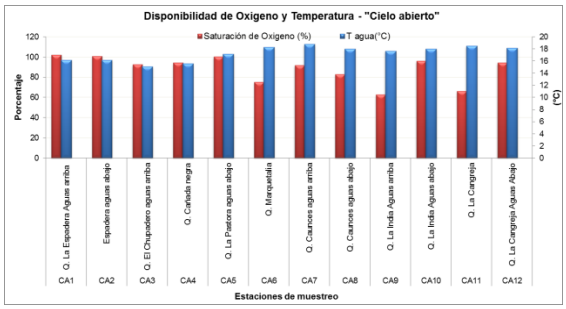




Figura 3-131 - Temperatura, pH, oxígeno y saturación de oxígeno en las estaciones de las quebradas del tramo “Cielo abierto”, cuenca media de la Q. Santa Elena

Tabla 3-77 - Análisis fisicoquímicos in situ y ex situ en las estaciones del área de las quebradas del tramo "Cielo abierto", cuenca media de la Q. Santa Elena

| Estación | CA1 | CA2 | CA3 | CA4 | CA5 | CA6 | CA7 | CA8 | CA10 | CA11 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Variable | Q. La Espadera Aguas arriba | Espadera aguas abajo | Q. El Chupadero aguas arriba | Q. Cañada negra | Q. La Pastora aguas abajo | Q. Marquetalia | Q. Caunces aguas arriba | Q. Caunces aguas abajo | Q. La India Aguas abajo | Q. La Cangreja |
| Coordenada X | 839952 | 839985 | 838990 | 838833 | 838339 | 837719 | 837760 | 837732 | 837135 | 836853 |
| Coordenada Y | 1180335 | 1180517 | 1179942 | 1180103 | 1180171 | 1179815 | 1180080 | 1180336 | 1180634 | 1180552 |
| Coordenada Z | 1946 | 1909 | 2043 | 1979 | 1911 | 2004 | 1916 | 1846 | 1804 | 1820 |
| T agua(°C) | 16,2 | 16,2 | 15,1 | 15,6 | 17,2 | 18,3 | 18,8 | 18 | 18 | 18,50 |
| Oxigeno Disuelto (mg/l) | 7,75 | 7,62 | 6,3 | 6,9 | 7,63 | 4,62 | 6,08 | 5,69 | 7,8 | 4,90 |
| Saturación de Oxigeno (%) | 102,3 | 101,1 | 92,7 | 94,3 | 100,6 | 75,4 | 92,1 | 83,1 | 96,1 | 66,1 |
| Conductividad (µS/cm) | 164 | 189 | 149 | 157 | 281 | 113 | 131 | 175 | 202 | 232 |
| pH | 7,78 | 7,61 | 7,42 | 7,6 | 7,24 | 7 | 7,37 | 7,07 | 7,1 | 6,99 |
| Oxiqeno Disuelto (mg $O_2$/L) | 6,88 | 6,87 | 7,32 | 7,44 | 8,7 | 7,17 | 7,21 | 7,24 | 5,22 | 6,69 |
| DBO (mg/L) | 1,89 | 1,89 | 1,89 | 1,89 | 1,86 | 1,89 | 1,89 | 1,89 | 4,00 | 1,89 |
| DQO (mg $O_2$/L) | 2,46 | 2,46 | 2,46 | 2,46 | 2,46 | 2,46 | 9,00 | 2,46 | 17,00 | 2,46 |
| Turbiedad (N.T.U) | 0,93 | 0,67 | 5,29 | 3,62 | 2,37 | 12,30 | 39,70 | 3,34 | 8,29 | 7,84 |
| Alcalinidad Total (mg $CaCO_3$/L) | 62,00 | 59,50 | 63,50 | 88,00 | 98,50 | 59,00 | 62,50 | 82,00 | 40,00 | 107,50 |
| Acidez Total (mg $CaCO_3$/L) | 2,00 | 3,00 | 7,00 | 7,00 | 5,00 | 2,00 | 6,00 | 3,00 | 3,00 | 6,00 |
| Amonio (mg $NH^{4+}$/l) | 0,06 | 0,06 | 0,06 | 0,06 | 0,06 | 0,06 | 0,06 | 0,06 | 0,47 | 0,06 |
| Nitritos (mg $NO^{2-}$/L) | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 |
| Nitratos (mg $NO^{3-}$/L) | 3,971 | 3,798 | 7,336 | 0,697 | 1,620 | 0,954 | 0,990 | 0,250 | 0,250 | 0,250 |
| Fósforo Total (mg P/L) | 4,281 | 0,065 | 1,364 | 3,364 | 1,312 | 0,189 | 2,802 | 4,208 | 0,171 | 0,745 |
| Potasio (mg $K^+$/L) | 1,9 | 2,0 | 0,9 | 0,9 | 1,2 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 1,2 | 0,9 |
| HierroTotal (mg Fe/L) | 0,31 | 0,08 | 1,26 | 0,40 | 0,19 | 0,19 | 3,90 | 0,33 | 0,74 | 0,85 |
| Sólidos Totales (mg ST/L) | 100,00 | 102,00 | 110,00 | 143,00 | 169,00 | 138,00 | 172,00 | 132,00 | 163,00 | 169,00 |
| Sólidos DisueltosTotales (mg SDT/L) | 93,00 | 101,00 | 91,00 | 135,00 | 159,00 | 113,00 | 95,00 | 129,00 | 143,00 | 147,00 |
| Sólidos Suspendidos Tótales (mg SST/L) | 6,60 | 4,23 | 19,00 | 8,10 | 8,60 | 25,00 | 78,00 | 4,23 | 21,00 | 21,00 |

| Estación | CA1 | CA2 | CA3 | CA4 | CA5 | CA6 | CA7 | CA8 | CA10 | CA11 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Variable | Q. La Espadera Aguas arriba | Espadera aguas abajo | Q. El Chupadero aguas arriba | Q. Cañada negra | Q. La Pastora aguas abajo | Q. Marquetalia | Q. Caunces aguas arriba | Q. Caunces aguas abajo | Q. La India Aguas abajo | Q. La Cangreja |
| Sólidos Sedimentables (mg/L) | 0,00 | 0,00 | 0,10 | 0,00 | 0,00 | 0,20 | 0,30 | 0,00 | 0,20 | 0,10 |
| Sulfatos (mg $SO4^{-2}$ /L) | 5,03 | 6,69 | 3,61 | 6,46 | 12,83 | 1,65 | 2,23 | 3,78 | 34,65 | 2,51 |
| Cloruros (mg $Cl^-$/L) | 4,54 | 7,41 | 1,92 | 10,84 | 14,57 | 1,30 | 1,25 | 1,84 | 6,39 | 2,64 |
| Grasasv/o Aceites(mg Grasas y Aceites/L) | 12,00 | 9,32 | 13,00 | 10,00 | 13,00 | 11,00 | 9,32 | 9,90 | 9,32 | 24,00 |
| Fenoles (mg $C_6H_6$/L) | 0,001 | 0,001 | 0,009 | 0,008 | 0,012 | 0,007 | 0,002 | 0,020 | 0,009 | 0,004 |
| Detergentes (mg SAAM/L) | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,11 | 0,11 | 0,07 | 0,05 | 0,05 | 6,06 | 0,05 |
| Dureza Calcica (mg $CaCO_3$/L) | 7,28 | 85,86 | 3,35 | 3,38 | 29,14 | 8,08 | 13,38 | 20,08 | 21,82 | 61,53 |
| Dureza Magnésica (mg $CaCO_3$//L) | 59,96 | 59,32 | 68,65 | 90,06 | 72,65 | 50,12 | 44,38 | 54,29 | 11,59 | 39,12 |
| Cobre (mg Cu/L) | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,02 |
| Cadmio (mg Cd/L) | 0,003 | 0,003 | 0,003 | 0,003 | 0,003 | 0,003 | 0,003 | 0,003 | 0,003 | 0,003 |
| Plomo (mg Pb/L) | 0,010 | 0,010 | 0,010 | 0,010 | 0,010 | 0,010 | 0,010 | 0,010 | 0,010 | 0,010 |
| Zinc (mg Zn/L) | 0,020 | 0,020 | 0,151 | 0,898 | 0,020 | 0,020 | 0,020 | 0,020 | 0,033 | 0,020 |
| Cromo Total (mg Cr/L) | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 |
| Cromo Hexavalente (mg Cr(VI)/L) | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 |
| Coliformes Totales (NMP/100 ml) | 3040 | 11200 | 1310 | 6500 | 3280 | 4880 | 19860 | 11200 | 120300 | 120300 |
| Coliformes Fecales (NMP/100 ml) | 330 | 350 | 10 | 500 | 20 | 10 | 310 | 10 | 4000 | 2200 |

Fuente: Consorcio Siga-Plyma

Los sólidos totales en todas las estaciones están por encima de 100 mg/L; algunas estaciones están por encima del límite máximo promedio de los ríos neotropicales (<120 mg/L), como CA4, CA5, CA6, CA7, CA8, CA10, CA11, CA13 y CA14, cuyos sólidos totales están en un rango de 1,32 a 234 mg/L, la de mayor concentración de sólidos totales es CA14. Los sólidos totales están representados en su mayoría por sólidos disueltos totales, que son altos en todas las estaciones y siguen la misma tendencia de los sólidos totales. Los sólidos suspendidos son bajos en la mayoría de las estaciones, pues no superan los 25mg/L propio de quebradas normales en cuencas altas, con excepción de CA7 y CA14 que muestran concentraciones propias de corrientes con ligera contaminación. En la mayoría de las estaciones no se encontraron sólidos sedimentables y en las otras sus concentraciones fueron mínimas.

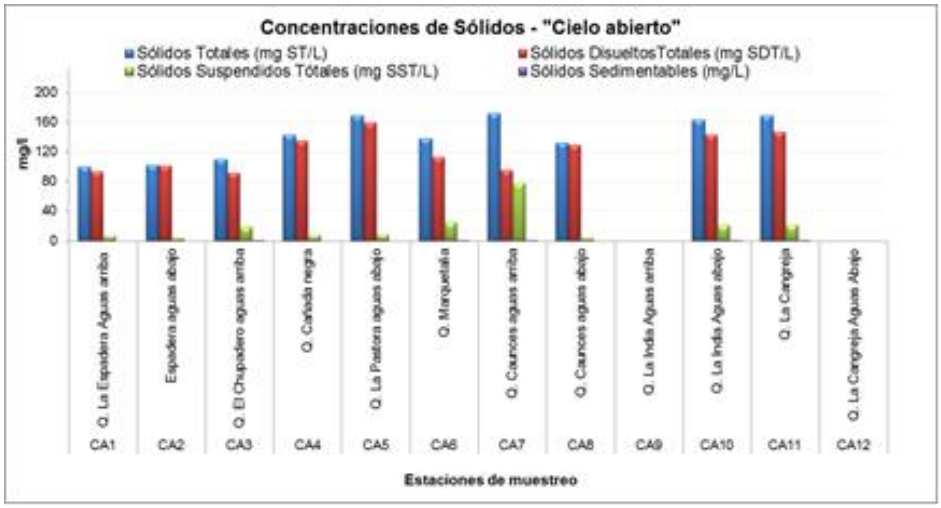



Figura 3-132 - Sólidos totales, suspendidos, disueltos y sedimentarios en las estaciones de las quebradas del tramo "Cielo abierto", cuenca media de la Q. Santa Elena

La conductividad eléctrica en la mayoría de las estaciones está dentro de un rango de 113 a 200µS/cm, rango promedio de ríos neotropicales, entre 10 y 200 µS/cm; pero en CA10, CA11 y CA12.

La turbiedad en todas las estaciones está por debajo de 10 NTU, excepto en CA6 y CA7.

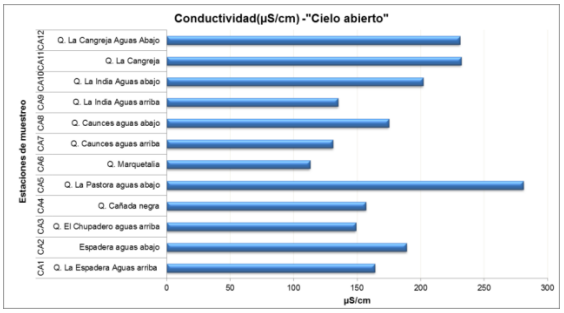



Figura 3-133 - Conductividad en las estaciones de las quebradas del tramo "Cielo abierto", cuenca media de la Q. Santa Elena

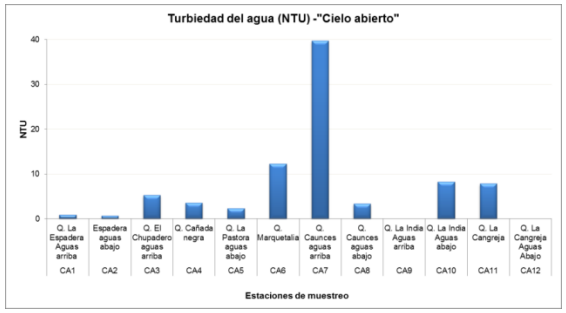



Figura 3-134 - Turbiedad en las estaciones de las quebradas del tramo "Cielo abierto", cuenca media de la Q. Santa Elena

La Dureza Cálcica (mg $CaCO_3$/L) en la estación CA11 Quebrada La Cangreja alcanza una concentración 61,5 que corresponden aguas blandas productivas, por el contrario CA2 Quebrada La Espadera Aguas Abajo presenta una concentración de 85,9 mg/L que corresponde a aguas muy productivas, eutróficas y duras. CA5 Quebrada. La Pastora Aguas Abajo con dureza cálcica de 29,1 siguen siendo blandas pero productivas, las demás estaciones son blandas y poco productivas. En cuanto a la Dureza Magnésica (mg $CaCO_3$/L) todas las estaciones, exceptuando CA10 Quebrada La India Aguas Abajo, tienen concentraciones entre 39,1 - 90,0 mg/L, mayores de 30 mg /L que es el óptimo, pero sin alcanzar concentraciones peligrosas para la salud humana (laxantes). En cuanto a la dureza total, la estación CA2 Quebrada La Espadera Aguas Abajo presenta concentraciones mayores de 100 mg/l que corresponden a aguas duras, muy productivas, por el contrario CA10 Quebrada La India Aguas Abajo presenta dureza total de 33,4 correspondiente a aguas blandas, la dureza total de las demás estaciones está en un rango de 57,7 - 101,0 mg/L que corresponde a aguas medianamente duras.

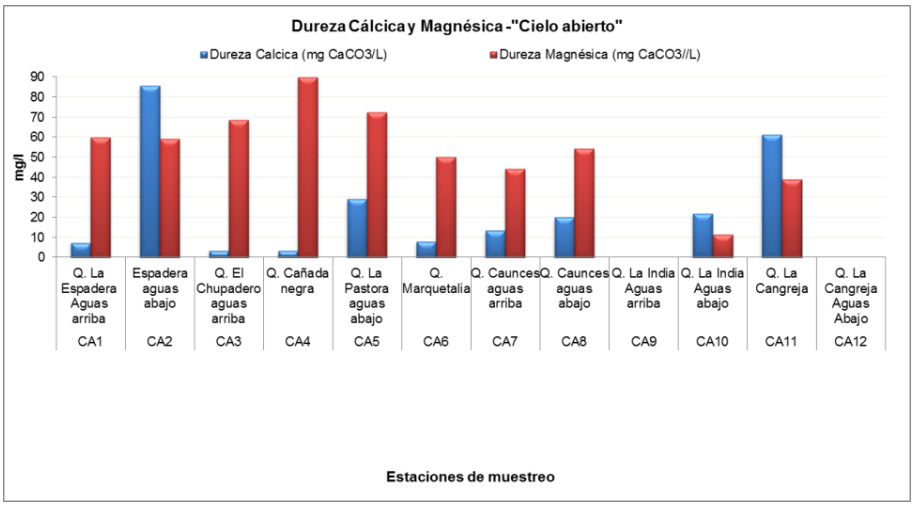



Figura 3-135 - Dureza cálcica y magnésica en las estaciones de las quebradas del tramo “Cielo abierto”, cuenca media de la Q. Santa Elena

La Alcalinidad Total (mg CaCO3/L) en las estaciones del tramo "Cielo Abierto", con excepción de CA6 Quebrada Marquetalia y CA10 Quebrada La India Aguas Abajo tienen concentraciones más altas que el promedio de corrientes de sistemas montañosos, cuyo rango está entre 10-60 mg/L, es decir, que son aguas muy productivas, especialmente en la estación CA11 Quebrada La Cangreja, donde la alcalinidad es mayor de 100 mg/L. La alcalinidad de las estaciones de este tramo, por sus valores de PH entre 6,68 y 7,6 unid, corresponde principalmente a bicarbonatos. La acidez total es baja, entre 2-7 mg/L, que por ser sistema de aguas naturales con el rango de pH de estas quebradas se asume que la acidez se debe casi exclusivamente al $CO_2$, es decir, que la acidez es carbonácea y no mineral.

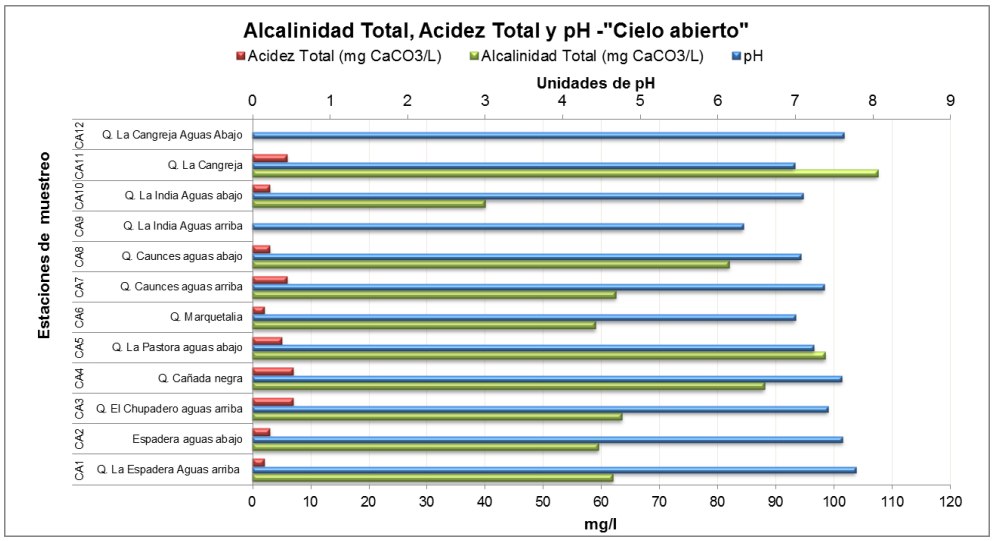



Figura 3-136 - Alcalinidad Total y Acidez Total en las estaciones de las quebradas del tramo “Cielo abierto”, cuenca media de la Q. Santa Elena.

En relación a los nutrientes, el Fósforo Total (mg P/L), en las estaciones CA2 Quebrada La Espadera Aguas Abajo y CA14 no es posible saber si el parámetro está por encima de 0,03mg/L que es el límite superior para los diferentes usos del agua, porque el análisis está en el límite de detección del método que es de <0,065mg/L. Por otra parte, las demás estaciones en esta quebrada presentan concentraciones altas, CA6 Quebrada Marquetalia, CA10 Quebrada La India Aguas Abajo, CA11 Quebrada La Cangreja y cuyas concentraciones de fósforo total están entre 0,073 - 0,745mg/L se consideran eutróficas, mientras que CA1 Quebrada La Espadera Aguas Arriba, CA3 Quebrada El Chupadero Aguas Arriba, CA4 Quebrada Cañada Negra, CA5 Quebrada. La Pastora Aguas Abajo, CA6 Quebrada Marquetalia, CA7 Quebrada Caunces Aguas Arriba y CA8 Quebrada Caunces Aguas Abajo cuyas concentraciones de fósforo total están dentro del rango 1,312 - 4,281 mg/L, son mayores de 1,0mg/L que es el límite inferior para la hipereutrófica. Todas las estaciones presentan contaminación fecal por lo que sus aguas deben recibir aguas de escorrentía de potreros o explotaciones pecuarias o aguas residuales domésticas y en la región se utilizan fertilizantes y abonos en cultivos y potreros. Los Detergentes (mg SAAM/L), se presentan en todas las estaciones concentraciones por debajo de 0,5 mg/l que es el límite para diferentes usos del agua y por debajo de 0,143 mg/L que es el límite para la conservación de la vida acuática, excepto en CA10 Quebrada La India Aguas Abajo que presenta una concentración muy alta, 6,0mg/L; en el momento del muestreo esta estación presentó presencia de espumas y aguas residuales.

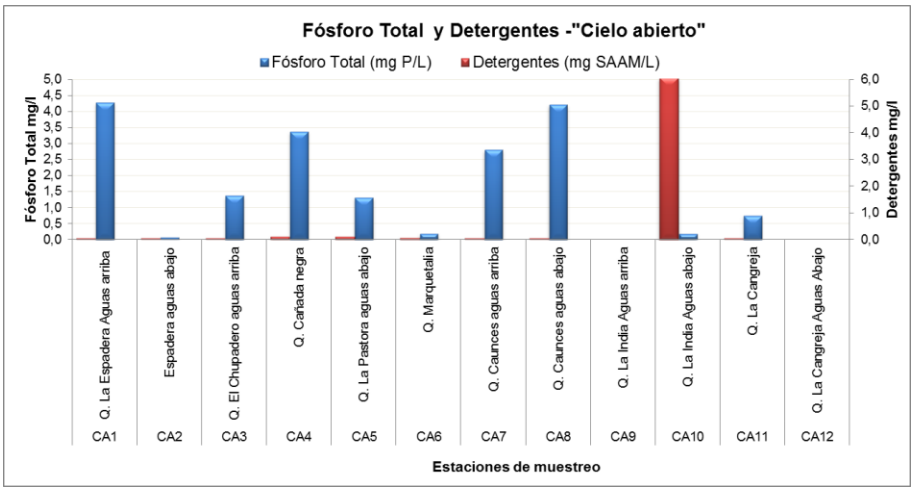



Figura 3-137- Detergentes y fósforo total en las estaciones de las quebradas del tramo "Cielo abierto", cuenca media de la Q. Santa Elena.

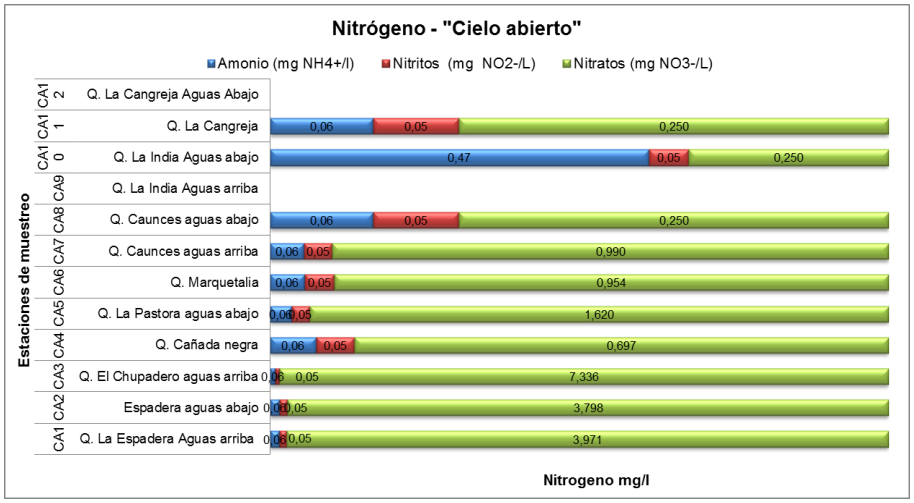



Figura 3-138 - Nitrógeno (Nitratos, nitritos y N-amoniacal) en las estaciones de las quebradas del tramo "Cielo abierto", cuenca media de la Q. Santa Elena.

En relación con los iones disueltos en el agua, se observa que el potasio (mgK+/L) en todas las estaciones tiene concentraciones menores de 10 mg/L que es lo esperado para aguas naturales superficiales. La presencia de hierro es un problema de calidad del agua muy común en esta región donde los suelos son ricos en este elemento. El agua aún con una pequeña cantidad de hierro puede tornarse rojiza por su exposición al aire y especialmente cuando su pH está por encima de 7,5 unid. Aunque no es tóxico, la coloración y el sabor se transforman en problema cuando la concentración es mayor que 0,3 mg/L. Exceptuando las estaciones CA1 Quebrada La Espadera Aguas Arriba, CA2 Quebrada La Espadera Aguas Abajo, CA4 Quebrada Cañada Negra, CA5 Quebrada. La Pastora Aguas Abajo y CA6 Quebrada Marquetalia, en las demás estaciones se supera el límite de 0,3 mg/L que es el límite para recreación, contacto y consumo, sólo en CA3 Quebrada El Chupadero Aguas Arriba (1,26 mg/L) y CA7 Quebrada Caunces Aguas Arriba (3,9 mg/L) se supera la concentración de 1,0 mg/L que es ideal para la conservación de la vida acuática. Los sulfatos (mg SO4-/L) tienen concentraciones muy bajas en todas las estaciones, entre 2,2 -

34,65 mg/L, cuando el límite para aguas naturales, recreación y para potabilizar está en 250 mg/L; se destacan las estaciones CA5 Quebrada. La Pastora Aguas Abajo (12,83 mg/L) y CA10 Quebrada La India Aguas Abajo (34,65 mg/L) por tener las concentraciones más altas de sulfatos en este tramo. Los cloruros (mg Cl-/L) son bajos en todas las estaciones, entre 1,3 -14,57 mg/L pues la concentración en aguas dulces no debe superar el rango 10-250mg/L; la concentración más alta se presentó en CA5 Quebrada. La Pastora Aguas Abajo.

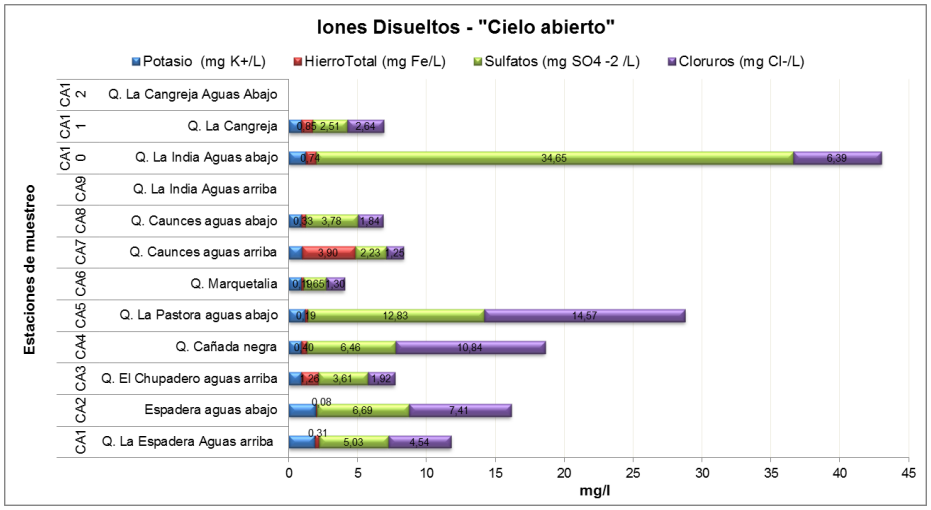
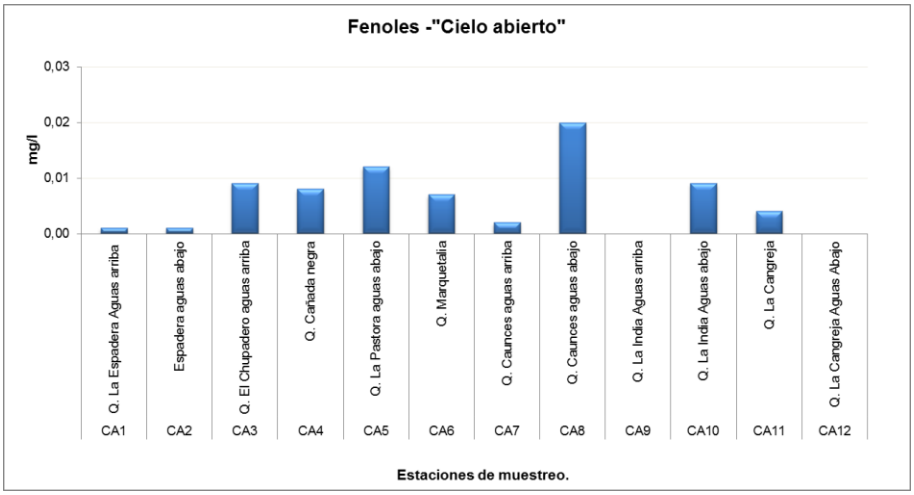



Figura 3-139 - Iones disueltos en el agua Potasio (mg K+/L) Hierro Total (mg Fe/L) Sulfatos (mg SO4 -2 /L) Cloruros (mg Cl-/L) en las estaciones de las quebradas del tramo "Cielo abierto", cuenca media de la Q. Santa Elena.

También se analizaron otras sustancias disueltas en el agua y metales pesados, pero ninguna superó el límite de detección del método de análisis: Fenoles 0,001mg C6H6/L, Cobre 0,02mg Cu/L, Cadmio 0,003mg Cd/L, Plomo mg 0,01Pb/L, Zinc, 0,02mg Zn/L, Cromo Total 0,05mg Cr/L y Cromo Hexavalente 0,05mg Cr (VI)/L, lo cual significa que no hay contaminantes provenientes de la industria y de las actividades agropecuarias.



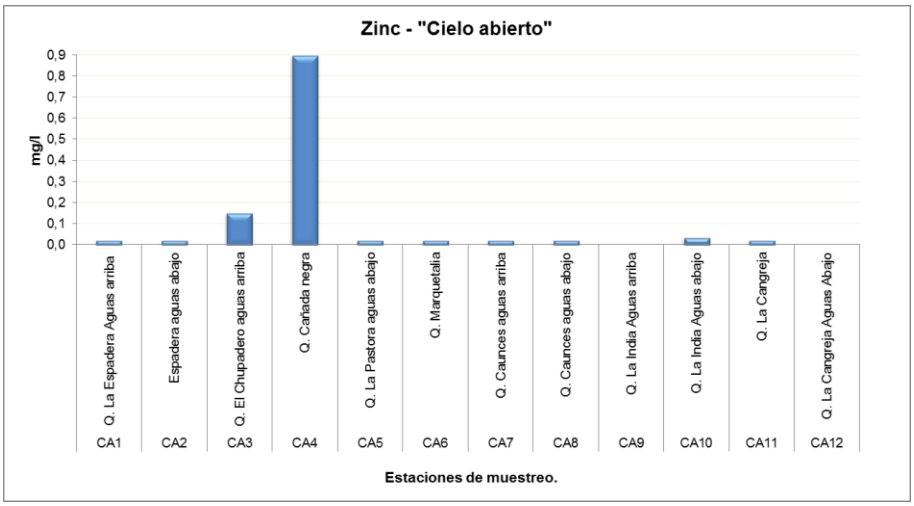



Figura 3-140 - Fenoles y Zinc (mg Zn/L) disueltos en el agua en las estaciones de las quebradas del tramo “Cielo abierto”, cuenca media de la Q. Santa Elena.

En estas quebradas, las grasas y aceites en estaciones CA2 Quebrada La Espadera Aguas Abajo, CA7 Quebrada Caunces Aguas Arriba, CA10 Quebrada La India Aguas Abajo, no alcanzan el nivel de detección mínimo del método de análisis utilizado, <9,32 mg Grasas y Aceites/L, por lo tanto no se sabe si superan la concentración de 0,01 mg/L para la conservación de la fauna o están ausentes para su consumo y uso recreativo directo. Las demás sobrepasan el límite de grasas y aceites para conservar la vida acuática y para su uso recreativo y de consumo directo; es notoria la contaminación por gradas y aceites en las estaciones CA1 Quebrada La Espadera Aguas Arriba con 12 mg/L, CA3 Quebrada El Chupadero Aguas Arriba y CA5 Quebrada. La Pastora Aguas Abajo con 13 mg/L y CA11 Quebrada La Cangreja con 24 mg/L.

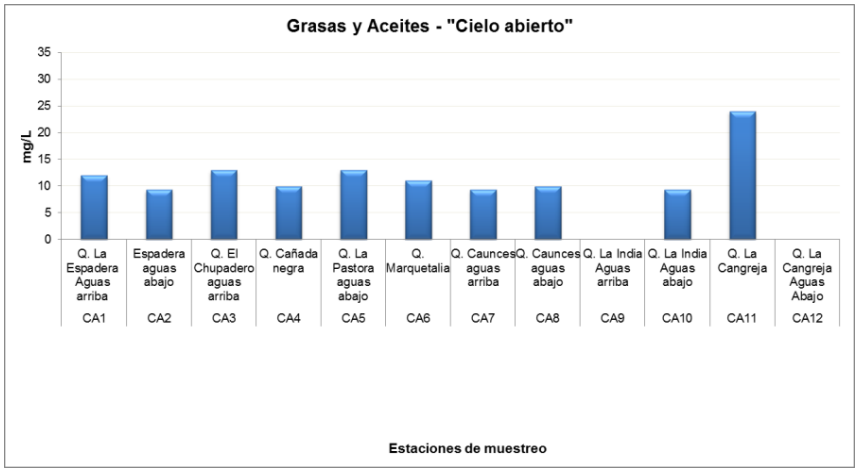



Figura 3-141 - Grasas y/o Aceites en las estaciones de las quebradas del tramo “Cielo abierto”, cuenca media de la Q. Santa Elena.

La demanda química de oxígeno, DQO, en las estaciones CA7 Quebrada Caunces Aguas Arriba (9,0 mgO2/L), CA10 Quebrada La India Aguas Abajo (17,0 mgO2/L) y CA14 (5,5 mgO2)/L), sobrepasa el rango para aguas superficiales no contaminadas, 1,0 -5,0 mg/L, en las demás la DQO presenta concentraciones <2,46 mgO2/L que es el límite de detección del método de análisis utilizado. La DBO5, con excepción de la estación CA10 Quebrada La India Aguas Abajo (4,0 mgO2/L) presentó demandas de oxígeno por debajo del límite de detección del método de análisis, <1,89 mgO2/L que son inferiores a cualquier tipo de restricción. La relación DBO/DQO<0,2, lo que hace suponer que estas estaciones reciben escorrentías y/o vertidos inorgánicos, imposible de depurar de forma biológica.

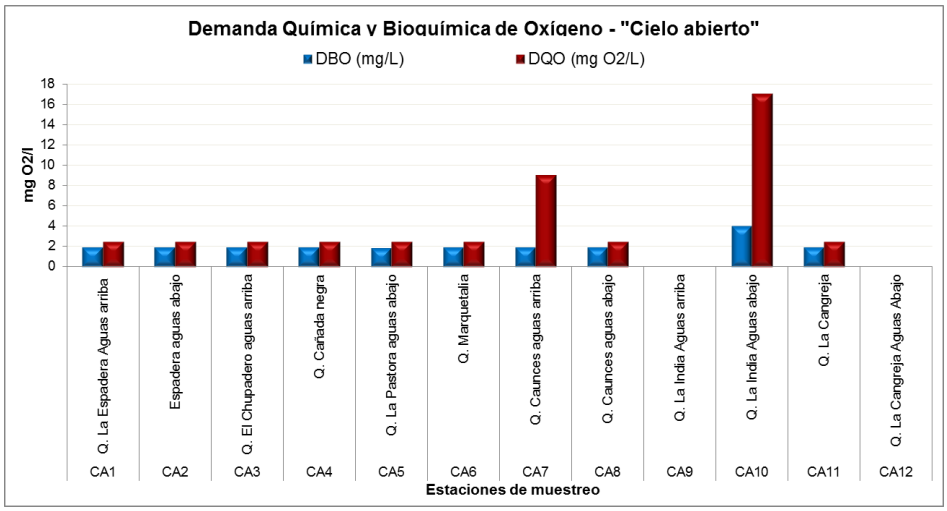



Figura 3-142 - Contaminación orgánica, medida como demanda de oxígeno, DBO (mg/L) y DQO (mg O2/L) en las estaciones de las quebradas del tramo “Cielo abierto”, cuenca media de la Q. Santa Elena.

Todas las estaciones de la quebrada tienen presencia de coliformes totales y fecales. Los coliformes fecales son una fracción de los coliformes totales e indican la presencia de heces animales y humanas en el agua por vertido de aguas residuales, uso de fertilizantes orgánicos (gallinaza y porquinaza) o por escorrentía de explotaciones pecuarias y por lo tanto evidencian la posibilidad de microorganismos patógenos para humanos y animales, bien sea por contacto o por vía digestiva. Excepto las estaciones CA3 Quebrada El Chupadero Aguas Arriba, CA5 Quebrada. La Pastora Aguas Abajo, CA6 Quebrada Marquetalia y CA8 Quebrada Caunces Aguas Abajo, las demás estaciones presentan contaminación fecal por encima de 200 NMP/100 ml por lo que tienen restricciones para su uso pecuario, recreación primaria y preservación de la flora y la fauna. Pero en general, todas las estaciones tienen esas mismas restricciones por tener más 1000 NMP/100 coliformes totales. CA2 Quebrada La Espadera Aguas Abajo, CA7 Quebrada Caunces Aguas Arriba, CA8 Quebrada Caunces Aguas Abajo, CA10 Quebrada La India Aguas Abajo, CA11 Quebrada La Cangreja, CA13 y CA14, por tener más de 5000 NMP/100 de coliformes totales también tienen restricciones para uso agrícola y contacto secundario.

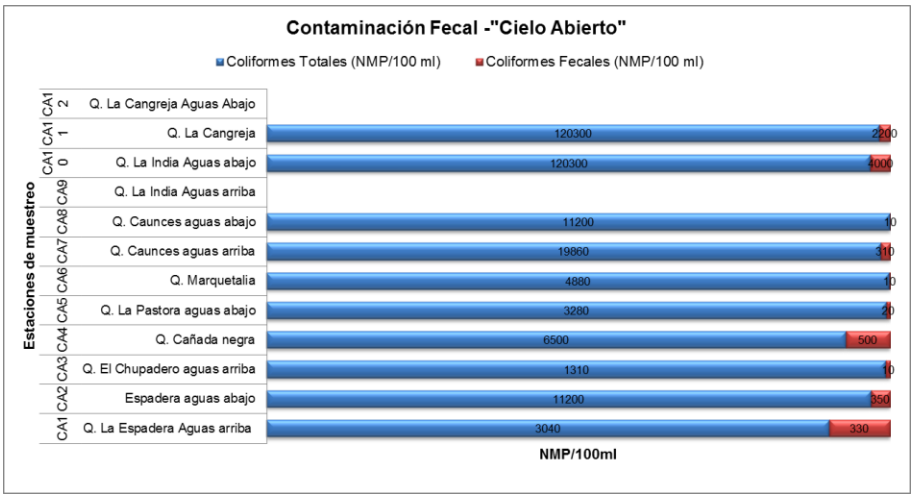



Figura 3-143 - Contaminación fecal en las estaciones de las quebradas del tramo “Cielo abierto”..

## Índice de calidad del agua de las quebradas del tramo “Cielo abierto

Para las estaciones del tramo Cielo Abierto, el ICAfa indica que tienen agua de buena calidad. En este tramo lo que más restringe la calidad es la concentración de fósforo mayor de 0,03 mg/l en todas las estaciones, especialmente en CA1 Q. La Espadera aguas arriba del eje, CA4 Quebrada Cañada Negra, CA7 Quebrada Caunces Aguas Arriba y CA8 Quebrada Caunces Aguas Abajo y las conductividades por encima de 100 uS/cm, que en estaciones como C10 Q. La India Aguas abajo, C11 Q. La Cangreja, C12 Q. La Cangreja Aguas Abajo tiene valores sobre los 200uS/cm, en C11 Q. La Cangreja y en CA9 Quebrada. La India Aguas Arriba, la saturación de oxígeno no llega al 70%, también la contaminación fecal, que es más alta en las estaciones CA10 Quebrada La India Aguas Abajo y CA11 Quebrada. La Cangreja.

No se presentan en el agua temperaturas extremas, El pH, en general está en el rango de 6,2 -8,6 unid. Con algunas excepciones, como la Q. La India, el agua está bien oxigenada, por encima del 70% de saturación. Los sólidos totales están por debajo del rango promedio de los ríos neotropicales (<120 mg/L) y, con pocas excepciones, son más abundantes los sólidos disueltos que los que los suspendidos.

La conductividad eléctrica, la dureza, la alcalinidad total son bajas, por lo que las aguas son blandas y poco productivas. La acidez total es baja y carbonácea.

En cuanto a los nutrientes que pueden dar lugar a eutroficación, las formas químicas de nitrógeno presentan concentraciones bajas, mientras que en la mayoría de las quebradas se presentan concentraciones de fósforo por encima de 0,03 mg/L que es el límite superior para diferentes usos del agua y en algunas estaciones las concentraciones presentan tendencia a la eutrofia como en las quebradas. La Espadera Aguas arriba del eje, Caño negro y Caunces aguas abajo.

Las concentraciones de potasio, sulfatos y cloruros fueron bajas, por el contrario la presencia de hierro en concentraciones iguales o mayores de 0,3 mg/L es común en todas las quebradas porque los suelos son ricos en este elemento.

En estas quebradas, grasas, fenoles y zinc cuando las hay, tienen concentraciones muy bajas; los metales pesados (cadmio, cobre, plomo y cromo) están por debajo de los límites de detección del

método de análisis, lo cual evidencia que no hay contaminación industrial, minera o por agroquímicos por lo menos en el momento de toma de las muestras.

Las concentraciones de DBO5 en la mayoría de las estaciones estuvieron por debajo del límite de detección del método de análisis, por lo que la relación DBO/DQO es <0,2, lo que hace suponer que estas estaciones reciben escorrentías y/o vertidos inorgánicos, imposible de depurar de forma biológica.

En todas las quebradas se encontraron coliformes totales y fecales que indican la presencia de heces animales y humanas en el agua por vertido de aguas residuales, uso de fertilizantes orgánicos (gallinaza y porquinaza) o por escorrentía de explotaciones pecuarias, por lo tanto limitan el uso de sus aguas por la posibilidad de microorganismo patógenos para humanos y animales, bien sea por contacto o por vía digestiva.

Las estaciones de la cuenca media de La Santa Elena, tramo “Cielo Abierto” todas presentan calidad de agua buena sin embargo, en todas se presenta contaminación fecal y concentraciones de fósforo en el límite de la eutroficación se presentan en la mayoría de las quebradas.

Tabla 3-78 - Calidad del agua en las estaciones de la Quebrada Santa Elena y parte alta de algunos de sus afluentes

| Nombre | No. Estación | pH (unidades pH) | DQO ( mg/L O2) | DBO5 (mg/L) | Sólidos suspendidos Totales(SST) | FOSFORO TOT (mg/L-P) | CONDUCTIVIDAD ((usiemens/cm) | % SATURACION OXIGENO | E Coli (UFC/100 mL) | IPH | IDQO | IDBO5 | Isst | Icond | I%sat | I Ecoli | I FOSFORO TOTAL (PO4) | ICA fa | DESCRIPTOR / COLOR |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Q. La Espadera Aguas arriba del eje | CA1 | 7,78 | 2,46 | 1,89 | 6,6 | 4,281 | 164 | 102,3 | 330 | 1 | 1 | 1 | 1,000 | 0,490 | 0,977 | 1 | 0,25 | 0,86 | BUENA |
| Espadera aguas abajo | CA2 | 7,61 | 2,46 | 1,89 | 4,23 | 0,065 | 189 | 101,1 | 350 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0,383 | 0,989 | 1,00 | 0,50 | 0,89 | BUENA |
| Q. El Chupadero aguas arriba | CA3 | 7,42 | 2,46 | 1,89 | 19 | 1,364 | 149 | 92,7 | 10 | 1 | 1 | 1 | 0,96 | 0,551 | 0,927 | 1,000 | 0,25 | 0,85 | BUENA |
| Q. Cañada negra | CA4 | 7,6 | 2,46 | 1,89 | 8,1 | 3,364 | 157 | 94,3 | 500 | 1 | 1 | 1 | 0,996 | 0,519 | 0,943 | 1,000 | 0,25 | 0,86 | BUENA |
| Q. La Pastora aguas abajo | CA5 | 724 | 2,46 | 1,89 | 8,6 | 1,312 | 281 | 100,6 | 20 | 1 | 1 | 1 | 0,994 | -0,050 | 0,994 | 1,000 | 0,25 | 0,82 | BUENA |
| Q. Marquetalia | CA6 | 7 | 2,46 | 1,89 | 25 | 0,189 | 113 | 75,4 | 10 | 1 | 1 | 1 | 0,945 | 0,690 | 0,754 | 1,00 | 0,50 | 0,85 | BUENA |
| Q. Caunces aguas arriba | CA7 | 7,37 | 9 | 1,89 | 78 | 2,802 | 131 | 92,1 | 310 | 1 | 1 | 1 | 0,786 | 0,622 | 0,921 | 1,000 | 0,25 | 0,83 | BUENA |
| Q. Caunces aguas abajo | CA8 | 7,07 | 2,46 | 1,89 | 4,23 | 4,21 | 175 | 83,1 | 10 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0,443 | 0,831 | 1,000 | 0,25 | 0,82 | BUENA |
| Q. La India Aguas abajo | CA10 | 7,1 | 17 | 1,89 | 21 | 0,171 | 202 | 96,1 | 4000 | 1 | 0,003 | 1 | 0,957 | 0,325 | 0,961 | 1,000 | 0,50 | 0,87 | BUENA |
| Q. La Cangreja | CA11 | 6,99 | 2,46 | 1,89 | 21 | 0,745 | 232 | 66,1 | 2200 | 0,996 | 1 | 1 | 0,96 | 0,188 | 0,661 | 1,000 | 0,50 | 0,79 | BUENA |

### 3.2.5.2.3 Cuenca de la Quebrada Santa Elena- Portal Occidental

Dentro del área de influencia directa puntual se seleccionaron dos puntos de muestreo pertenecientes a la Cuenca Santa Elena, ubicados en el Portal Occidental del Tunel. La quebradas La Aguadita y La Bocaná (SE23 Quebrada La Aguadita y SE24 Quebrada La Bonanza (o Bocana) respectivamente), las cuales podrían tener una afectación directa debido a las obras de construcción del proyecto Conexión Vial Aburrá Oriente y sus vias complementarias y sus vías complementarias.

Los resultados de las variables fisicoquímicas de las estaciones SE23 Quebrada La Aguadita y SE24 Quebrada La Bonanza (o Bocana) se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 3-79 - Resultados de los análisis fisicoquímicos in situ y ex situ en las estaciones del área de influencia del túnel, subcuenca de la Quebrada Santa Elena

| Estaciones | SE23 | SE24 |
|---|---|---|
| Variable | Q. La Aguadita | Q. La Bocana (o Bonanza) |
| Coordenada X | 840968 | 840726 |
| Coordenada Y | 1180295 | 1180310 |
| Coordenada Z | 2011 | 2055 |
| T agua(°C) | 14,9 | 15,8 |
| Oxígeno Disuelto (mg/l) | 6,35 | 7,57 |
| Saturación de Oxigeno (%) | 9,65 | 99,7 |
| Conductividad (µS/cm) | 174 | 200 |
| pH | 7,1 | 7,76 |
| Oxiqeno Disuelto (mg $O_2$/L) | 7,91 | 7,52 |
| DBO (mg/L) | 1,89 | 1,89 |
| DQO (mg $O_2$/L) | 9,2 | 8,2 |
| Turbiedad (N.T.U) | 0,91 | 0,58 |
| Alcalinidad Total (mg $CaCO_3$/L) | 56,5 | 88 |
| Acidez Total (mg $CaCO_3$/L) | 3 | 4 |
| Amonio (mg $NH^{4+}$/l) | 0,06 | 0,06 |
| Nitritos (mg $NO^{2-}$/L) | 0,05 | 0,05 |
| Nitratos (mg $NO^{3-}$/L) | 1,53 | 4,215 |
| Fósforo Total (mg P/L) | 0,065 | 0,081 |
| Potasio (mg $K^+$/L) | 0,9 | 0,9 |
| HierroTotal (mg Fe/L) | 0,071 | 0,066 |
| Sólidos Totales (mg ST/L) | 93 | 108 |
| Sólidos DisueltosTotales (mg SDT/L) | 89 | 106 |
| Sólidos Suspendidos Tótales (mg SST/L) | 4,3 | 4,23 |
| Sólidos Sedimentables (mg/L) | 0 | 0 |
| Sulfatos (mg $SO4^{-2}$ /L) | 7,878 | 4,013 |
| Cloruros (mg $Cl^-$/L) | 9,653 | 5,179 |
| Grasasv/o Aceites(mg Grasas y Aceites/L) | 9,32 | 14 |
| Fenoles (mg $C_6H_6$/L) | 0,001 | 0,001 |
| Detergentes (mg SAAM/L) | 0,05 | 0,147 |
| Dureza Calcica (mg $CaCO_3$/L) | 18,769 | 4,044 |
| Dureza Magnésica (mg $CaCO_3$//L) | 36,511 | 74,714 |
| Cobre (mg Cu/L) | 0,02 | 0,02 |
| Cadmio (mg Cd/L) | 0,003 | 0,003 |

| Estaciones | SE23 | SE24 |
|---|---|---|
| Plomo (mg Pb/L) | 0,01 | 0,01 |
| Zinc (mg Zn/L) | 0,02 | 0,033 |
| Cromo Total (mg Cr/L) | 0,05 | 0,05 |
| Cromo Hexavalente (mg Cr(VI)/L) | 0,05 | 0,05 |
| Coliformes Totales (NMP/100 ml) | 17330 | 890 |
| Coliformes Fecales (NMP/100 ml) | 100 | 10 |

Fuente: Consorcio Siga-Plyma

La temperatura del agua está dentro del rango para quebradas con esta altura sobre el nivel del mar, entre 13 y 17,3ºC. El oxígeno disuelto medido in situ presenta concentraciones de oxígeno disuelto mayores de 6,0mg litro que es el límite para sostener la vida acuática. La saturación de oxigeno es crítica en la estación SE23 Quebrada La Aguadita con 9,65%, en la cual ya se dificulta la vida acuática y la oxidación de la materia orgánica. El pH esta dentro de un rango básico apropiado para sostener vida silvestre, potabilizar el agua y para uso agrícola y pecuario.

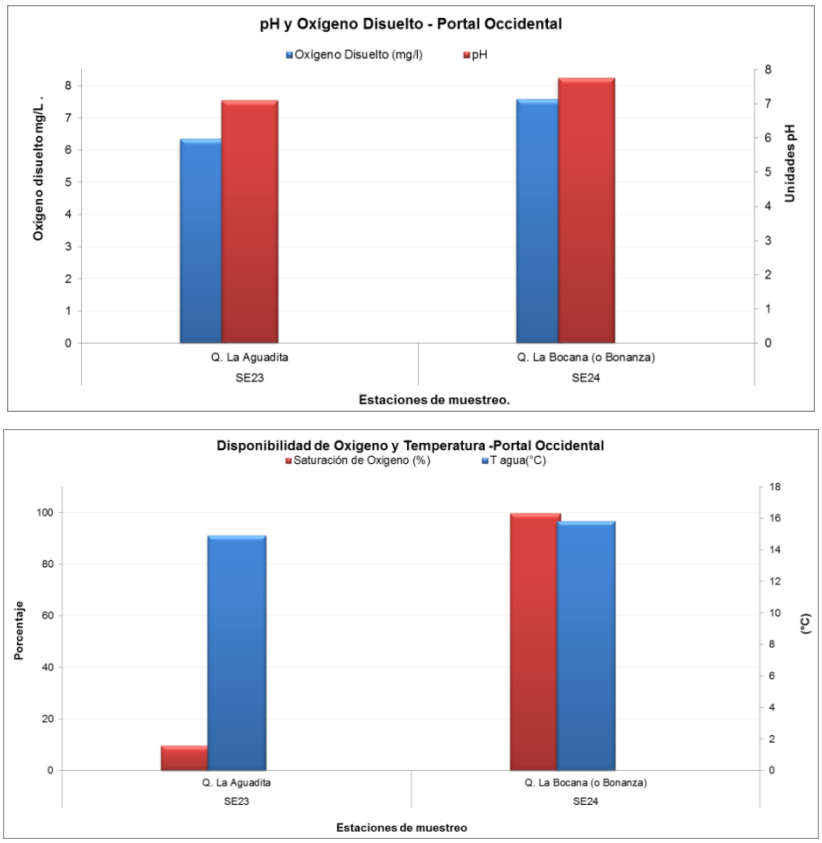



Figura 3-144 - Oxígeno, pH, Temperatura y saturación de oxígeno en las estaciones de la Q. Santa Elena y sus afluentes.

Los sólidos totales están por debajo del rango promedio de los ríos (<120 mg/L). Los sólidos totales están representados en su mayoría por sólidos disueltos totales de los cuales la estación SE24 Quebrada La Bonanza (o Bocana) alcanza los 100mg/L. Los sólidos suspendidos son bajos, menores de 25, que es el límite superior para corrientes de montaña con calidad normal. La turbiedad en ambas estaciones está por debajo de 10 NTU excepto.

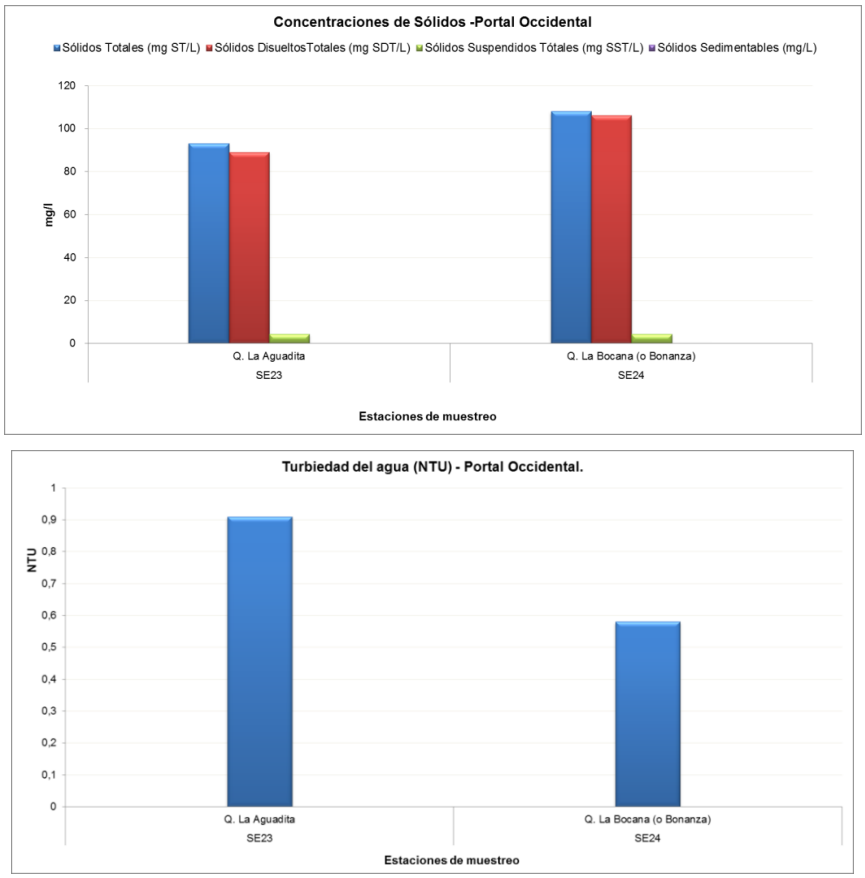



Figura 3-145 - Concentraciones de Solidos y Turbiedad en las estaciones del Portal Occidental.

Las quebradas muestreadas sobrepasan el rango de conductividad eléctrica (10-50 µS/cm) con valores de 174 µS/cm para SE23 Quebrada La Aguadita, 200 µS/cm para SE24 Quebrada La Bonanza (o Bocana) que es lo esperado para corrientes de cuenca alta sin contaminar, lo que indica que tienen mayor cantidad de sustancias disueltas en el agua. La Dureza Cálcica (mg CaCO3/L), es muy baja en la estacion SE24 Quebrada La Bonanza (o Bocana) con una concentracion por debajo de 10mg/L que corresponde a aguas muy blandas, poco productivas, oligotróficas. La estación SE23 Quebrada La Aguadita está en el rango de aguas muy blandas medianamente productivas. En cuanto a la Dureza Magnésica (mg CaCO3//L) las concentraciones sobrepasan los 30 mg/l valor óptimo. De acuerdo a la dureza total las estaciones son productivas, con aguas medianamente duras, > 50 mg/L.

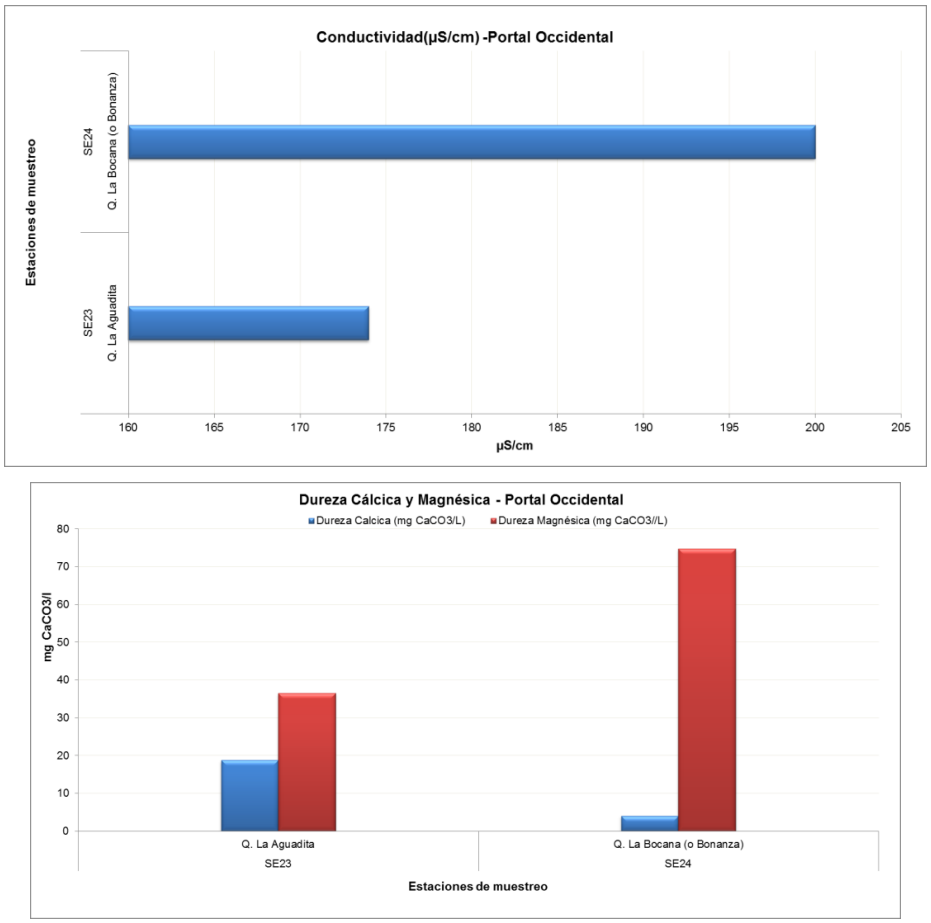



Figura 3-146 - Conductividad y Dureza en las estaciones de la Q. Santa Elena Portal occidental.

La Alcalinidad Total (mg CaCO3/L) de la estación SE23 Quebrada La Aguadita está dentro del rango aguas naturales de sistemas montañosos (entre 10-60 mg/L) mientras SE24 Quebrada La Bonanza (o Bocana) tiene una alcalinidad alta para este tipo de corrientes por lo que se espera que tenga mayor productividad que las demás. La acidez total en estas quebradas es baja y por ser un sistema de aguas naturales con el rango de pH básico, se asume que la acidez se debe casi exclusivamente al $CO_2$, es decir, que la acidez es carbonácea y no mineral.

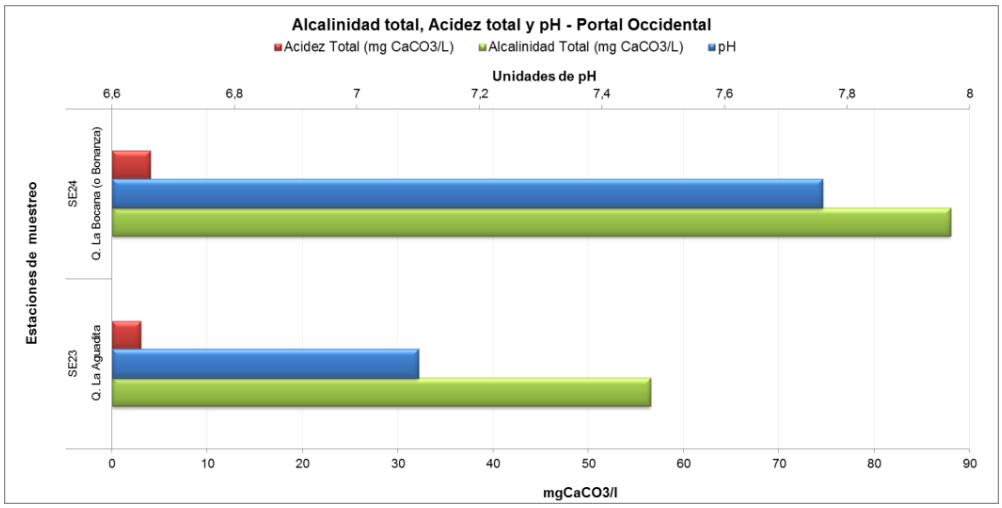
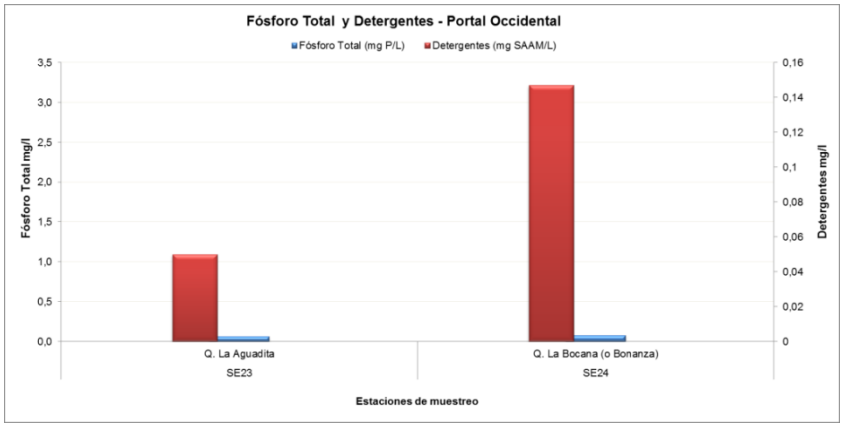



Figura 3-147 - Alcalinidad Total y Acidez Total en las estaciones de la Q. Santa Elena Portal Occidental.

En relación a los nutrientes, el Fósforo Total (mg P/L), presenta una concentracion muy alta, en la estación SE24 Quebrada La Bonanza (o Bocana), cuyas concentracion de fósforo total es de 0,081 presenta condiciones de eutrófia, Ambas estaciones presentan contaminación fecal por lo que sus fuentes deben recibir aguas de escorrentía de potreros, explotaciones pecuarias o aguas residuales domésticas y en la región se utilizan fertilizantes y abonos en cultivos, y potreros. Los Detergentes (mg SAAM/L), que además de ser tensoactivos se relacionan con las concentraciones de fósforo, en la estación SE23 Quebrada La Aguadita presenta una concentracion por debajo de 0,5 mg/l que es el límite para diferentes usos del agua y por debajo de 0,143 mg/L que es el límite para la conservación de la vida acuática, mientras que en SE24 Quebrada La Bonanza (o Bocana), la concentración alcanza los 0,147 mg/L. Los nitratos (mg NO3-/L), la forma biodisponible del nitrógeno, están dentro de un rango de 0,41 -4,21 mg/L, inferior al límite de uso de 10mg/L para diferentes usos del agua. La mayor concentracion de nitratos se observa en SE24 Quebrada La Bonanza (o Bocana). Los nitritos (mg NO2- /L), la forma que rápidamente se convierte a nitratos en estas corrientes bien oxigenadas, no superan en ninguna estación el límite de detección del método de análisis utilizado de 0,05 mg/L, que están por debajo de las concentraciones recomendadas para diferentes usos de 1,0mg/L. El nitrógeno amoniacal (mg NH4+ /l) también es por debajo del límite para diferentes usos y para la conservación de la vida silvestre, 1,0mg/L y 0,1mg/L respectivamente.



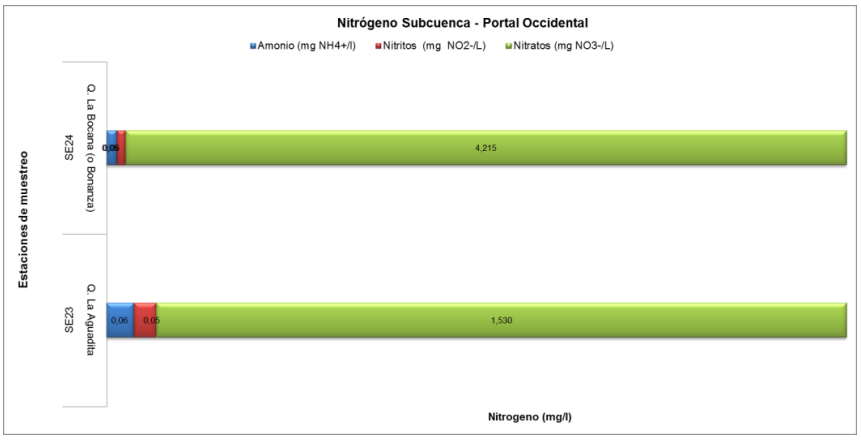



Figura 3-148 - Detergentes, Fósforo total y Nitrógeno (Nitratos, nitritos y N-amoniacal) en las estaciones de la Q. Santa Elena Portal Occidental.

En relación con los iones disueltos en el agua, se observa que el potasio (mg K+/L) tiene concentraciones menores de 10 mg/L que es lo esperado para aguas naturales superficiales. La presencia de hierro es un problema de calidad del agua muy común en esta región donde los suelos son ricos en este elemento. El agua aún con una pequeña cantidad de hierro puede tornarse rojiza por su exposición al aire y especialmente cuando su pH está por encima de 7,5 unid. Aunque no es tóxico, la coloración y el sabor se transforman en problema cuando la concentración es mayor que 0,3 mg/L. En las estaciones SE23 Quebrada La Aguadita, SE24 Quebrada La Bonanza (o Bocana) no se supera el límite de 0,3 mg/L que es el límite para recreación, contacto y consumo. Los sulfatos (mg SO4-/L) tienen concentraciones muy bajas ambas estaciones, entre 1,25 - 7,8 mg/L, cuando el límite para aguas naturales, recreación y para potabilizar está en 250 mg/L. Los cloruros (mg Cl-/L) también son bajos en las dos estaciones, entre 1,25 -29,79 mg/L pues la concentración en aguas dulces no debe superar el rango 10-250mg/L.

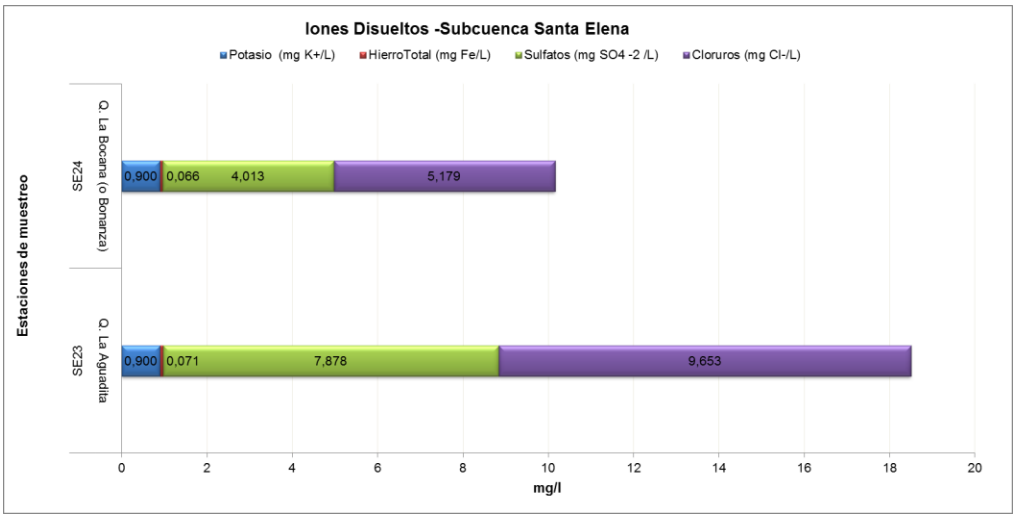


Figura 3-149 - Iones disueltos en el agua Potasio (mg K+/L) Hierro Total (mg Fe/L) Sulfatos (mg SO4 -2 /L) Cloruros (mg Cl-/L) en las estaciones de la Q. Santa Elena Portal Occidental..

Los fenoles en ambas estaciones están por debajo del límite de detección del método, <0,001 mg/L. El zinc en la estación SE24 Quebrada La Bonanza (o Bocana) (0,033 mg/L), presenta una concentración que no restringen el uso para consumo humano y pecuario, pero que si pueden ser inconvenientes para algunas especies silvestres, ya que el límite para flora y fauna en aguas frías es de 0,01 mg/L. Las concentraciones de los metales pesados, estuvieron por debajo del límite de detección del método de análisis, Cobre 0,02mg Cu/L, Cadmio 0,003mg Cd/L, Plomo mg 0,01Pb/L, Cromo Total 0,05mg Cr/L y Cromo Hexavalente 0,05mg Cr (VI)/L, lo cual significa que no hay concentraciones de estos iones contaminantes provenientes de la industria y de las actividades agropecuarias. La DBO5 presentó demandas de oxígeno por debajo del límite de detección del método de análisis, <1,89 mgO2/L que son inferiores a cualquier tipo de restricción. La demanda química de oxígeno, DQO sobrepasa el rango para aguas superficiales no contaminadas, 1,0 -5,0 mg/L en ambas estaciones.

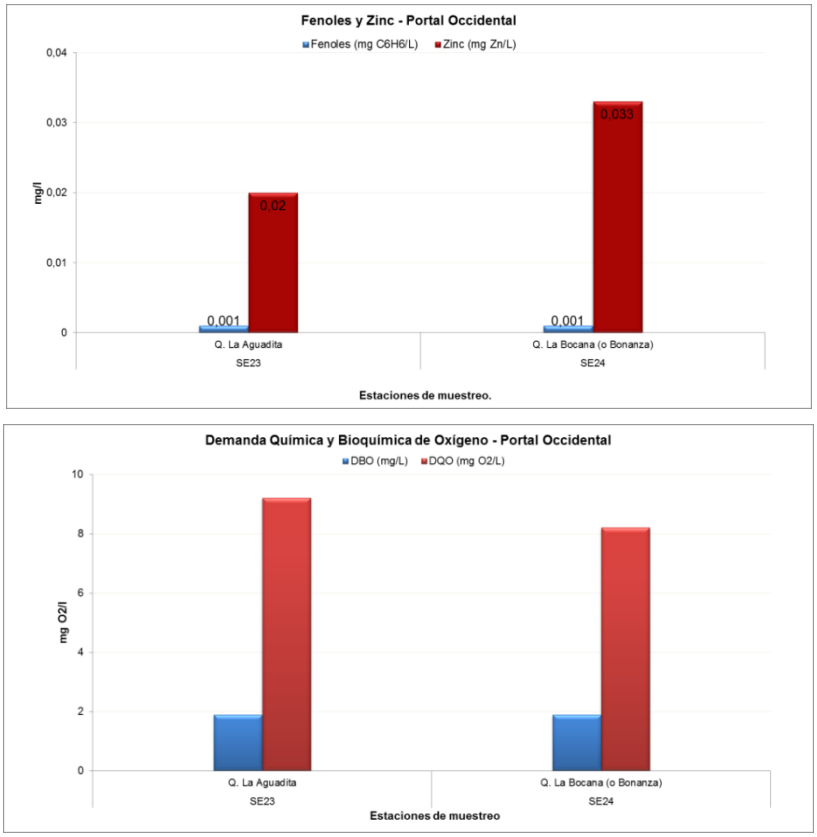



Figura 3-150 - Fenoles, Zinc y Contaminación orgánica, Q. Santa Elena – Portal Occidental.

La estación SE 24 (14 mg/L) sobrepasa el límite de grasas y aceites para conservar la vida acuática, para su uso recreativo y de consumo directo, tienen presencia de coliformes totales y fecales. Los coliformes fecales son una fracción de los coliformes totales e indican la presencia de heces animales y humanas en el agua por vertido de aguas residuales, uso de fertilizantes orgánicos (gallinaza y porquinaza) o por escorrentía de explotaciones pecuarias, lo cual evidencia la

posibilidad de microrganismo patógenos para humanos y animales, bien sea por contacto o por vía digestiva. Sin embargo, ninguna de las estaciones presentan contaminación fecal igual o por encima de 200 NMP/100 ml lo que restringe estas aguas para su uso pecuario, recreación primaria (contacto directo) y preservación de la flora y la fauna. Sin embargo, los coliformes totales en la estación SE23 Quebrada La Aguadita supera las 20.000NTU, por lo tanto están restringidas para tratamiento convencional.

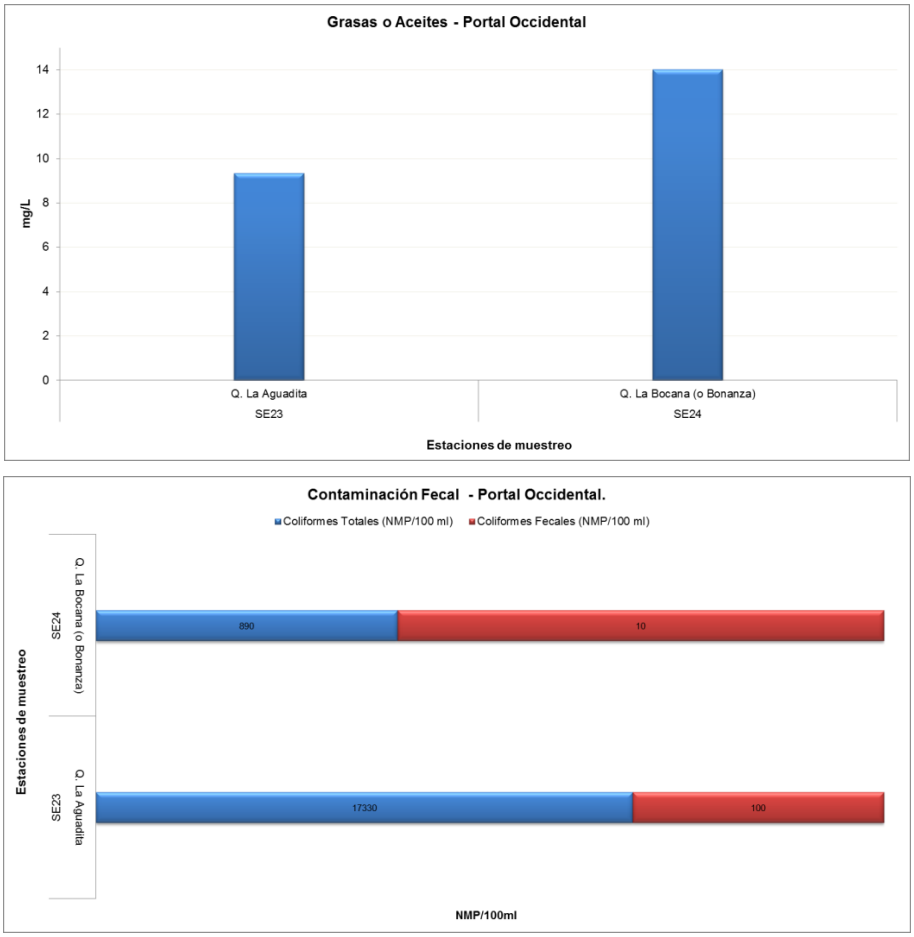



Figura 3-151 - Grasas y Contaminación fecal - Q. Santa Elena Portal Occidental.

## Índice de calidad de agua para la cuenca de la Quebrada Santa Elena Portal Occidental

Los ICAfa calculados en estas estaciones arrojan unos resultados de calidad medio con restricciones para el contacto humano y presentan inconvenientes para la vida en al agua para la estación SE23 Quebrada La Aguadita, debido a que tiene una muy baja saturación de oxigeno (9.65%) mientras que para la estación SE24 Quebrada La Bonanza (o Bocana) la calidad de agua resultó buena.

Tabla 3-80 - Calidad de Agua para las estaciones de la Cuenca Santa Elena Portal Oriental.

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Q. La Aguadita (Portal Occidental) | SE23 | 7,1 | 9,2 | 1,89 | 4,30 | 0,065 | 174 | 9,65 | 100 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0,447 | 0,097 | 1,000 | 0,50 | 0,68 | Media |
| Q. La Bonanza (o Bocana) | SE24 | 7,76 | 8,2 | 1,89 | 4,23 | 0,081 | 200 | 99,7 | 10 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0,334 | 0,997 | 1,00 | 0,50 | 0,89 | Buena |

Fuente: Consorcio Siga-Plyma

### 3.2.5.2.4 Cuenca Rionegro- Portal Oriental

En la Cuenca Rionegro se ubican las obras correspondientes al Portal Oriental y la Vía Cielo Abierto Oriental, ubicadas dentro de la subcuenca Salazar o Sajonia; allí se seleccionaron tres puntos posibles de afectación S8 Quebrada Salazar, S9 Afluente 1 Yarumal, S10 Confluencia Salazar Yarumal que se incluyen dentro del área de influencia puntual.

Los resultados de las variables fisicoquímicas de las estaciones de la Q. La Salazar pertenecientes al área de influencia puntual se presenta en la tabla 3.28.

Tabla 3-81 - Resultados de las variables fisicoquímicas de las estaciones de la Q. La Salazar pertenecientes al área de influencia puntual.

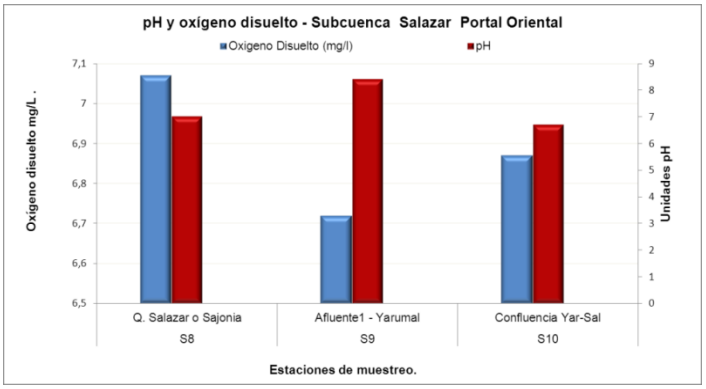
| Estación | S8 | S9 | S10 |
|---|---|---|---|
| Variable | Q. Salazar o Sajonia | Afluente1 - Yarumal | Confluencia Yar-Sal |
| Coordenada X | 847727 | 848366 | 848265 |
| Coordenada Y | 1175352 | 1175083 | 1175017 |
| Coordenada Z | 2205 | 2200 | 2190 |
| T agua(°C) | 17,1 | 16,1 | 17,8 |
| Oxigeno Disuelto (mg/l) | 7,07 | 6,72 | 6,87 |
| Saturación de Oxigeno (%) | 95,1 | 65 | 72 |
| Conductividad (µS/cm) | 51 | 27,1 | 56,2 |
| pH | 7,02 | 8,4 | 6,7 |
| Oxiqeno Disuelto (mg $O_2$/L) | 7,55 | 6,72 | 6,87 |
| DBO (mg/L) | 1,89 | 1,89 | 1,89 |
| DQO (mg $O_2$/L) | 36 | 21 | 14 |
| Turbiedad (N.T.U) | 2,5 | 11,2 | 30,5 |
| Alcalinidad Total (mg $CaCO_3$/L) | 18,5 | 12 | 19,5 |
| Acidez Total (mg $CaCO_3$/L) | 2 | 4 | 3 |
| Amonio (mg $NH^{4+}$/l) | 0,092 | 0,06 | 0,06 |
| Nitritos (mg $NO^{2-}$/L) | 0,05 | 0,05 | 0,05 |
| Nitratos (mg $NO^{3-}$/L) | 0,322 | 0,252 | 0,45 |
| Fósforo Total (mg P/L) | 2,706 | 3,293 | 0,539 |
| Potasio (mg $K^{+}$/L) | 0,9 | 0,9 | 0,9 |
| HierroTotal (mg Fe/L) | 0,648 | 0,508 | 2,183 |
| Sólidos Totales (mg ST/L) | 46 | 37 | 230 |
| Sólidos DisueltosTotales (mg SDT/L) | 43 | 17 | 41 |
| Sólidos Suspendidos Tótales (mg SST/L) | 4,23 | 20 | 189 |
| Sólidos Sedimentables (mg/L) | 0 | 0 | 0,4 |
| Sulfatos (mg $SO4^{-2}$ /L) | 1,508 | 1,360 | 2,722 |
| Cloruros (mg $Cl^{-}$/L) | 2,002 | 1,831 | 5,361 |
| Grasasv/o Aceites(mg Grasas y Aceites/L) | 9,32 | 9,32 | 9,32 |
| Fenoles (mg $C_6H_6$/L) | 0,001 | 0,001 | 0,001 |
| Detergentes (mg SAAM/L) | 0,05 | 0,076 | 0,068 |
| Dureza Calcica (mg $CaCO_3$/L) | 6,800 | 4,533 | 7,744 |
| Dureza Magnésica (mg $CaCO_3$//L) | 7,943 | 3,706 | 6,405 |
| Cobre (mg Cu/L) | 0,02 | 0,02 | 0,02 |
| Cadmio (mg Cd/L) | 0,003 | 0,003 | 0,003 |
| Plomo (mg Pb/L) | 0,01 | 0,01 | 0,01 |

| Estación | S8 | S9 | S10 |
|---|---|---|---|
| Variable | Q. Salazar o Sajonia | Afluente1 - Yarumal | Confluencia Yar-Sal |
| Zinc (mg Zn/L) | 0,02 | 0,02 | 0,02 |
| Cromo Total (mg Cr/L) | 0,05 | 0,05 | 0,05 |
| Cromo Hexavalente (mg Cr(VI)/L) | 0,05 | 0,05 | 0,05 |
| Coliformes Totales (NMP/100 ml) | 1700000 | 1200000 | 490000 |
| Coliformes Fecales (NMP/100 ml) | 79000 | 180000 | 48000 |

Fuente: Consorcio Siga-Plyma

La temperatura del agua de estos puntos está dentro del rango para quebradas con esta altura sobre el nivel del mar. El oxígeno disuelto en todas las quebradas sobrepasa los 6,7 mg/L que es una buena concentración para sostener la vida silvestre. La estación con mayor concentración de oxígeno disuelto es S8 Quebrada Salazar, Q. Sajonia, 7,07mg/l. La saturación de oxígeno, en todas las estaciones está por encima del 70%, lo cual indica que hay una disponibilidad baja de oxígeno para los organismos acuáticos y contaminación ligera.

El pH de todas las estaciones está dentro del rango 6,2 - 8,6 unid que es el rango para sostener vida silvestre, potabilizar el agua y para uso agrícola y pecuario. La estación con el mayor valor de pH fue S9 Afluente 1 Yarumal con 8,8 unid.



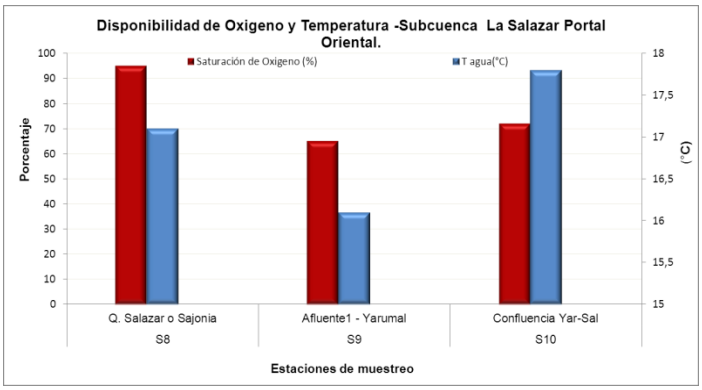




Figura 3-152 - Temperatura, pH, oxígeno y saturación de oxígeno – Subcuenca Salazar Portal Oriental.

Los sólidos totales están por debajo del rango promedio de los ríos neotropicales (<120 mg/L) y del límite para peces de 100 mg/L, con excepción de S10 Confluencia Salazar Yarumal, Q. La Yarumal, que presenta 230 mg/L. Los sólidos totales están representados en su mayoría por sólidos suspendidos en S9 Afluente 1 Yarumal y S10 Confluencia Salazar Yarumal, mientras que en

S8 Quebrada Salazar los sólidos disueltos son la fracción mayor. Los sólidos suspendidos son bajos en todas las estaciones exceptuando S10 Confluencia Salazar Yarumal con 189 mg/L que indica que hay contaminación media. Los sólidos sedimentables son muy bajos, por debajo del límite de 5 mg/L permitido para peces. Los sólidos disueltos en todas las estaciones están por debajo de 200 mg/L que es el parámetro de agua potable.

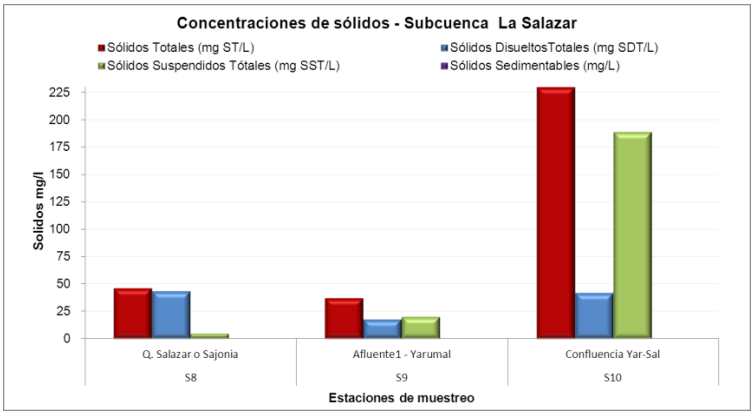
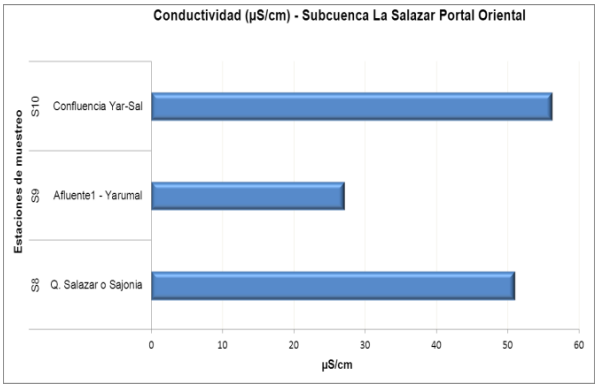
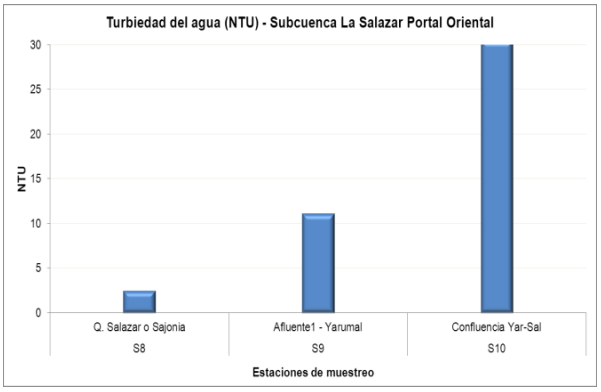



Figura 3-153 - Concentración de Sólidos en las estaciones de la Q. La Salazar – Portal Oriental. .

La conductividad eléctrica es baja en todas las estaciones, en ninguna estación supera 56,2 µS/cm, valores que están dentro del rango de ríos neotropicales, entre 10 y 200 µS/cm. La turbiedad en S8 Quebrada Salazar tiene una concentracion alrededor de 11 NTU y en S10 Confluencia Salazar Yarumal sube hasta 30,5 NTU, coincidiendo en esta estación con las concentraciones más altas de sólidos suspendidos.



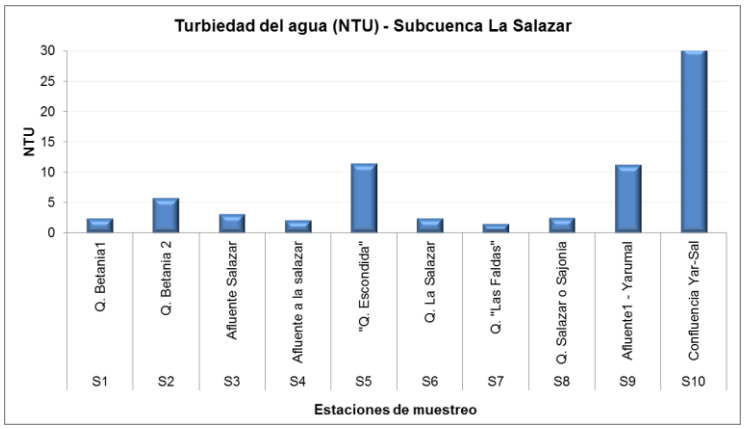
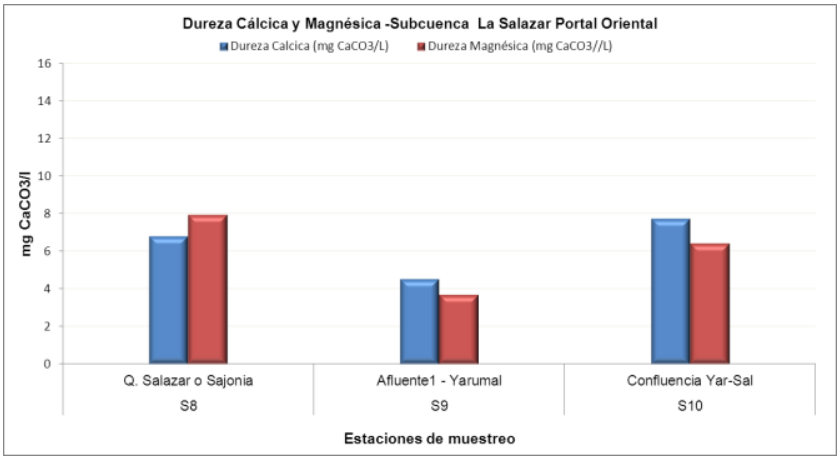



Figura 3-154 - Conductividad y turbiedad en las estaciones de la Q. La Salazar y sus afluentes..

Las concentraciones Dureza Cálcica (mg CaCO3/L) en todas las estaciones de la Q. Salazar, cuyo rango está entre 4,29 y 7,74 mg/L, indican que son aguas muy blandas, poco productivas. En cuanto a la Dureza Magnésica (mg CaCO3//L) todas las estaciones están por debajo de 30 mg/L que es óptimo para una corriente de cuenca alta. La Alcalinidad Total (mg CaCO3/L) de todas las estaciones es menor de 25 mg/L que es límite superior para corrientes de alta montaña. La acidez total en estas quebradas es baja, entre 2,0 – 4,0 mg/L, que por ser sistema de aguas naturales con el rango de pH de estas quebradas puede asumirse que la acidez se debe casi exclusivamente al $CO_2$, por lo que se asume que la acidez es carbonácea y no mineral.



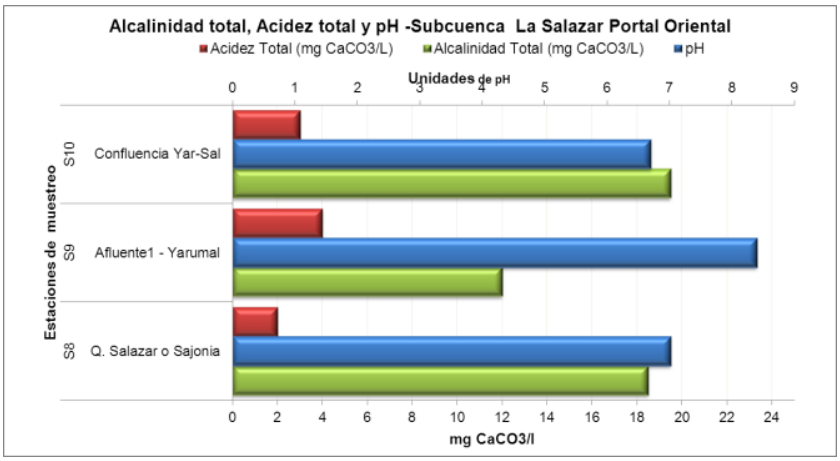
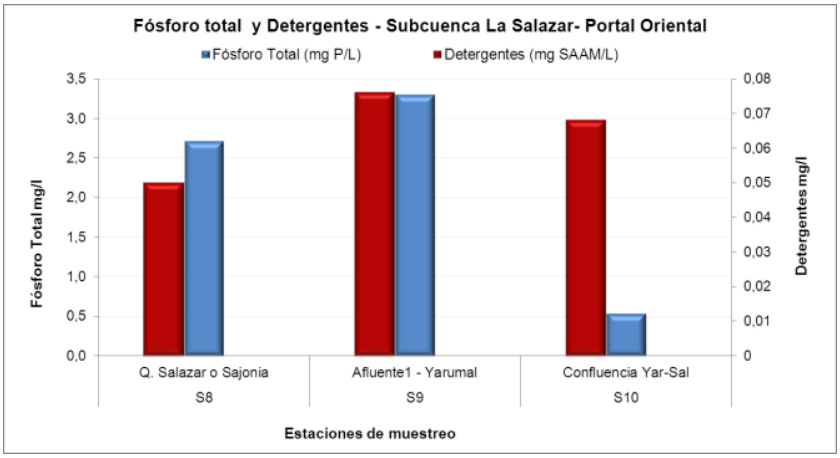



Figura 3-155 - Dureza Cálcica y Magnésica y Alcalinidad en las estaciones de la Q. La Salazar – Portal Oriental.

En relación a los nutrientes, el Fósforo Total (mg P/L), presenta concentraciones muy altas, por encima de la concentración límite, todas están en el rango de la eutrofia, entre 0,073 - 3,298 mg/L; se destacan S8 Quebrada Salazar (2,9mg/L) y S9 Afluente 1 Yarumal (3,29mg/L), porque sus concentraciones de fósforo total por encima de 1,0 mg/L se consideran hipereutróficas. Todas las estaciones presentan contaminación fecal por lo que sus aguas deben recibir aguas de escorrentía de potreros o explotaciones pecuarias o aguas residuales domésticas y en la región se utilizan fertilizantes y abonos en cultivos y potreros. Los Detergentes (mg SAAM/L), que además de ser tensoactivos se relacionan con las concentraciones de fósforo, presentan en todas las estaciones concentraciones por debajo de 0,5 mg/l que es el límite para diferentes usos del agua y por debajo de 0,143 mg/L que es el límite para la conservación de la vida acuática.



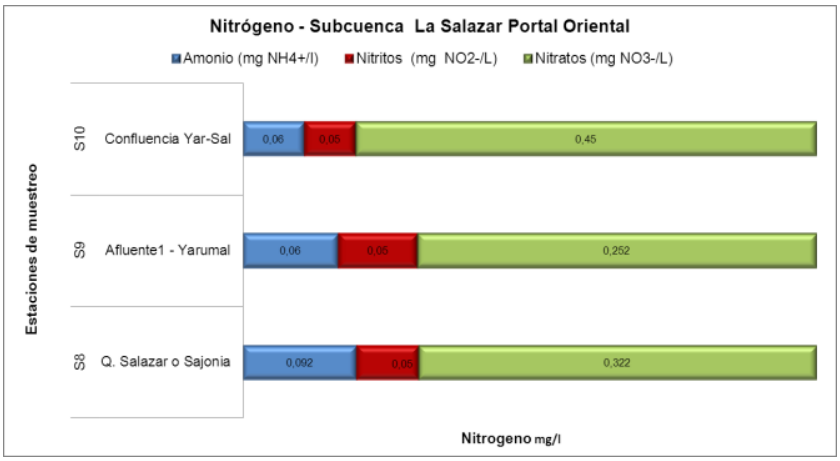



Figura 3-156 - Detergentes, Fósforo total y Nitrogeno en las estaciones de la Q. La Salazar Portal Oriental.

En relación con los iones disueltos en el agua, se observa que el potasio (mgK+/L) en todas las estaciones tiene concentraciones menores de 10 mg/L que es lo esperado para aguas naturales superficiales. La presencia de hierro es un problema de calidad del agua muy común en esta región donde los suelos son ricos en este elemento. El agua aún con una pequeña cantidad de hierro puede tornarse rojiza por su exposición al aire y especialmente cuando su pH está por encima de 7,5 unid. Aunque no es tóxico, la coloración y el sabor se transforman en problema cuando la concentración es mayor que 0,3 mg/L. En las 3 estaciones se supera el límite de 0,3 mg/L que es el límite para recreación, contacto y consumo, en S10 Confluencia Salazar Yarumal (2,18 mg/L) se supera la concentración de 1,0 mg/L ideal para la conservación de la vida acuática. Los sulfatos (mg SO4-/L) tienen concentraciones muy bajas en todas las estaciones, entre 1,25 - 2,72 mg/L, cuando el límite para aguas naturales, recreación y para potabilizar está en 250 mg/L. Los cloruros (mg Cl-/L) son bajos, entre 1,3 - 5,3 mg/L en todas las estaciones, pues la concentración en aguas dulces no debe superar el rango 10-250mg/L.

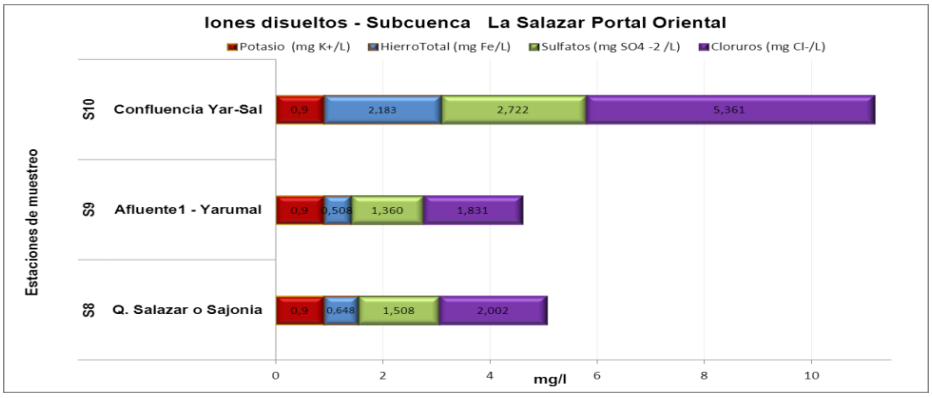



Figura 3-157 - Iones disueltos de la Q. La Salazar Portal Oriental.

También se analizaron otras sustancias disueltas en el agua y metales pesados, pero ninguna superó el límite de detección del método de análisis: Fenoles 0,001mg C6H6/L, Cobre 0,02mg Cu/L, Cadmio 0,003mg Cd/L, Plomo mg 0,01Pb/L, Zinc, 0,02mg Zn/L, Cromo Total 0,05mg Cr/L y Cromo Hexavalente 0,05mg Cr (VI)/L, lo cual significa que no hay contaminantes provenientes de la industria y de las actividades agropecuarias y Cromo Hexavalente 0,05mg Cr(VI)/L, lo cual

significa que no hay contaminantes provenientes de la industria y de las actividades agropecuarias. La demanda química de oxígeno, DQO, presenta valores entre 14 - 36 mg O2/L; todas las estaciones sobrepasan el rango para aguas superficiales no contaminadas, 1,0 -5,0 mg/L; las más altas demandas de oxígeno se presentan en la estación S8 Quebrada Salazar (36 mg/L). La DBO5 presentó demandas de oxígeno por debajo del límite de detección del método de análisis, <1,89 mgO2/L que son inferiores a cualquier tipo de restricción. La relación DBO/DQO<0,2, lo que hace suponer que estas estaciones reciben escorrentías y/o vertidos inorgánicos, imposible de depurar de forma biológica.

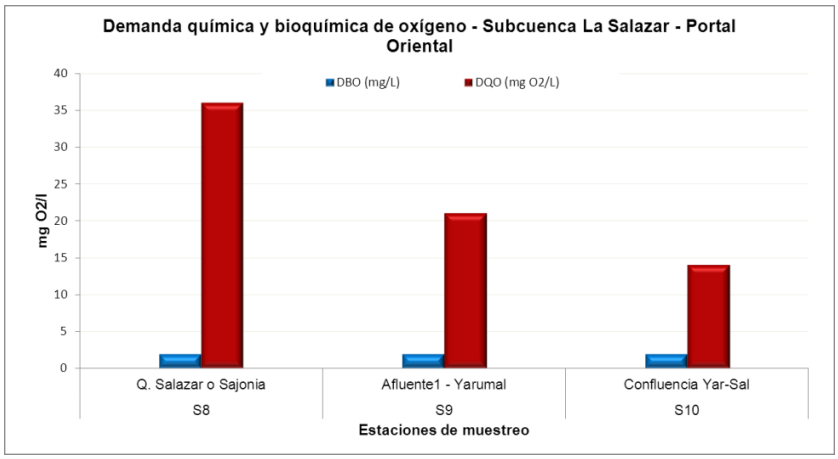



Figura 3-158 - Contaminación orgánica, DBO (mg/L) y DQO (mg O2/L) Q. La Salazar –Portal Oriental.

Todas las estaciones de la quebrada tienen presencia de coliformes totales y fecales. Los coliformes fecales son una fracción de los coliformes totales e indican la presencia de heces animales y humanas en el agua por vertido de aguas residuales, uso de fertilizantes orgánicos (gallinaza y porquinaza) o por escorrentía de explotaciones pecuarias y por lo tanto evidencian la posibilidad de microorganismo patógenos para humanos y animales, bien sea por contacto o por vía digestiva. Los puntos presentan contaminación fecal igual o por encima de 200 NMP/100 ml que restringe estas aguas para su uso pecuario, recreación primaria (contacto directo) y preservación de la flora y la fauna. Las estaciones S9 Afluente 1 Yarumal y S10 Confluencia Salazar Yarumal tienen restricciones para usarse en tratamiento convencional del agua por tener más de 20.000 coliformes totales

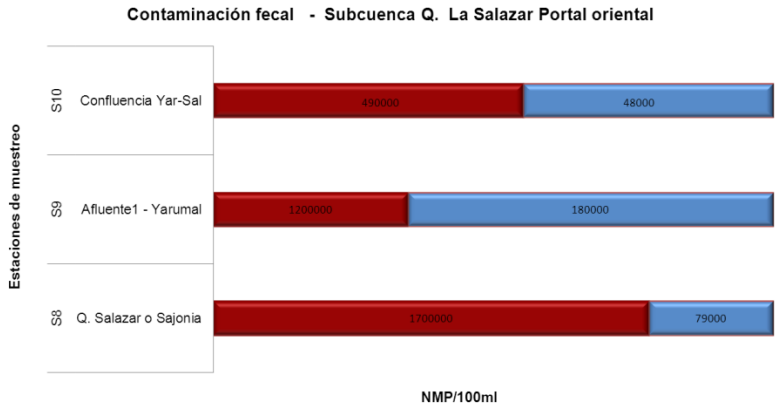


Figura 3-159 - Contaminación fecal Q. La Salazar Portal Oriental.

**Indice de calidad de agua de la Subcuenca.**

S8 Quebrada Salazar, presenta turbidez, concentraciones de fósforo tendientes a la eutrofia, alta DQO y contaminación fecal, sin embargo los ICAfa presentan condiciones de agua buena y media.

Tabla 3-82 - Calidad de Agua para las estaciones de la Cuenca Rionegro Portal Oriental.

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Q. Salazar o Sajonia portal oriental | S8 | 7,02 | 36,00 | 1,89 | 4,23 | 2,706 | 37,8 | 95,1 | 79000 | 1 | 0,000 | 1 | 1 | 0,929 | 0,951 | 0,401 | 0,25 | 0,78 | Buena |
| Afluente1 - Yarumal | S9 | 8,40 | 21,00 | 1,89 | 20 | 3,293 | 27,1 | 65 | 180000 | 0,813 | 0,001 | 1 | 0,96 | 0,954 | 0,650 | 0,000 | 0,25 | 0,62 | Media |
| Confluencia Yarumal- Salazar | S10 | 6,70 | 14,00 | 1,89 | 189 | 0,539 | 56,2 | 72 | 48000 | 0,857 | 0,009 | 1 | 0,453 | 0,878 | 0,720 | 0,51 | 0,50 | 0,68 | Media |

Fuente: Consorcio Siga-Plyma

### 3.2.5.3 Calidad del agua Área de Influencia Directa Local

#### 3.2.5.3.1 Cuenca Santa Elena- Àrea de Influencia Local

Estos corresponden a los puntos incluidos dentro del área de influencia local de la cuenca Santa Elena, dos Subcuencas, San Ignacio y San pedro y sus Afluentes.

Los resultados de las variables fisicoquímicas in situ y ex situ de los puntos seleccionados de la cuenca Santa Elena se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 3-83 - Resultados de los análisis fisicoquímicos in situ y ex situ en las estaciones del área de influencia directa local del túnel, subcuenca de la Quebrada Santa Elena.

| Estaciones | SE1 | SE2 | SE3 | SE4 | SE5 | SE6 | SE7 | SE8 | SE9 | SE10 | SE11 | SE12 | SE13 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Variable | Q. Cerro Verde | Afloramiento Q. Santa Elena | El cedro | El cedro I | Quebrada Sta Elena | Q. La escorrentía. | Q. Santa Elena | Q. La Avicola | Q. Santa Teresa | Q. Paysandú 1 | Q. Paysandú | Q. La torre | Qebrada Santa Lucia |
| Coordenada X | 843705 | 843492 | 843463 | 843607 | 843134 | 843512 | 842961 | 842827 | 842719 | 842074 | 842294 | 842529 | 842138 |
| Coordenada Y | 1176926 | 1176935 | 1177258 | 1177527 | 1177780 | 1177955 | 1178433 | 1178541 | 1179069 | 1178657 | 1178898 | 1179231 | 1179223 |
| Coordenada Z | 2605 | 2478 | | 2608 | 2561 | 2588 | 2557 | 2549 | 2577 | 2553 | 2580 | 2572 | 2548 |
| T agua(°C) | 15,2 | 15,7 | 15,9 | 17,3 | 16,3 | 13,7 | 15 | 13 | 14,5 | 15,3 | 15 | 14,3 | 14,5 |
| Oxígeno Disuelto (mg/l) | 6,07 | 5,22 | 5,74 | 4,79 | 4,25 | 6,64 | 5,87 | 6,93 | 7,30 | 6,30 | 5,24 | 5,15 | 5,13 |
| Saturación de Oxigeno (%) | 83,7 | 72,6 | 79,7 | 68,3 | 58,6 | 88,8 | 80,7 | 87,2 | 38 | 86,4 | 72 | 67,6 | 69 |
| Conductividad (µS/cm) | 23 | 42 | 46 | 30 | 40 | 20 | 54 | 32 | 18 | 227 | 175 | 22 | 66 |
| pH | 6,8 | 6,61 | 6,69 | 6,92 | 6,9 | 6,67 | 6,96 | 6,82 | 6,92 | 7,09 | 7,3 | 7,01 | 6,8 |
| Oxiqeno Disuelto (mg $O_2$/L) | 7,53 | 7,28 | 7,58 | 7,21 | 7,27 | 6,11 | 7,54 | 7,53 | 7,66 | 7,61 | 7,26 | 7,01 | 7,54 |
| DBO (mg/L) | 1,89 | 1,89 | 1,89 | 1,89 | 1,89 | 1,89 | 1,89 | 1,89 | 1,89 | 1,89 | 1,89 | 1,89 | 1,89 |
| DQO (mg $O_2$/L) | 5,5 | 16 | 2,46 | 16 | 2,46 | 3,4 | 12 | 10 | 19 | 32 | 31 | 2,46 | 12 |
| Turbiedad (N.T.U) | 3,27 | 5,05 | 2,67 | 7,89 | 1,52 | 1,8 | 8,43 | 7,47 | 12 | 21,7 | 12,1 | 1,6 | 5,42 |
| Alcalinidad Total (mg $CaCO_3$/L) | 9,5 | 22 | 11,5 | 19 | 23,50 | 15,5 | 14 | 13,5 | 7,5 | 37 | 33 | 17 | 32,5 |
| Acidez Total (mg $CaCO_3$/L) | 4 | 5 | 3 | 5 | 3 | 6 | 5 | 3 | 3 | 6 | 4,00 | 8 | 3 |
| Amonio (mg $NH^{4+}$/l) | 0,06 | 0,103 | 0,06 | 0,06 | 0,06 | 0,06 | 0,095 | 0,06 | 0,06 | 0,06 | 0,06 | 0,06 | 0,06 |
| Nitritos (mg $NO^{2-}$/L) | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,065 | 0,05 | 0,055 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,06 | 0,05 | 0,05 |
| Nitratos (mg $NO^{3-}$/L) | 0,416 | 0,594 | 1,787 | 3,949 | 1,280 | 0,736 | 1,714 | 0,648 | 0,250 | 1,324 | 1,519 | 0,250 | 0,283 |
| Fósforo Total (mg P/L) | 0,065 | 0,998 | 0,065 | 2,184 | 2,047 | 1,854 | 0,065 | 0,065 | 0,065 | 0,065 | 0,065 | 0,320 | 0,116 |
| Potasio (mg $K^+$/L) | 0,9 | 0,9 | 0,947 | 0,900 | 0,9 | 0,900 | 1,606 | 0,906 | 0,900 | 2,958 | 2,320 | 0,9 | 0,905 |
| HierroTotal (mg Fe/L) | 0,189 | 1,107 | 0,388 | 0,770 | 0,734 | 0,617 | 0,923 | 0,709 | 3,566 | 7,240 | 1,505 | 0,173 | 1,199 |
| Sólidos Totales (mg ST/L) | 27 | 64 | 40 | 100 | 101 | 100 | 78 | 27 | 70 | 136 | 176 | 33 | 70 |
| Sólidos DisueltosTotales (mg SDT/L) | 25 | 50 | 36 | 77 | 94 | 96 | 56 | 10 | 38 | 58 | 112 | 31 | 69 |

| Estaciones | SE1 | SE2 | SE3 | SE4 | SE5 | SE6 | SE7 | SE8 | SE9 | SE10 | SE11 | SE12 | SE13 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Variable | Q. Cerro Verde | Afloramiento Q. Santa Elena | El cedro | El cedro I | Quebrada Sta Elena | Q. La escorrentía. | Q. Santa Elena | Q. La Avicola | Q. Santa Teresa | Q. Paysandú 1 | Q. Paysandú | Q. La torre | Qebrada Santa Lucia |
| Sólidos Suspendidos Tótales (mg SST/L) | 4,23 | 13 | 4,8 | 23 | 6 | 4,23 | 22 | 19 | 31 | 78 | 64 | 4,23 | 4,23 |
| Sólidos Sedimentables (mg/L) | 0 | 0,1 | 0 | 0,2 | 0,0 | 0 | 0,4 | 0,2 | 0,7 | 0,8 | 0,8 | 0 | 0 |
| Sulfatos (mg $SO4^{-2}$ /L) | 1,713 | 1,873 | 2,606 | 1,582 | 2,399 | 1,250 | 2,750 | 1,826 | 1,525 | 4,090 | 4,264 | 1,817 | 0,066 |
| Cloruros (mg $Cl^{-}$/L) | 1,442 | 1,305 | 2,247 | 3,009 | 29,794 | 1,427 | 2,427 | 1,561 | 1,318 | 8,431 | 7,929 | 1,250 | 2,525 |
| Grasasv/o Aceites(mg Grasas y Aceites/L) | 9,32 | 12 | 9,32 | 9,32 | 9,32 | 9,32 | 9,32 | 9,32 | 9,32 | 9,32 | 20 | 9,32 | 9,32 |
| Fenoles (mg $C_6H_6$/L) | 0,013 | 0,001 | 0,004 | 0,001 | 0,001 | 0,001 | 0,006 | 0,002 | 0,004 | 0,008 | 0,01 | 0,006 | 0,001 |
| Detergentes (mg SAAM/L) | 0,05 | 0,091 | 0,053 | 0,094 | 0,068 | 0,059 | 0,094 | 0,071 | 0,138 | 0,126 | 0,141 | 0,065 | 0,05 |
| Dureza Calcica (mg $CaCO_3$/L) | 5,264 | 7,708 | 6,925 | 7,699 | 10,960 | 5,425 | 8,104 | 8,034 | 3,433 | 8,448 | 9,914 | 7,323 | 8,408 |
| Dureza Magnésica (mg $CaCO_3$//L) | 3,706 | 3,771 | 3,943 | 3,706 | 8,105 | 3,706 | 5,177 | 3,813 | 3,706 | 23,035 | 20,764 | 6,573 | 16,990 |
| Cobre (mg Cu/L) | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,02 |
| Cadmio (mg Cd/L) | 0,003 | 0,003 | 0,003 | 0,003 | 0,003 | 0,003 | 0,003 | 0,003 | 0,003 | 0,003 | 0,003 | 0,003 | 0,003 |
| Plomo (mg Pb/L) | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 |
| Zinc (mg Zn/L) | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,02 |
| Cromo Total (mg Cr/L) | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 |
| Cromo Hexavalente (mg Cr(VI)/L) | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 |
| Coliformes Totales (NMP/100 ml) | 2420 | 24200 | 2420 | 11200 | 24200 | 1920 | 24200 | 24200 | 3260 | 24200 | 24200 | 9900 | 8400 |
| Coliformes Fecales (NMP/100 ml) | 91 | 24200 | 308 | 170 | 1380 | 11 | 9210 | 14140 | 190 | 2250 | 13000 | 600 | 2800 |

Fuente: Elaboración propia Consorcio Siga-Plyma

Tabla 3-84 - Resultados de los análisis fisicoquímicos in situ y ex situ en las estaciones del área de influencia directa local del túnel, subcuenca de la Quebrada Santa Elena.

| Estaciones | SE14 | SE15 | SE16 | SE17 | SE18 | SE19 | SE20 | SE21 | SE22 | SE25 | SE26 | SE27 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Variable | Q. Santa Elena | Q. El Yarumo | Confluencia El Yarumo - Las Antenas | Q. El Placer Parte Alta | Quebrada el placer (aguas abajo) | Quebrada Sta Elena | Q. Santa Barbara Parte Alta | Q. La Espadera | Q. La Bisarrra | Q. Chiqueros | La Cascada | Q. Santa Elena |
| Coordenada X | 842212 | 842953 | 842412 | 843005 | 842383 | 842116 | 842360 | 840250 | 840461 | 842516 | 841274 | 840638 |
| Coordenada Y | 1179498 | 1179409 | 1179625 | 1179910 | 1179949 | 1179903 | 1180570 | 1178287 | 1178596 | 1181354 | 1180513 | 1180748 |
| Coordenada Z | 2540 | 2610 | 2550 | 2594 | 2544 | 2439 | 2533 | 2640 | 2627 | 2574 | 2111 | 1937 |
| T agua(°C) | 15 | 14 | 15,1 | 16 | 15 | 13,5 | 14,6 | 14 | 15 | 16 | 14,2 | 14 |
| Oxígeno Disuelto (mg/l) | 6,52 | 6,34 | 6,22 | 3,44 | 6,78 | 7,32 | 6,68 | 6,33 | 7,68 | 5,42 | 7,93 | 8,16 |
| Saturación de Oxigeno (%) | 87,2 | 86,2 | 85,6 | 51,1 | 89,7 | 95,8 | 89,6 | 87,7 | 86,5 | 75,1 | 101,8 | 105,6 |
| Conductividad (µS/cm) | 42 | 17 | 87 | 76 | 68 | 68 | 51 | 123 | 163 | 51 | 71 | 103 |
| pH | 7,25 | 7,13 | 6,96 | 7,31 | 7,5 | 7,12 | 7,54 | 7,18 | 7,16 | 7,3 | 7,24 | 7,31 |
| Oxiqeno Disuelto (mg $O_2$/L) | 7,74 | 7,62 | 7,42 | 7,23 | 7,44 | 7,47 | 7,56 | 7,43 | 7,54 | 7,01 | 7,99 | 7,79 |
| DBO (mg/L) | 1,89 | 1,89 | 1,89 | 1,89 | 1,89 | 1,89 | 1,89 | 1,89 | 1,89 | 1,89 | 1,89 | 1,89 |
| DQO (mg $O_2$/L) | 29 | 47 | 2,46 | 24 | 13 | 16 | 21 | 41 | 27 | 2,46 | 15 | 2,46 |
| Turbiedad (N.T.U) | 56,6 | 6,86 | 2,84 | 6,73 | 2,43 | 4,44 | 1,1 | 3,56 | 20,1 | 10,5 | 1,44 | 4,67 |
| Alcalinidad Total (mg $CaCO_3$/L) | 24 | 13 | 22,5 | 26 | 16,5 | 20 | 24,5 | 47 | 60 | 21 | 24 | 33,5 |
| Acidez Total (mg $CaCO_3$/L) | 3 | 4 | 4 | 5 | 2 | 3 | 3 | 3 | 5 | 6 | 2 | 3 |
| Amonio (mg $NH^{4+}$/l) | 0,063 | 0,06 | 0,06 | 0,06 | 0,06 | 0,06 | 0,06 | 0,085 | 0,095 | 0,06 | 0,06 | 0,06 |
| Nitritos (mg $NO^{2-}$/L) | 0,05 | 0,05 | 0,054 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,158 | 0,05 | 0,05 | 0,05 |
| Nitratos (mg $NO^{3-}$/L) | 0,645 | 0,465 | 1,575 | 0,707 | 0,626 | 1,574 | 0,718 | 3,249 | 4,365 | 1,027 | 1,782 | 2,056 |
| Fósforo Total (mg P/L) | 2,169 | 1,190 | 1,926 | 3 | 1,853 | 2,409 | 0,065 | 3,259 | 1,932 | 0,123 | 0,065 | 0,065 |
| Potasio (mg $K^+$/L) | 0,9 | 0,9 | 1,286 | 1,128 | 0,900 | 1,100 | 0,900 | 1,945 | 2,345 | 0,900 | 1,046 | 1,030 |
| HierroTotal (mg Fe/L) | 4,284 | 1,835 | 0,377 | 2,938 | 0,474 | 0,408 | 0,163 | 0,224 | 2,958 | 0,857 | 0,291 | 1,041 |
| Sólidos Totales (mg ST/L) | 175 | 74 | 83 | 120 | 71 | 81 | 48 | 98 | 155 | 79 | 56 | 80 |
| Sólidos DisueltosTotales (mg SDT/L) | 97 | 40 | 82 | 99 | 68 | 77 | 48 | 95 | 112 | 61 | 53 | 70 |
| Sólidos Suspendidos Tótales (mg SST/L) | 78 | 34 | 4,23 | 21 | 4,23 | 4,23 | 4,23 | 4,23 | 42 | 18 | 4,23 | 11 |
| Sólidos Sedimentables (mg/L) | 0,5 | 0,7 | 0 | 0,2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,2 | 0 | 0 | 0 |

| Estaciones | SE14 | SE15 | SE16 | SE17 | SE18 | SE19 | SE20 | SE21 | SE22 | SE25 | SE26 | SE27 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Variable | Q. Santa Elena | Q. El Yarumo | Confluencia El Yarumo - Las Antenas | Q. El Placer Parte Alta | Quebrada el placer (aguas abajo) | Quebrada Sta Elena | Q. Santa Barbara Parte Alta | Q. La Espadera | Q. La Bisarrra | Q. Chiqueros | La Cascada | Q. Santa Elena |
| Sulfatos (mg $SO4^{-2}$ /L) | 1,722 | 1,347 | 4,240 | 5,876 | 1,896 | 3,838 | 1,814 | 6,295 | 8,068 | 1,592 | 3,867 | 5,116 |
| Cloruros (mg $Cl^{-}$/L) | 1,560 | 1,250 | 5,064 | 3,388 | 2,177 | 4,415 | 2,191 | 3,130 | 4,170 | 2,435 | 4,721 | 7,418 |
| Grasasv/o Aceites(mg Grasas y Aceites/L) | 9,32 | 9,32 | 9,32 | 9,32 | 9,32 | 9,32 | 9,32 | 9,32 | 9,32 | 9,32 | 9,32 | 9,32 |
| Fenoles (mg $C_6H_6$/L) | 0,001 | 0,006 | 0,001 | 0,001 | 0,001 | 0,001 | 0,001 | 0,001 | 0,001 | 0,001 | 0,001 | 0,001 |
| Detergentes (mg SAAM/L) | 0,05 | 0,05 | 0,135 | 0,074 | 0,079 | 0,05 | 0,05 | 0,059 | 0,05 | 0,079 | 0,05 | 0,076 |
| Dureza Calcica (mg $CaCO_3$/L) | 9,184 | 4,493 | 9,844 | 12,374 | 7,683 | 9,496 | 11,198 | 7,015 | 12,235 | 9,067 | 10,626 | 11,237 |
| Dureza Magnésica (mg $CaCO_3$//L) | 9,757 | 4,130 | 10,489 | 8,332 | 6,437 | 9,908 | 8,420 | 38,957 | 42,087 | 8,234 | 10,347 | 18,721 |
| Cobre (mg Cu/L) | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,02 |
| Cadmio (mg Cd/L) | 0,003 | 0,003 | 0,003 | 0,003 | 0,003 | 0,003 | 0,003 | 0,003 | 0,003 | 0,003 | 0,003 | 0,003 |
| Plomo (mg Pb/L) | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 |
| Zinc (mg Zn/L) | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,039 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,02 |
| Cromo Total (mg Cr/L) | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 |
| Cromo Hexavalente (mg Cr(VI)/L) | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 |
| Coliformes Totales (NMP/100 ml) | 18510 | 24200 | 173310 | 24200 | 2490 | 24200 | 2110 | 242000 | 51700 | 24200 | 24200 | 24200 |
| Coliformes Fecales (NMP/100 ml) | 8160 | 360 | 24200 | 60 | 190 | 2600 | 420 | 4500 | 5100 | 1920 | 750 | 15210 |

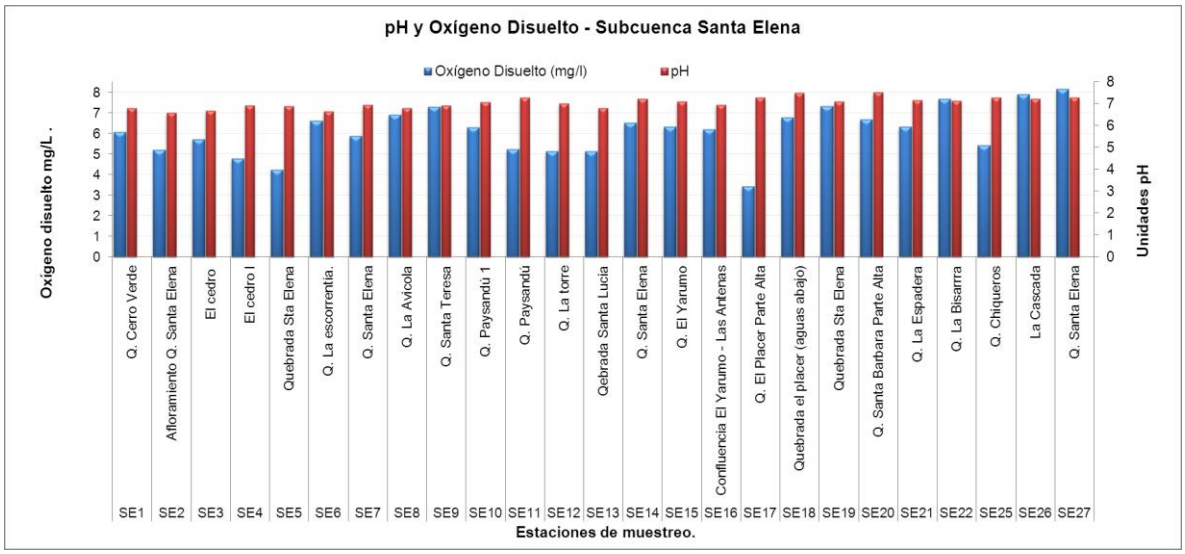
Fuente: Consorcio Siga-Plyma

La temperatura del agua de esta quebrada está dentro del rango para quebradas con esta altura sobre el nivel del mar, entre 13 y 17,3 ºC, siendo las más frías SE8 Quebrada La Avícola, SE15 Quebrada El Yarumo, SE21 Quebrada La Espadera y SE27 Confluencia La Bocaná-Santa Elena. Las estaciones con más alta temperatura son SE4 Quebrada el Cedro 1 y SE17 Quebrada El Placer Parte Alta.

En relación al oxígeno disuelto medido in situ, algunas estaciones presentan concentraciones críticas, con concentraciones <5mg/L que son el límite más bajo para sustentar la vida de los peces durante un período de tiempo prolongado. Muestra deterioro la estacion SE25 Quebrada Chiqueros, con 5,42mg/L. Las demás estaciones tienen concentraciones de oxígeno disuelto mayores de 6,0mg litro que es el límite para sostener la vida acuática. Las estaciones con mayor concentración, por encima de 7,0 mg/L son SE9 Quebrada. Santa Teresa, SE19 Quebrada Santa Elena 3, SE22 Quebrada La Bisarra; SE26 Quebrada Santa Elena-La Cascada y SE27 Confluencia La Bocaná-Santa Elena, esta última la de más alta concentración 8,16mg/L.

La saturación de oxígeno, presenta sobresaturación en las estaciones SE26 Quebrada Santa Elena-La Cascada y SE27 Confluencia La Bocaná-Santa Elena, mientras que otras estaciones están por debajo de 70% que ya indican deterioro de la calidad del agua, como S4, SE12 Quebrada La Torre y SE13 Quebrada Santa Lucia, cuya saturación está entre 60 y 70% y las más críticas SE5 Quebrada Santa Elena con 58,6%, SE9 Quebrada Santa Teresa con 38%, SE17 Quebrada El Placer Parte Alta con 51,1%.

El pH de las estaciones de la Q. Santa Elena fluctúa entre 6,61 y 7,76 unid que está dentro del rango 6,2 - 8,6unid apropiad para sostener vida silvestre, potabilizar el agua y para uso agrícola y pecuario.



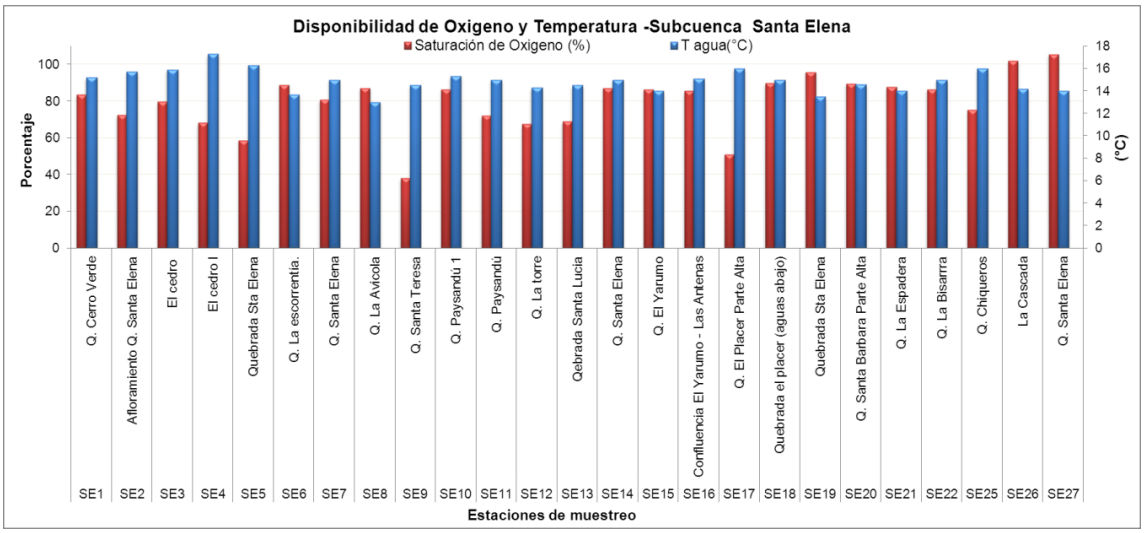



Figura 3-160 - Oxígeno, pH, Temperatura y saturación de oxígeno en las estaciones de la Q. Santa Elena y sus afluentes.

Los sólidos totales están por debajo del rango promedio de los ríos (<120 mg/L), con excepción de SE10 Quebrada Paysandú 1 con 136mg/L, SE11 Quebrada Paysandú 176mg/L y SE 22 155mg/L. Los sólidos totales están representados en su mayoría por sólidos suspendidos totales los cuales sólo alcanzan los 100mg/L en SE22 Quebrada La Bisarra. Los sólidos suspendidos son bajos, menores de 25, que es el límite superior para corrientes de montaña con calidad normal, excepto en S22 que suben a 42 mg/L y SE 15 con 34mg/l. No hay sólidos sedimentarios en muchas de las estaciones y donde se encuentran son muy bajos, menores de 0,8 mg/L.

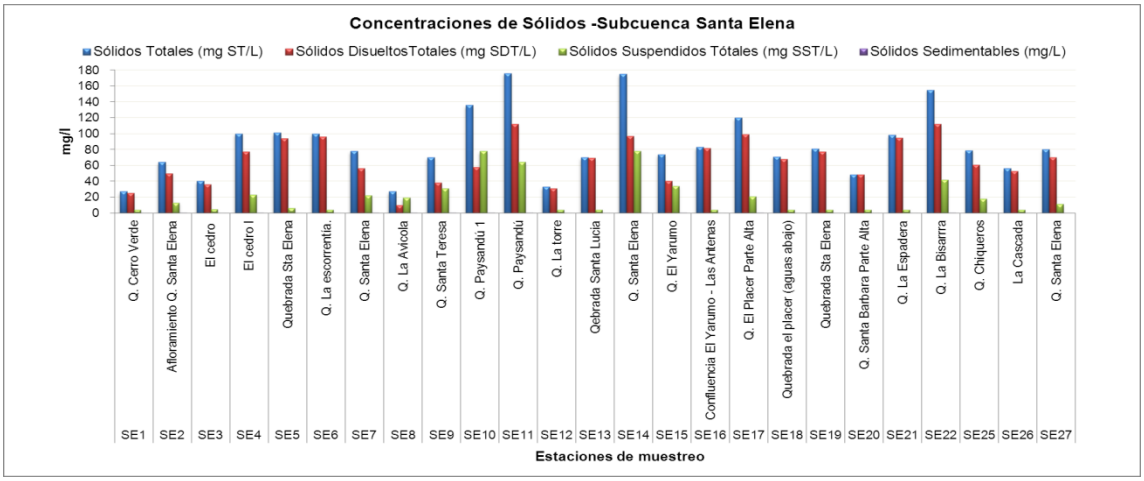



Figura 3-161 - Concentración de Sólidos en las estaciones de la Q. Santa Elena y sus afluentes. .

La turbiedad en todas las estaciones está por debajo de 10 NTU excepto en SE22 Quebrada La Bisarra que alcanza 20,1NTU, coincidiendo con las concentraciones altas de sólidos disueltos en esta estación.

La conductividad eléctrica, con excepción SE10 Quebrada Paysandú 1 (227 µS/cm), están dentro del rango de ríos neotropicales, entre 10 y 200 µS/cm. Sin embargo SE11 Quebrada Paysandú (175 µS/cm), SE21 Quebrada La Espadera (123 µS/cm), SE22 Quebrada La Bisarra (163 µS/cm), y SE27 Confluencia La Bocaná-Santa Elena (103 µS/cm) sobrepasan el rango de 10-50 µS/cm esperado para corrientes de cuenca alta sin contaminar, lo que indican que tienen mayor cantidad de sustancias disueltas en el agua.

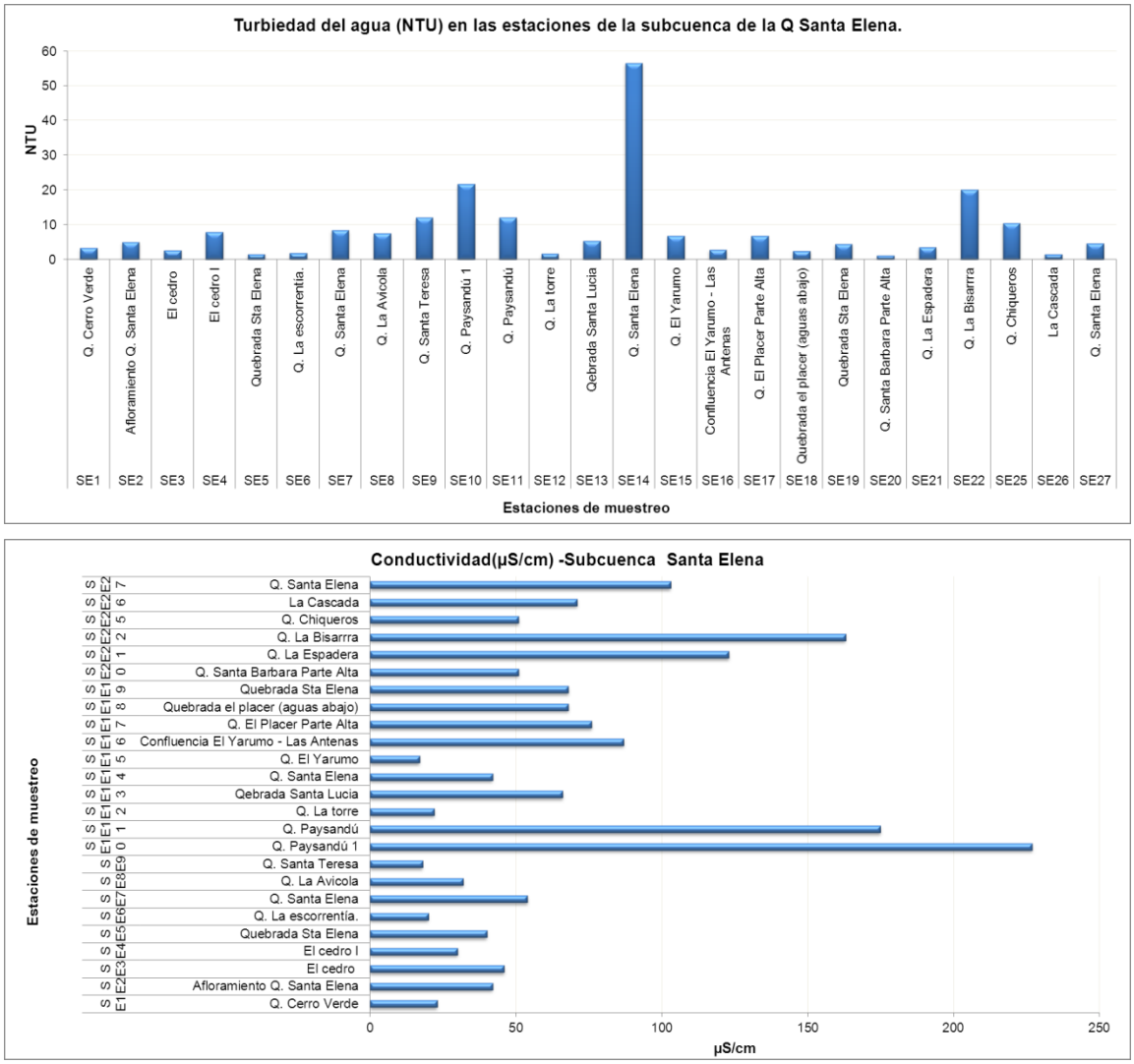



Figura 3-162 - Turbiedad y Conductividad en las estaciones de la Q. Santa Elena y sus afluentes.

La Dureza Cálcica (mg CaCO3/L), es muy baja en la mayoría de las estaciones que tienen concentraciones por debajo de 10mg/L que corresponde a aguas muy blandas, poco productivas, oligotróficas. Las estaciones SE5 Quebrada Santa Elena, SE17 Quebrada El Placer Parte Alta, SE20 Quebrada Santa Bárbara Parte Alta y SE12 Quebrada La Torre están en el rango de aguas muy blandas medianamente productivas. En cuanto a la Dureza Magnésica (mg CaCO3//L) la mayoría de las estaciones tienen concentraciones muy bajas, por debajo de 30 mg/L, por el contrario, en las estaciones SE21 Quebrada La Espadera y SE22 Quebrada La Bisarra, las concentraciones

sobrepasan los 30 mg/l valor óptimo, pero sin llegar a concentraciones inconvenientes para la salud (38,9-74,7 mg/L). De acuerdo con la dureza total las estaciones SE1 Quebrada Cerro Verde, SE4 Quebrada el Cedro 1, SE6 Quebrada La Escorrentía, SE9 Quebrada Santa Teresa y SE15 Quebrada El Yarumo son poco productivas, blandas y oligotróficas porque su valor es menor de 10 mg/L; mientras que las estaciones SE10 Quebrada Paysandú 1, SE11 Quebrada Paysandú, SE21 Quebrada La Espadera, SE22 Quebrada La Bisarra,y SE27 Confluencia La Bocaná-Santa Elena son productivas, pero sólo SE22 Quebrada La Bisarra (54,2mg/L), tienen aguas medianamente duras, > 50 mg/L. Las demás estaciones son de productividad media y aguas blandas.

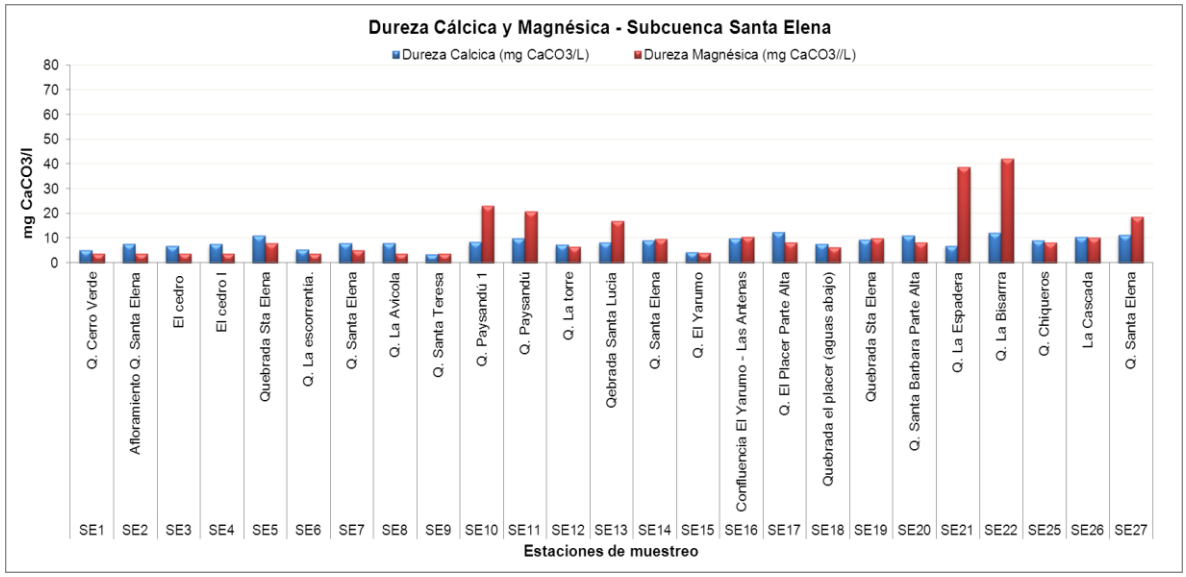



Figura 3-163 - Dureza cálcica y magnésica en las estaciones de la Q. Santa Elena y sus afluentes.

La Alcalinidad Total (mg CaCO3/L) de la mayoría de las estaciones de la Q. Santa Elena presentan valores menores de 25mg/L que corresponden a corrientes de alta montaña, mientras que SE11 Quebrada Paysandú, SE13 Quebrada Santa Lucia, SE26 Quebrada Santa Elena-La Cascada, SE21 Quebrada La Espadera, SE22 Quebrada La Bisarra, y SE27 Confluencia La Bocaná-Santa Elena están dentro del rango aguas naturales de sistemas montañosos (entre 10-60 mg/L). Con los valores de pH que presenta la quebrada, entre 6,6 y 7,66 unid se asume que la alcalinidad corresponde a carbonatos y bicarbonatos. La acidez total en estas quebradas es baja (entre 2,0 -8,0 mg/L) por lo que se asume que la acidez se debe casi exclusivamente al $CO_2$, es decir,, que la acidez es carbonácea y no mineral.

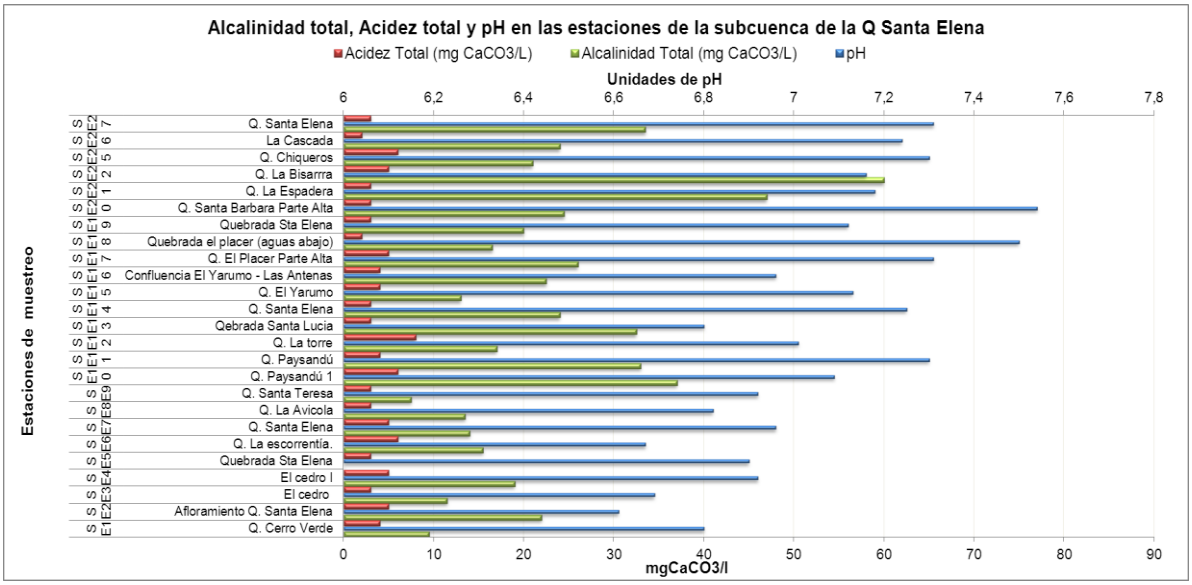


Figura 3-164 - Alcalinidad Total y Acidez Total en las estaciones de la Q. Santa Elena y sus afluentes.

En relación a los nutrientes, el Fósforo Total (mg P/L), en las estaciones SE1 Quebrada Cerro Verde, SE3 Quebrada El Cedro, SE8 Quebrada La Avícola, SE9 Quebrada Santa Teresa, SE10 Quebrada Paysandú 1. SE11 Quebrada Paysandú, SE19 Quebrada Santa Elena 3, SE22 Quebrada La Bisarra, SE26 Quebrada Santa Elena-La Cascada y SE27 Confluencia La Bocaná-Santa Elena, el análisis está en el límite de detección del método de análisis (<0,065mg/L) por lo que no es posible saber si el parámetro está por encima del límite superior para los diferentes usos del agua (0,03mg/L). Por otra parte, las demás estaciones en esta cuenca presentan concentraciones de fósforo total entre 0,081 y 0,998 mg/L, SE2 Afloramiento Quebrada Santa Elena, SE12 Quebrada La Torre, SE13 Quebrada Santa Lucia y SE25 Quebrada Chiqueros, y de acuerdo a eso se consideran eutróficas, mientras que SE4 Quebrada el Cedro 1, SE5 Quebrada Santa Elena, SE6 Quebrada La Escorrentía, SE14 Quebrada Santa Elena 2, SE15 Quebrada El Yarumo, SE16 Confluencia El Yarumo y Las Antenas, SE17 Quebrada El Placer Parte Alta, SE18 Quebrada El Placer Aguas Abajo, SE19 Quebrada Santa Elena 3, SE21 Quebrada La Espadera y SE22 Quebrada La Bisarra, cuyas concentraciones de fósforo total están dentro del rango 1,19 - 3,26 mg/L, son mayores de 1,0mg/L límite inferior para la hipereutrófica. Todas las estaciones presentan contaminación fecal por lo que sus aguas deben recibir aguas de escorrentía de potreros, explotaciones pecuarias o aguas residuales domésticas y en la región se utilizan fertilizantes y abonos en cultivos y potreros. Los Detergentes (mg SAAM/L), que además de ser tensoactivos se relacionan con las concentraciones de fósforo, presentan en todas las estaciones concentraciones por debajo de 0,5 mg/l que es el límite para diferentes usos del agua y por debajo de 0,143 mg/L que es el límite para la conservación de la vida acuática, excepto en SE19 Quebrada Santa Elena 3, cuya concentración alcanza los 0,147 mg/L.

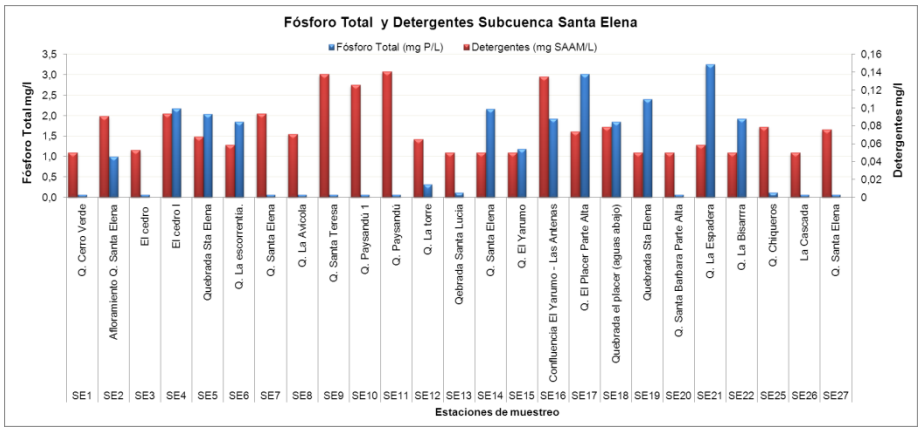



Figura 3-165 - Detergentes y fósforo total en las estaciones de la Q. Santa Elena y sus afluentes. .

Los nitratos (mg NO3-/L), la forma biodisponible del nitrógeno, están dentro de un rango de 0,41 - 4,21 mg/L, inferior al límite de uso de 10mg/L para diferentes usos del agua. Las estaciones con mayores concentraciones de nitratos es la SE22 Quebrada La Bisarra. Los nitritos (mg NO2- /L), la forma que rápidamente se convierte a nitratos en estas corrientes bien oxigenadas, exceptuando a SE5 Quebrada Santa Elena (0,065 mg/L) y SE22 Quebrada La Bisarra (0,158 mg/L) no superan en ninguna estación el límite de detección del método de análisis utilizado de 0,05 mg/L, que están por debajo de las concentraciones recomendadas para diferentes usos de 1,0mg/L. El nitrógeno amoniacal (mg NH4+ /l) también es muy bajo, con excepción de SE2 Afloramiento Quebrada Santa Elena (0,103 mg/L), en las demás estaciones las concentraciones límite para diferentes usos y para la conservación de la vida silvestre, 1,0mg/L y 0,1mg/L respectivamente.

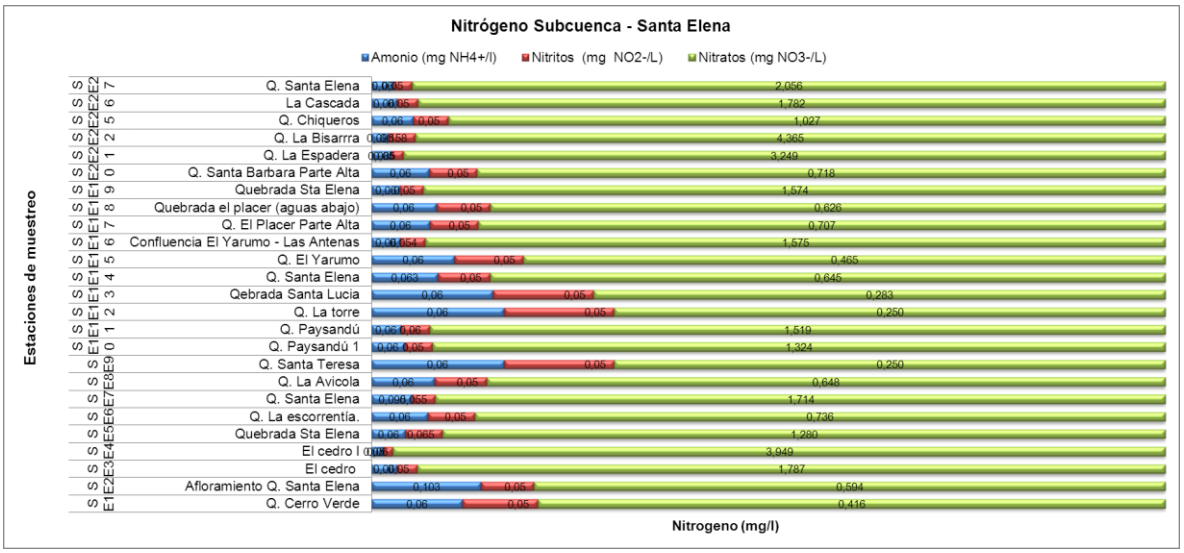



Figura 3-166 - Nitrógeno en las estaciones de la Q. Santa Elena y sus afluentes.

Se observa que el potasio (mg K+/L) en todas las estaciones tiene concentraciones menores de 10 mg/L que es lo esperado para aguas naturales superficiales. La presencia de hierro es un problema de calidad del agua muy común en esta región donde los suelos son ricos en este elemento. El agua aún con una pequeña cantidad de hierro puede tornarse rojiza por su exposición al aire y especialmente cuando su pH está por encima de 7,5 unid. Aunque no es tóxico, la coloración y el

sabor se transforma en problema cuando la concentración es mayor que 0,3 mg/L. Exceptuando las estaciones SE1 Quebrada Cerro Verde, SE5 Quebrada Santa Elena, SE12 Quebrada La Torre, SE20 Quebrada Santa Bárbara Parte Alta y SE26 Quebrada Santa Elena-La Cascada, en las demás estaciones se supera el límite de 0,3 mg/L que es el límite para recreación, contacto y consumo, sólo en SE2 Afloramiento Quebrada Santa Elena (1,1 mg/L), SE9 Quebrada Santa Teresa (3,56 mg/L),SE19 Quebrada Santa Elena 3 (7,24 mg/L), SE11 Quebrada Paysandú (1,5 mg/L), SE 13 (1,19 mg/L), SE14 Quebrada Santa Elena 2 (4,28 mg/L), SE15 Quebrada El Yarumo (1,83 mg/L), SE17 Quebrada El Placer Parte Alta (2,93 mg/L), SE22 Quebrada La Bisarra (2,95 mg L) y SE27 Confluencia La Bocaná-Santa Elena (1,03 mg/L) se supera la concentración de 1,0 mg/L ideal para la conservación de la vida acuática; en SE10 Quebrada Paysandú 1 se supera el límite de 5,0 para uso agrícola. Los sulfatos (mg SO4-/L) tienen concentraciones muy bajas en todas las estaciones, entre 1,25 - 7,8 mg/L, cuando el límite para aguas naturales, recreación y para potabilizar está en 250 mg/L. Los cloruros (mg Cl-/L) son bajos en todas las estaciones, entre 1,25 -29,79 mg/L pues la concentración en aguas dulces no debe superar el rango 10-250mg/L; la concentración más alta se presentó en SE5 Quebrada Santa Elena.

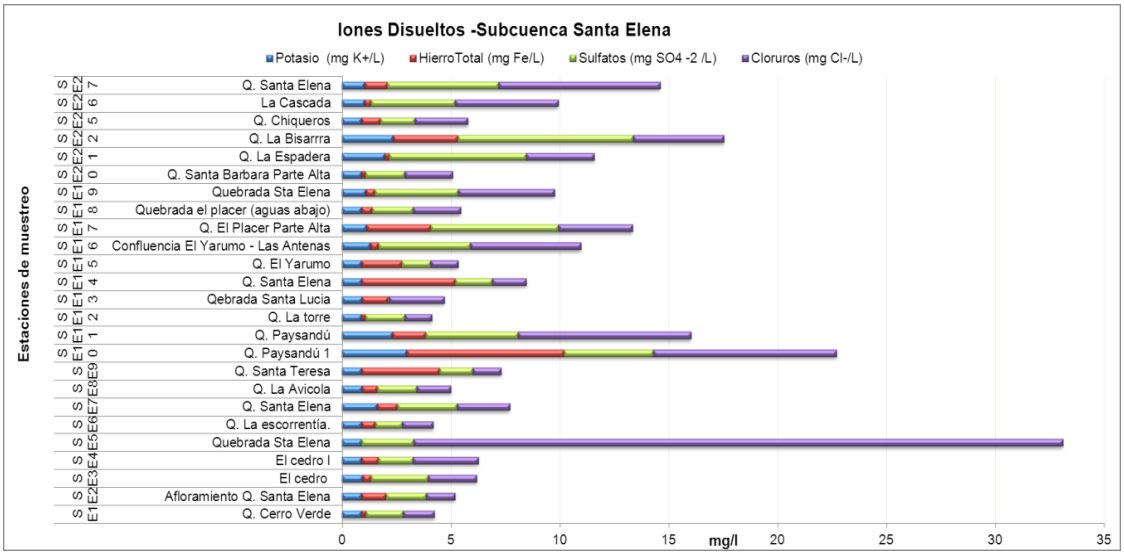



Figura 3-167 - Iones disueltos en el agua en las estaciones de la Q. Santa Elena y sus afluentes.

También se analizaron otras sustancias disueltas en el agua y metales pesados. Los fenoles en la mayoría de las estaciones están por debajo del límite de detección del método, <0,001 mg/L; las estaciones SE1 Quebrada Cerro Verde (0,013), SE3 Quebrada El Cedro (0,004mg/L), SE7 Confluencia San Ignacio-Santa Elena (0,006 mg/L), SE9 Quebrada Santa Teresa (0,004 mg/L), SE10 Quebrada Paysandú 1 (0,008), SE11 Quebrada Paysandú (0,01mg/L), SE12 Quebrada La Torre (0,006 mg/L y SE15 Quebrada El Yarumo (0,006 mgL) sobrepasan el límite de 0,002 para aguas destinadas a tratamiento para uso doméstico, contacto primario y uso pecuario, pero no superan el 1,0 mg/L para preservación de la vida silvestre; las concentraciones elevadas de fenoles pueden provenir de aguas residuales o industriales, de descomposición de materia orgánica o de plaguicidas. Las concentraciones de los demás metales pesados, estuvieron por debajo del límite de detección del método de análisis, Cobre 0,02mg Cu/L, Cadmio 0,003mg Cd/L, Plomo mg 0,01Pb/L, Cromo Total 0,05mg Cr/L y Cromo Hexavalente 0,05mg Cr (VI)/L, lo cual significa que no

hay concentraciones de estos iones contaminantes provenientes de la industria y de las actividades agropecuarias.

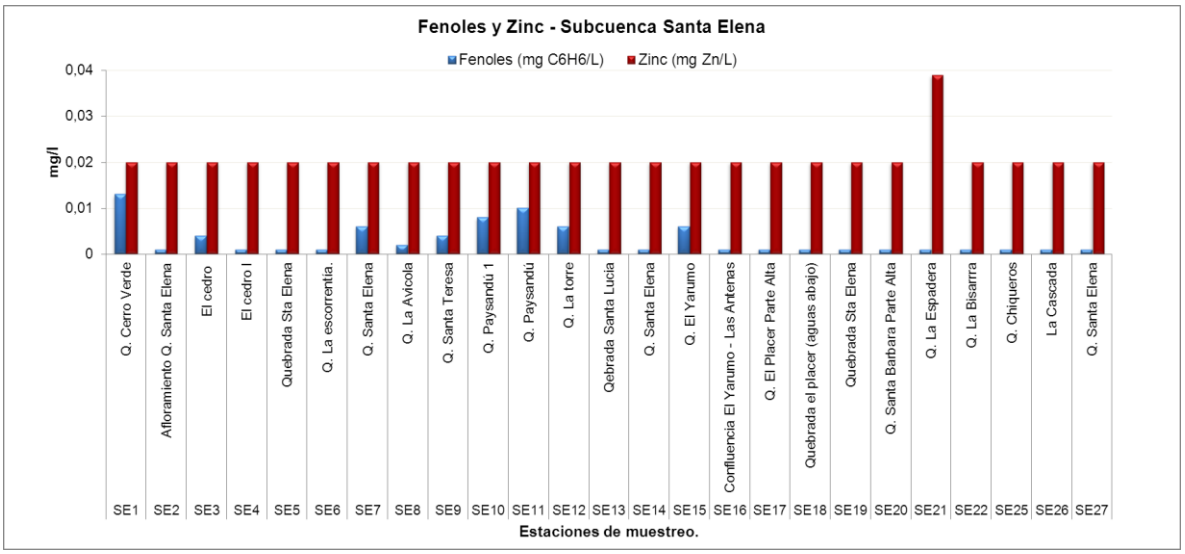



Figura 3-168 - Fenoles (mg C6H6/L) y Zinc (mg Zn/L) disueltos en el agua en las estaciones de la Q. Santa Elena y sus afluentes..

La demanda química de oxígeno, DQO, presenta valores entre <2,46 - 47 mg O2/L; excepto SE3 Quebrada El Cedro, SE5 Quebrada Santa Elena,SE12 Quebrada La Torre, SE16 Confluencia El Yarumo y Las Antenas y SE25 Quebrada Chiqueros que presentan demandas de oxígeno por debajo del límite de detección del método de análisis utilizado, <2,46 mgO2/L, las demás sobrepasan el rango para aguas superficiales no contaminadas, 1,0 -5,0 mg/L; las más altas demandas de oxígeno se presentan en SE10 Quebrada Paysandú 1 (32 mg/L), SE11 Quebrada Paysandú (31 mg/L), SE14 Quebrada Santa Elena 2 (29 mg/L), SE15 Quebrada El Yarumo (47 mg/L) SE21 Quebrada La Espadera (41 mg/L) y SE22 Quebrada La Bisarra (27 mg/L). La DBO5 presentó demandas de oxígeno por debajo del límite de detección del método de análisis, <1,89 mgO2/L que son inferiores a cualquier tipo de restricción. La relación DBO/DQO<0,2, lo que hace suponer que estas estaciones reciben escorrentías y/o vertidos inorgánicos, imposible de depurar de forma biológica.

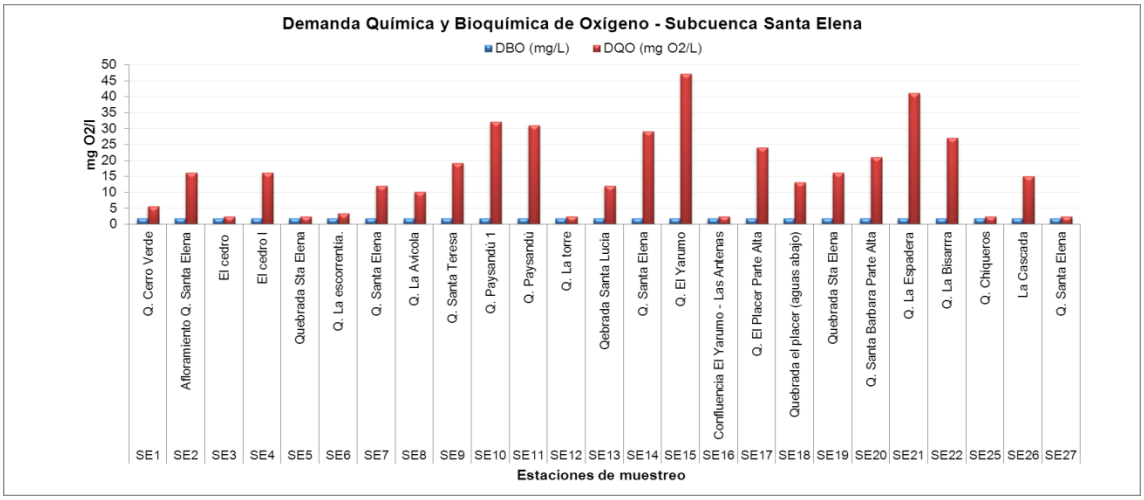



Figura 3-169 - Contaminación orgánica, medida como demanda de oxígeno, DBO (mg/L) y DQO (mg O2/L) en las estaciones de la Q. Santa Elena y sus afluentes.

En esta quebrada, con excepción de SE2 Afloramiento Quebrada Santa Elena (12 mg/L), SE11 Quebrada Paysandú (20 mg/L) que sobrepasan el límite de grasas y aceites para conservar la vida acuática y para su uso recreativo y de consumo directo, las estaciones no alcanzan el nivel de detección mínimo del método de análisis utilizado, <9,32 mg Grasas y Aceites/L, por lo tanto no se sabe si superan la concentración de 0,01 mg/L para la conservación de la fauna o están ausentes para su consumo y uso recreativo directo.

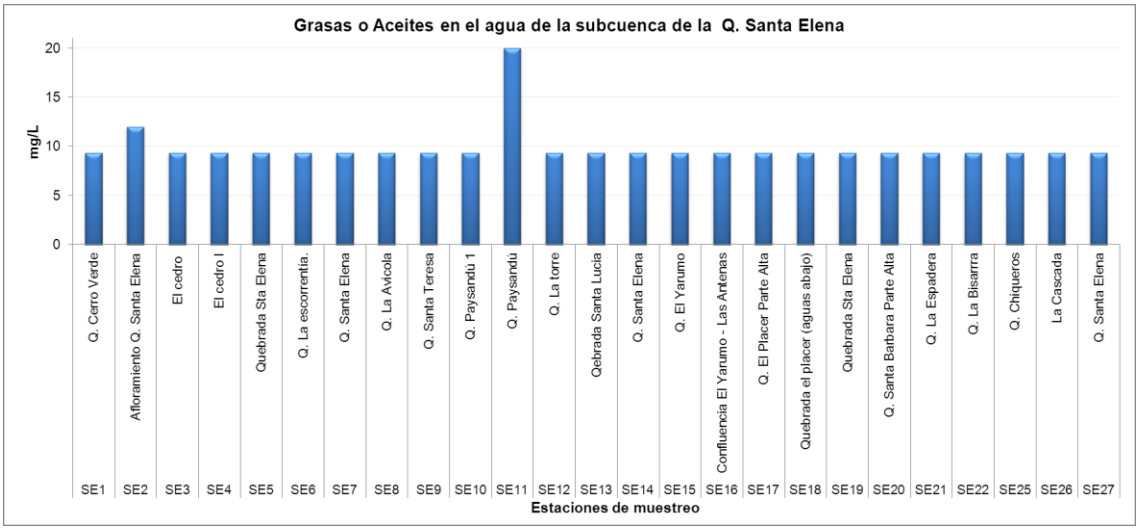



Figura 3-170 - Grasas y/o Aceites en las estaciones de la Q. Santa Elena y sus afluentes. Grasas y/o Aceites en las estaciones de la Q. Santa Elena y sus afluentes.

Todas las estaciones de la quebrada tienen presencia de coliformes totales y fecales. Los coliformes fecales son una fracción de los coliformes totales e indican la presencia de heces animales y humanas en el agua por vertido de aguas residuales, uso de fertilizantes orgánicos (gallinaza y porquinaza) o por escorrentía de explotaciones pecuarias, lo cual evidencia la posibilidad de microrganismo patógenos para humanos y animales, bien sea por contacto o por vía digestiva. Excepto las estaciones SE1 Quebrada Cerro Verde, SE4 Quebrada el Cedro 1, SE6

Quebrada La Escorrentía, SE9 Quebrada Santa Teresa, SE7 Confluencia San Ignacio-Santa Elena y SE18 Quebrada El Placer Aguas Abajo las demás presentan contaminación fecal igual o por encima de 200 NMP/100 ml que restringe estas aguas para su uso pecuario, recreación primaria (contacto directo) y preservación de la flora y la fauna. Exceptuando SE1 Quebrada Cerro Verde, SE3 Quebrada El Cedro, SE6 Quebrada La Escorrentía, SE9 Quebrada Santa Teresa, SE13 Quebrada Santa Lucia, SE18 Quebrada El Placer Aguas Abajo, y SE20 Quebrada Santa Bárbara Parte Alta las estaciones tienen restricciones para uso agrícola y contacto secundario por tener más de 5000 coliformes totales. Las estaciones de más alta contaminación, cuyos coliformes totales superan los 20.000 coliformes totales y por lo tanto sus aguas están restringidas para tratamiento convencional son SE5 Quebrada Santa Elena, SE7 Confluencia San Ignacio-Santa Elena, SE8 Quebrada La Avícola, SE10 Quebrada Paysandú 1, SE11 Quebrada Paysandú, SE14 Quebrada Santa Elena 2, SE15 Quebrada El Yarumo, SE16 Confluencia El Yarumo y Las Antenas, SE17 Quebrada El Placer Parte Alta, SE19 Quebrada Santa Elena 3, SE21 Quebrada La Espadera, SE22 Quebrada La Bisarra, SE25 Quebrada Chiqueros, SE26 Quebrada Santa Elena-La Cascada y SE27 Confluencia La Bocaná-Santa Elena.

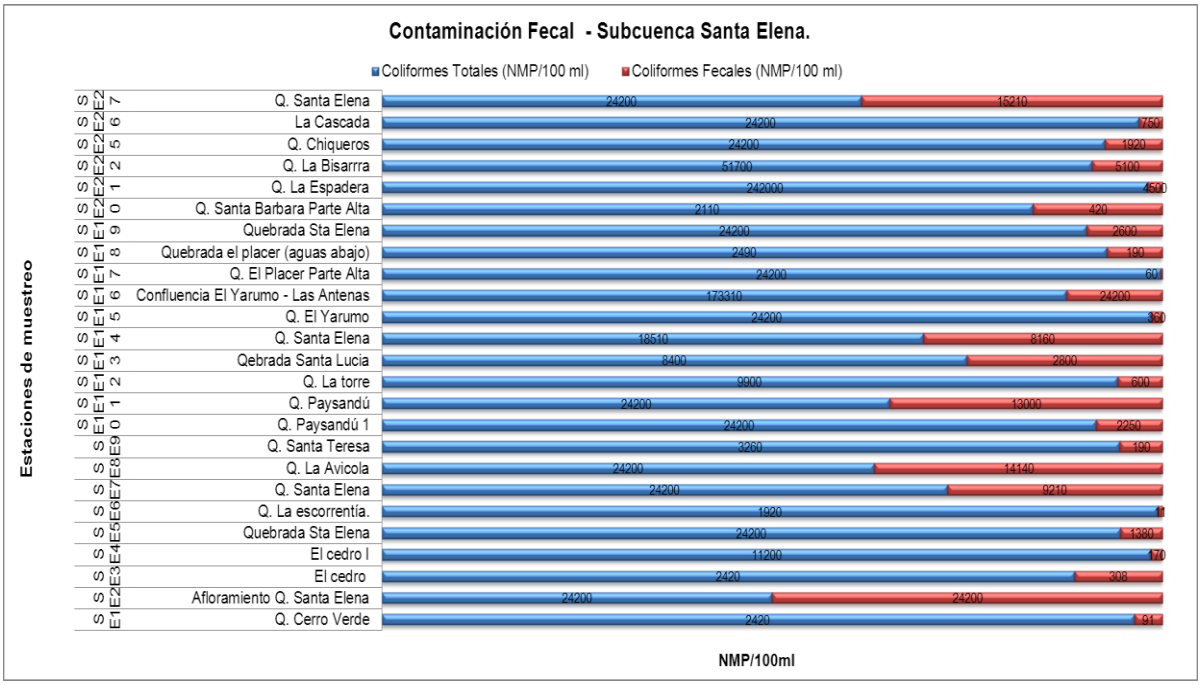



Figura 3-171 - Grasas y/o Aceites en las estaciones de la Q. Santa Elena y sus afluentes. Grasas y/o Aceites en las estaciones de la Q. Santa Elena y sus afluentes.Contaminación fecal en las estaciones de la Q. Santa Elena y sus afluentes

## Índice de calidad de agua de la Subcuenca de la Quebrada Santa Elena

En general, los ICAfa calculados en las estaciones de la parte alta de la Quebrada Santa Elena presentan calidad de agua buena, con excepción de las estaciones SE20 Quebrada Santa Bárbara Parte Alta, SE26 Quebrada Santa Elena-La Cascada que tienen excelente calidad de agua y las que tienen calidad de agua media, es decir, que tienen restricciones para contacto humano y presentan limitaciones para la vida en el agua, SE26 Quebrada Santa Elena-La Cascada, porque tiene alta contaminación fecal (173310 UFC/100ml) y S11, Q. "Paysandú", cuyas aguas también muestran contaminación fecal aunque no tan alta como S26.

En general, en la subcuenca de la Q. Santa Elena, no se presentan en el agua temperaturas extremas, El pH, en general está en el rango de 6,2 -8,6 unid. Con algunas excepciones, como la Q. Santa Teresa y la Q. El Placer, el agua está bien oxigenada, por encima del 70% de saturación.

Los sólidos totales están por debajo del rango promedio de los ríos neotropicales (<120 mg/L) y, con pocas excepciones, son más abundantes los sólidos disueltos que los suspendidos. La conductividad eléctrica, la dureza, la alcalinidad total son bajas, por lo que las aguas son blandas y poco productivas. La acidez total es baja y carbonácea.

En cuanto a los nutrientes que pueden dar lugar a eutroficación, las formas químicas de nitrógeno presentan concentraciones bajas, mientras que en la mayoría de las quebradas se presentan concentraciones de fósforo por encima de 0,03 mg/L que es el límite superior para diferentes usos del agua y en algunas estaciones las concentraciones presentan tendencia a la eutrofia. El fósforo puede provenir de aguas residuales, como indica la presencia de coliformes en el agua, o de fertilizantes y abonos que comúnmente se aplican en estas zonas a potreros y cultivos, pues hasta ahora no hay evidencia de rocas con alto contenido de fósforo en la zona.

En cuanto a los iones disueltos en el agua las concentraciones de potasio, sulfatos y cloruros fueron bajas, por el contrario la presencia de hierro en concentraciones iguales o mayores de 0,3 mg/L es común en todas las quebradas porque los suelos son ricos en este elemento.

En estas quebradas grasas, fenoles y zinc cuando las hay, tienen concentraciones muy bajas; los metales pesados (cadmio, cobre, plomo y cromo) están por debajo de los límites de detección del método de análisis, lo cual evidencia que no hay contaminación industrial, minera o por agroquímicos por lo menos en el momento de toma de las muestras.

Las concentraciones de DBO5 en la mayoría de las estaciones estuvieron por debajo del límite de detección del método de análisis, por lo que la relación DBO/DQO es <0,2, lo que hace suponer que estas estaciones reciben escorrentías y/o vertidos inorgánicos, imposible de depurar de forma biológica.

En todas las quebradas se encontraron coliformes totales y fecales que indican la presencia de heces animales y humanas en el agua por vertido de aguas residuales, uso de fertilizantes orgánicos (gallinaza y porquinaza) o por escorrentía de explotaciones pecuarias, por lo tanto limitan el uso de sus aguas por la posibilidad de microorganismos patógenos para humanos y animales, bien sea por contacto o por vía digestiva.

En la parte alta de la subcuenca Santa Elena los ICAfa indican en las estaciones de la parte alta de la Quebrada Santa Elena calidad de agua buena, con excepción de las estaciones SE20 Quebrada Santa Bárbara Parte Alta y SE26 Quebrada Santa Elena-La Cascada que tienen excelente calidad de agua. Las que presentan calidad Buena generalmente se debe a concentraciones altas de fósforo y/o contaminación fecal. SE11 Quebrada Paysandú, Q. Paysandú, tiene saturación de oxígeno muy baja y contaminación fecal alta y S16, Confluencia El Yarumo, porque tiene muy alta contaminación fecal y alta concentración de fósforo.

Tabla 3-85 - Calidad del agua en las estaciones de la Quebrada Santa Elena, parte alta.

| Nombre | No. Estación | pH (unidades pH) | DQO ( mg/L O2) | DBO5 (mg/L) | Sólidos suspendidos Totales(SST) | FOSFORO TOT (mg/L-P) | CONDUCTIVIDAD ((usiemens/cm) | % SATURACION OXIGENO | E Coli (UFC/100 mL) | IPH | IDQO | IDBO5 | Isst | Icond | I%sat | I Ecoli | I FOSFORO TOTAL (PO4) | ICA fa | DESCRIPTOR / COLOR |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Q. Cerro Verde | SE1 | 6,8 | 5,5 | 1,89 | 4,23 | 0,065 | 23 | 83,7 | 91 | 0,902 | 1 | 1 | 1 | 0,963 | 0,837 | 1 | 0,50 | 0,89 | Buena |
| "Afloramiento Q. Santa Elena" | SE2 | 6,61 | 16 | 1,89 | 13,00 | 0,998 | 42 | 72,6 | 24200 | 0,818 | 0,004 | 1 | 0,981 | 0,918 | 0,726 | 0,329 | 0,50 | 0,73 | Buena |
| El cedro | SE3 | 6,69 | 2,46 | 1,89 | 4,80 | 0,065 | 46 | 79,7 | 308 | 0,852 | 1 | 1 | 1,006 | 0,907 | 0,797 | 1,00 | 0,50 | 0,87 | Buena |
| El cedro I | SE4 | 6,92 | 16 | 1,89 | 23,00 | 2,184 | 30 | 68,3 | 170 | 0,961 | 0,004 | 1 | 0,951 | 0,948 | 0,683 | 1,000 | 0,25 | 0,82 | Buena |
| Q. Santa Elena | SE5 | 6,9 | 2,46 | 1,89 | 6,00 | 2,047 | 40 | 58,6 | 1380 | 0,951 | 1 | 1 | 1,002 | 0,923 | 0,586 | 1,000 | 0,25 | 0,80 | Buena |
| Q. La escorrentía. | SE6 | 6,67 | 3,4 | 1,89 | 4,23 | 1,854 | 20 | 88,8 | 11 | 0,843 | 1 | 1 | 1 | 0,970 | 0,888 | 1,000 | 0,25 | 0,87 | Buena |
| Confluencia San Ignacio-Santa Elena | SE7 | 6,96 | 12 | 1,89 | 22,00 | 0,065 | 54 | 80,7 | 9210 | 0,981 | 0,021 | 1 | 0,95 | 0,885 | 0,807 | 1,000 | 0,50 | 0,88 | Buena |
| Q. "La Avícola" | SE8 | 6,82 | 10 | 1,89 | 19,00 | 0,065 | 32 | 87,2 | 14140 | 0,912 | 1 | 1 | 0,96 | 0,943 | 0,872 | 0,387 | 0,50 | 0,78 | Buena |
| Q. "Santa Teresa" | SE9 | 6,92 | 19 | 1,89 | 31,00 | 0,065 | 18 | 38 | 190 | 0,961 | 0,002 | 1 | 0,927 | 0,974 | 0,380 | 1,000 | 0,50 | 0,77 | Buena |
| Q. "Paysandú 1" | SE10 | 7,09 | 32 | 1,89 | 78,00 | 0,065 | 227 | 86,4 | 2250 | 1 | 0,000 | 1 | 0,786 | 0,211 | 0,864 | 1,00 | 0,50 | 0,81 | Buena |
| Q. "Paysandú" | SE11 | 7,3 | 31 | 1,89 | 64,00 | 0,065 | 175 | 72 | 13000 | 1 | 0,000 | 1 | 0,828 | 0,443 | 0,720 | 0,4 | 0,50 | 0,69 | Media |
| Q. La torre | SE12 | 7,01 | 2,46 | 1,89 | 4,23 | 0,320 | 22 | 67,6 | 600 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0,965 | 0,676 | 1,000 | 0,50 | 0,86 | Buena |
| Quebrada Santa Lucia | SE13 | 6,8 | 12 | 1,89 | 4,23 | 0,116 | 66 | 69 | 2800 | 0,902 | 0,021 | 1 | 1 | 0,849 | 0,690 | 1,000 | 0,50 | 0,85 | Buena |
| Q. Santa Elena 2 | SE14 | 7,25 | 29 | 1,89 | 78,00 | 2,169 | 42 | 87,2 | 18510 | 1 | 0,000 | 1 | 0,786 | 0,918 | 0,872 | 0,358 | 0,25 | 0,73 | Buena |
| Q. El Yarumo | SE15 | 7,13 | 47 | 1,89 | 34,00 | 1,190 | 17 | 86,2 | 360 | 1 | 0,000 | 1 | 0,918 | 0,976 | 0,862 | 1,000 | 0,25 | 0,86 | Buena |

| Nombre | No. Estación | pH (unidades pH) | DQO ( mg/L O2) | DBO5 (mg/L) | Sólidos suspendidos Totales(SST) | FOSFORO TOT (mg/L-P) | CONDUCTIVIDAD (/usiemens/cm) | % SATURACION OXIGENO | E Coli (UFC/100 mL) | IPH | IDQO | IDBO5 | Isst | Icond | I%sat | I Ecoli | I FOSFORO TOTAL (PO4) | ICA fa | DESCRIPTOR / COLOR |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Confluencia El Yarumo - Las Antenas | SE16 | 6,96 | 2,46 | 1,89 | 4,23 | 1,926 | 87 | 85,6 | 173310 | 0,981 | 1 | 1 | 1 | 0,782 | 0,856 | 0,000 | 0,25 | 0,68 | Media |
| Q. El Placer Parte Alta | SE17 | 7,31 | 24 | 1,89 | 21,00 | 3,024 | 76 | 51,1 | 60 | 1 | 0,000 | 1 | 0,957 | 0,818 | 0,511 | 1,000 | 0,25 | 0,77 | Buena |
| Quebrada el placer (aguas abajo) | SE18 | 7,5 | 13 | 1,89 | 4,23 | 1,853 | 68 | 89,7 | 190 | 1 | 0,014 | 1 | 1 | 0,843 | 0,897 | 1,000 | 0,25 | 0,87 | Buena |
| Q. Santa Elena 3 | SE19 | 7,12 | 16 | 1,89 | 4,23 | 2,409 | 68 | 95,8 | 2600 | 1 | 0,004 | 1 | 1 | 0,843 | 0,958 | 1,000 | 0,25 | 0,89 | Buena |
| Q. Santa Bárbara Parte Alta | SE20 | 7,54 | 21 | 1,89 | 4,23 | 0,065 | 51 | 89,6 | 420 | 1 | 0,001 | 1 | 1 | 0,893 | 0,896 | 1,000 | 0,50 | 0,91 | Excelente |
| Q. La Espadera | SE21 | 7,18 | 41 | 1,89 | 4,23 | 3,259 | 123 | 87,7 | 4500 | 1 | 0,000 | 1 | 1 | 0,653 | 0,877 | 1,000 | 0,25 | 0,85 | Buena |
| Q. La Bizarrra | SE22 | 7,16 | 27 | 1,89 | 42,00 | 1,932 | 163 | 86,5 | 5100 | 1 | 0,000 | 1 | 0,894 | 0,494 | 0,865 | 1,000 | 0,25 | 0,82 | Buena |
| Q. Chiqueros | SE25 | 7,3 | 2,46 | 1,89 | 18,00 | 0,123 | 51 | 75,1 | 1920 | 1 | 1 | 1 | 0,966 | 0,893 | 0,751 | 1,000 | 0,50 | 0,87 | Buena |
| La Cascada | SE26 | 7,24 | 15 | 1,89 | 4,23 | 0,065 | 71 | 101,8 | 750 | 1 | 0,006 | 1 | 1 | 0,834 | 0,982 | 1,000 | 0,50 | 0,92 | Excelente |
| Confluencia Bocana - Santa Elena | SE27 | 7,31 | 2,46 | 1,89 | 11,00 | 0,065 | 103 | 105,6 | 15210 | 1 | 1 | 1 | 0,987 | 0,726 | 0,944 | 0,379 | 0,50 | 0,79 | Buena |

Fuente: Consorcio Siga-Plyma

### 3.2.5.3.2 Subcuenca San Ignacio-Santa Elena

Los resultados de las variables fisicoquímicas de las estaciones de la Q. San Ignacio que pertencen a la cuenca Santa Elena dentro del área de influencia local se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 3-86 - Resultados de los análisis fisicoquímicos in situ y ex situ en la subcuenca de la Quebrada San Ignacio.

| Estaciones | SI1 | SI2 | SI3 | SI4 | SI5 | SI6 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Variable | Q. Sn Ignacio | Q. La Matilda (afl.Sn Ignacio) | Afloramiento (lago) | Q. Los Chorlitos | Q. Los Chorlitos (la Batea) | Q. Amansamiento frio |
| Coordenada X | 843289 | 843903 | 843714 | 843522 | 843755 | 843410 |
| Coordenada Y | 1178517 | 1178352 | 1178326 | 1178574 | 1178659 | 1178482 |
| Coordenada Z | 2576 | 2596 | 2577 | 2564 | 2585 | 2569 |
| T agua(°C) | 13,7 | 15,2 | 15,9 | 15,9 | 15,9 | 15,2 |
| Oxigeno Disuelto (mg/l) | 6,64 | 7,15 | 6,01 | 5,7 | 5,71 | 5,78 |
| Saturación de Oxigeno (%) | 88,8 | 70,9 | 82,2 | 79,2 | 78,8 | 77,5 |
| Conductividad (µS/cm) | 20 | 28 | 35 | 71 | 50 | 36 |
| pH | 6,67 | 6,97 | 6,78 | 6,67 | 6,81 | 6,87 |
| Oxiqeno Disuelto (mg $O_2$/L) | 7,76 | 6,95 | 7,67 | 7,63 | 7,56 | 7,55 |
| DBO (mg/L) | 1,86 | 1,86 | 1,86 | 1,86 | 1,86 | 1,86 |
| DQO (mg $O_2$/L) | 22,00 | 344,00 | 3,90 | 9,8 | 9,50 | 5,2 |
| Turbiedad (N.T.U) | 5,53 | 1000 | 11,2 | 8,61 | 4,1 | 3,42 |
| Alcalinidad Total (mg $CaCO_3$/L) | 12,5 | 6 | 12 | 14 | 15,5 | 15 |
| Acidez Total (mg $CaCO_3$/L) | 4 | 17 | 4 | 4 | 4 | 5 |
| Amonio (mg $NH^{4+}$/l) | 0,06 | 0,06 | 0,06 | 0,06 | 0,06 | 0,06 |
| Nitritos (mg $NO^{2-}$/L) | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,069 | 0,05 | 0,05 |
| Nitratos (mg $NO^{3-}$/L) | 3,72 | 0,56 | 0,46 | 1,641 | 0,70 | 0,512 |
| Fósforo Total (mg P/L) | 1,88 | 7,51 | 0,07 | 0,065 | 0,07 | 0,065 |
| Potasio (mg $K^{+}$/L) | 0,90 | 0,90 | 0,90 | 2,572 | 0,90 | 0,9 |
| HierroTotal (mg Fe/L) | 0,943 | 7,954 | 3,872 | 1,046 | 0,418 | 0,296 |
| Sólidos Totales (mg ST/L) | 75,00 | 2260,00 | 140,00 | 42 | 58,00 | 75 |
| Sólidos DisueltosTotales (mg SDT/L) | 45,00 | 43,00 | 114,00 | 38 | 56,00 | 67 |
| Sólidos Suspendidos Tótales (mg SST/L) | 30,00 | 2216,00 | 26,00 | 4,9 | 4,23 | 7,8 |
| Sólidos Sedimentables (mg/L) | 0,2 | 43,00 | 0,4 | 0 | 0,00 | 0 |
| Sulfatos (mg $SO4^{-2}$ /L) | 1,42 | 3,40 | 1,47 | 4,334 | 2,12 | 1,327 |
| Cloruros (mg $Cl^{-}$/L) | 1,25 | 2,27 | 1,25 | 8,074 | 1,67 | 1,299 |
| Grasasv/o Aceites(mg Grasas y Aceites/L) | 9,32 | 9,32 | 12,00 | 9,32 | 9,32 | 9,32 |
| Fenoles (mg $C_6H_6$/L) | 0,01 | 0,00 | 0,02 | 0,012 | 0,01 | 0,011 |
| Detergentes (mg SAAM/L) | 0,05 | 0,103 | 0,14 | 0,085 | 0,159 | 0,094 |
| Dureza Calcica (mg $CaCO_3$/L) | 5,17 | 2,25 | 4,94 | 11,036 | 8,71 | 7,543 |
| Dureza Magnésica (mg | 4,17 | 3,71 | 3,71 | 22,612 | 6,86 | 6,958 |

| Estaciones | SI1 | SI2 | SI3 | SI4 | SI5 | SI6 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Variable | Q. Sn Ignacio | Q. La Matilda (afl.Sn Ignacio) | Afloramiento (lago) | Q. Los Chorlitos | Q. Los Chorlitos (la Batea) | Q. Amansamiento frio |
| $CaCO_3$//L) | | | | | | |
| Cobre (mg Cu/L) | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,02 |
| Cadmio (mg Cd/L) | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,003 | 0,00 | 0,003 |
| Plomo (mg Pb/L) | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 |
| Zinc (mg Zn/L) | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,025 |
| Cromo Total (mg Cr/L) | 0,05 | 0,58 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 |
| Cromo Hexavalente (mg Cr(VI)/L) | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 |
| Coliformes Totales (NMP/100 ml) | 2420 | 6490 | 327 | 2420 | 2420 | 24200 |
| Coliformes Fecales (NMP/100 ml) | 79 | 190 | 10 | 115 | 40 | 490 |

Fuente: Consorcio Siga-Plyma

La temperatura del agua de esta quebrada está dentro del rango para quebradas con esta altura sobre el nivel del mar, entre 13,7 y 15,9 ºC, siendo la más fría SI1 Quebrada San Ignacio. El oxígeno disuelto sobrepasa los 6,0 mg/L que es una buena concentración para sostener la vida silvestre, en SI1 Quebrada San Ignacio, SI2 Quebrada La Matilda y SI3 Quebrada Afloramiento (lago), las demás estaciones están en un rango entre 7,7 y 5,78 mg/L, lo cual indica un ligero deterioro. El pH está dentro del rango 6,2 y 8,6 unid. apropiado para sostener vida silvestre, potabilizar el agua y para uso agrícola y pecuario; todas las estaciones tienen pH ligeramente ácido entre 6,67 y 6,97 unid.

La saturación de oxígeno, que está en función de la temperatura y la concentración de oxígeno disuelto, en todas las estaciones está por encima del 70%, la mayoría entre 80 y 92%, lo cual indica que en estas estaciones hay una disponibilidad baja de oxígeno para los organismos acuáticos y contaminación ligera.

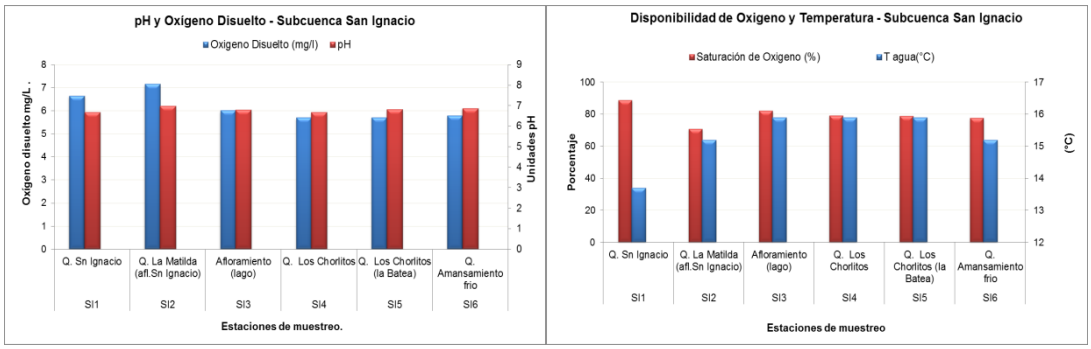



Figura 3-172 - Temperatura, pH, Disponibilidad de oxígeno en las estaciones de la Q. San Ignacio y sus afluentes..

Los sólidos totales están por debajo del rango promedio de los ríos (<120 mg/L) y del límite para peces de 100 mg/L, con excepción de SI3 Quebrada Afloramiento (lago) que alcanza 140mg/L y SI2 Quebrada La Matilda que tiene una concentración crítica de 2260mg/L. Los sólidos totales en SI2 Quebrada La Matilda están representados en su mayoría por sólidos suspendidos, que son también muy altos (2.216 mg/L), mientras que en las demás estaciones los sólidos disueltos son la fracción mayor. En las demás estaciones los sólidos suspendidos son bajos SI4 Quebrada Los

Chorlitos, SI5 Quebrada “Los Chorlitos en la Batea” y SI6 Quebrada “Amagamiento frio”, en las otras dos estaciones sobrepasan ligeramente el límite máximo de 25 mg/ para aguas normales de cuenca alta. Los sólidos sedimentables son muy bajos o no se detectaron en, excepto en SI2 Quebrada La Matilda que alcanzan los 43 mg/L, que considerando el límite máximo de 5 mg/L permitido para pece es alto. Los sólidos disueltos sólo son medios en SI3 Quebrada Afloramiento (lago), 114 mg/L.

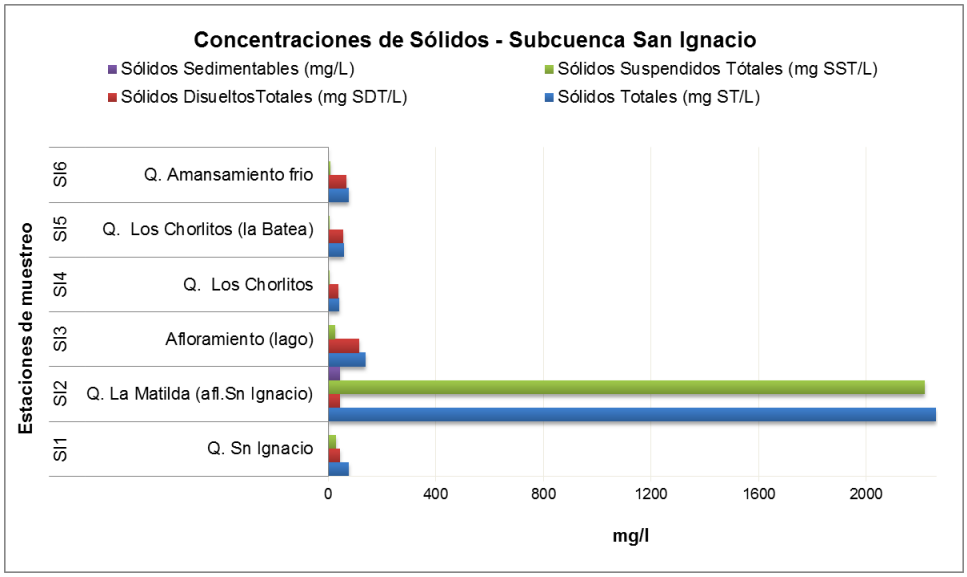
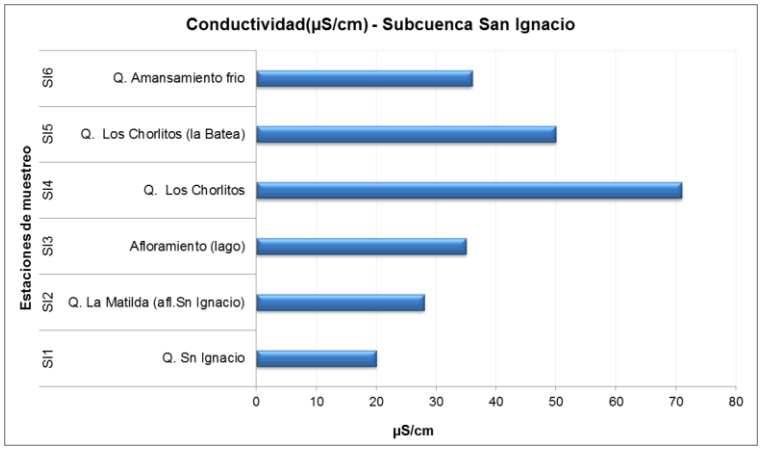



Figura 3-173 - Sólidos totales, suspendidos, disueltos y sedimentarios en las estaciones de la Q. San Ignacio y sus afluentes. .

La conductividad eléctrica es baja, dentro del rango de ríos neotropicales, entre 10 y 200 µS/cm, sin embargo S14 con 71µS/cm está el rango 50-100µS/cm para corrientes de montaña medianamente contaminadas. La turbiedad en todas las estaciones está por debajo cerca de 10 NTU, excepto en SI2 Quebrada La Matilda que alcanza>1000 NTU, coincidiendo con las concentraciones más altas de sólidos suspendidos en esta estación.



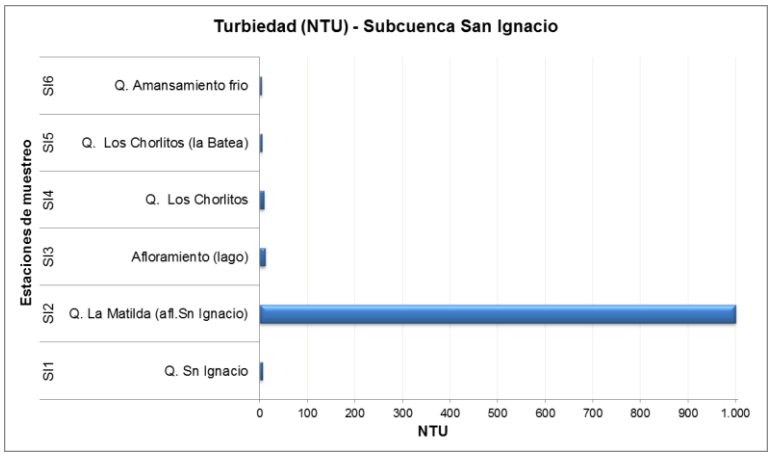



Figura 3-174 - Conductividad y turbiedad en las estaciones de la Q. San Ignacio y sus afluentes..

La Dureza Cálcica (mg CaCO3/L) es muy baja en todas las estaciones, con un rango entre 2, 2 - 11,0 mg/L que corresponde a aguas muy blandas, poco productivas, oligotróficas. En cuanto a la Dureza Magnésica (mg CaCO3//L) las concentraciones son muy bajas, entre 43,7 - 22,6 mg/L, muy por debajo del óptimo que es 30 mg/L. La mayor dureza total 33,65 mg/L se presenta en SI4 Quebrada Los Chorlitos y es indicadora de aguas blandas, medianamente productivas. También pertenecen a este rango las estaciones SI5 Quebrada "Los Chorlitos en la Batea" (15,6 mg/L) y SI6 Quebrada "Amagamiento frio" (14,5).

La Alcalinidad Total (mg CaCO3/L) de todas las estaciones de la Q. San Ignacio es menor de 25 mg/L que es límite superior para corrientes de alta montaña, el rango va desde 6 -15,5 mg/L que para los valores de pH de esta quebrada corresponde principalmente a bicarbonatos. La acidez total, exceptuando SI2 Quebrada La Matilda (17 mg/L) es baja, entre 4,0 -5,0 mg/L, que por ser sistema de aguas naturales con el rango de pH de estas quebradas puede asumirse que la acidez se debe casi exclusivamente al $CO_2$, es decir, que la acidez es carbonácea y no mineral.

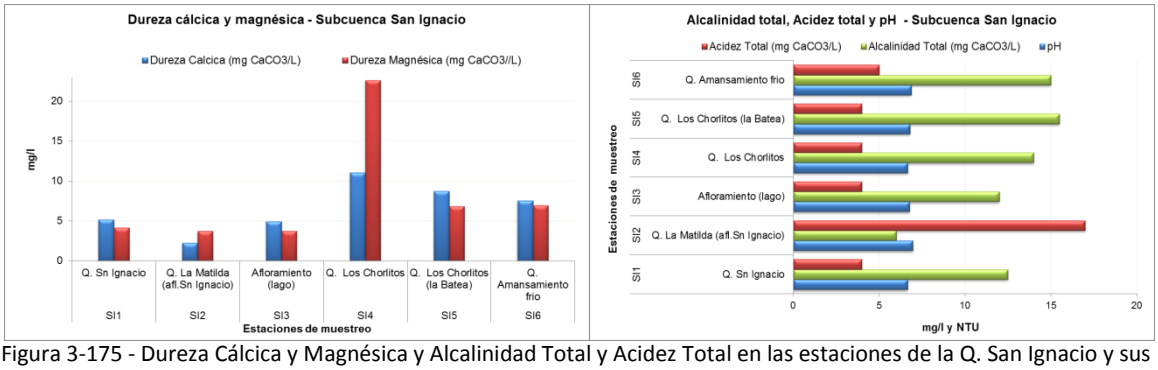



Figura 3-175 - Dureza Cálcica y Magnésica y Alcalinidad Total y Acidez Total en las estaciones de la Q. San Ignacio y sus afluentes

En las estaciones SI3 Quebrada Afloramiento (lago), SI4 Quebrada Los Chorlitos, SI5 Quebrada "Los Chorlitos en la Batea" y SI6 Quebrada "Amagamiento frio" no es posible saber si el Fósforo Total (mg P/L), está por encima de 0,03mg/L que es el límite superior para los diferentes usos del agua porque el análisis está en el límite de detección del método de análisis que es de <0,065mg/L. Por otra parte, SI1 (1,88 mg/L) y SI2 Quebrada La Matilda con 7,51 mg/L presentan concentraciones

muy altas, mayores de 1,0mg/L que es el límite inferior para la hipereutrófica. Todas las estaciones, y particularmente SI2 Quebrada La Matilda, presentan contaminación fecal por lo que sus aguas deben recibir aguas de escorrentía de potreros o explotaciones pecuarias o aguas residuales domésticas y en la región se utilizan fertilizantes y abonos en cultivos y potreros. Los Detergentes (mg SAAM/L), presentan en todas las estaciones concentraciones muy por debajo de 0,5 mg/l que es el límite para diferentes usos del agua y por debajo de 0,143 mg/L que es el límite para la conservación de la vida acuática, excepto en SI3 Quebrada Afloramiento (lago) y SI5 Quebrada "Los Chorlitos en la Batea", cuya concentración alcanza supera ese límite.

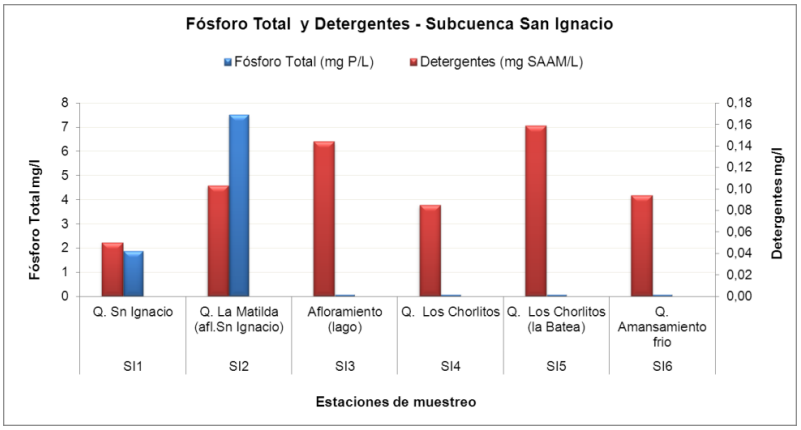



Figura 3-176 - Fósforo Total y Detergentes en las estaciones de la Q. San Ignacio y sus afluentes.

Los nitratos (mg NO3-/L), la forma biodisponible del nitrógeno, están dentro de un rango de 0,46 - 3,72 mg/L, inferior al límite de uso de 10mg/L para diferentes usos del agua. Los nitritos (mg NO2-/L), la forma que rápidamente se convierte a nitratos en estas corrientes bien oxigenadas, exceptuando SI4 Quebrada Los Chorlitos (0,069 mg/L) las demás estaciones no superan en ninguna estación el límite de detección del método de análisis utilizado de 0,05 mg/L, que están por debajo de las concentraciones recomendadas para diferentes usos de 1,0mg/L. El nitrógeno amoniacal (mg NH4+ /l) también es muy bajo, en ninguna estación las concentraciones límite para diferentes usos y para la conservación de la vida silvestre, 1,0mg/L y 0,1mg/L respectivamente.

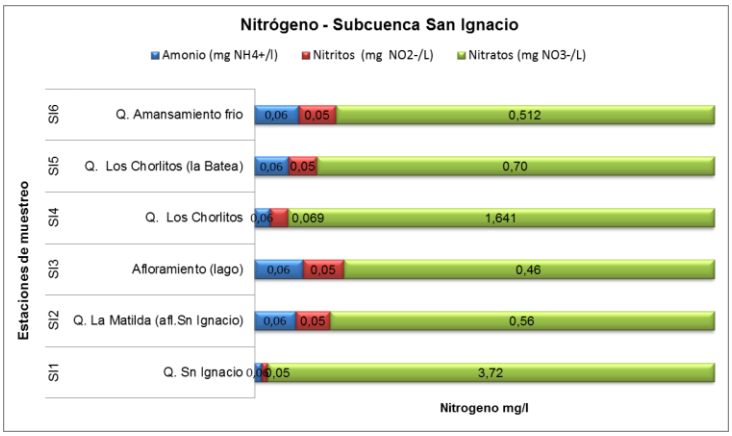


Figura 3-177 - Nitrógeno (Nitratos, nitritos y N-amoniacal) en las estaciones de la Q. San Ignacio y sus afluentes.

En relación con los iones disueltos en el agua, se observa que el potasio (mgK+/L) en todas las estaciones tiene concentraciones menores de 10 mg/L que es lo esperado para aguas naturales superficiales. La presencia de hierro es un problema de calidad del agua muy común en esta región donde los suelos son ricos en este elemento. El agua aún con una pequeña cantidad de hierro puede tornarse rojiza por su exposición al aire y especialmente cuando su pH está por encima de 7,5 unid. Aunque no es tóxico, la coloración y el sabor se transforman en problema cuando la concentración es mayor que 0,3 mg/L. Exceptuando las estación SI6 Quebrada "Amagamiento frio", en las demás se supera el límite de 0,3 mg/L que es el límite para recreación, contacto y consumo; en SI2 Quebrada La Matilda (7,95 mg/L), SI3 Quebrada Afloramiento (lago) (3,87 mg/L) y SI4 Quebrada Los Chorlitos (1,04 mg/L) se supera la concentración de 1,0 mg/L que es ideal para la conservación de la vida acuática. Los sulfatos (mg SO4-/L) tienen concentraciones muy bajas en todas las estaciones, 1,32 - 4,33 mg/L, cuando el límite para aguas naturales, recreación y para potabilizar está en 250 mg/L. Los cloruros (mg Cl-/L) son bajos en todas las estaciones, entre 1,25 - 8,07 mg/L pues la concentración en aguas dulces no debe superar el rango 10-250mg/L.

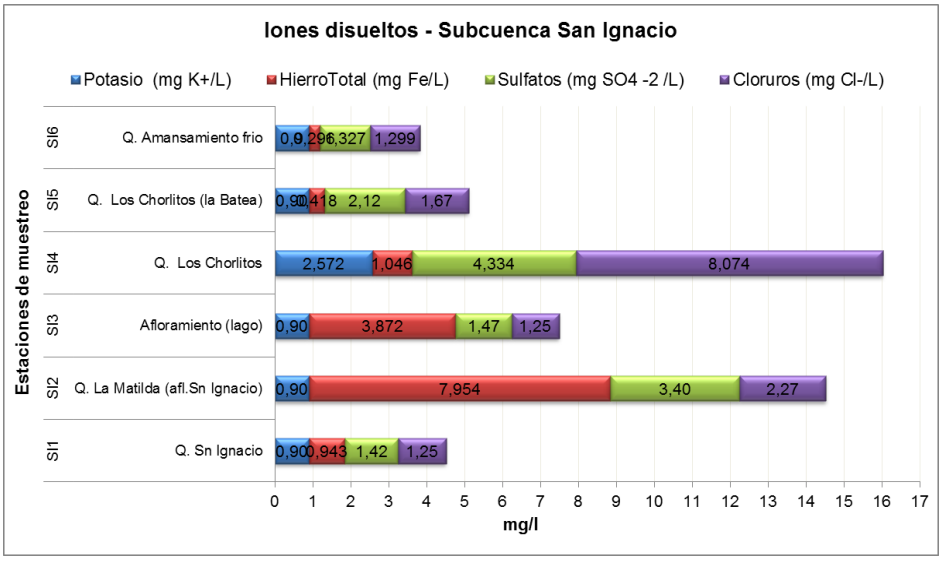



Figura 3-178 - Iones disueltos en el agua Potasio (mg K+/L) Hierro Total (mg Fe/L) Sulfatos (mg SO4 -2 /L) Cloruros (mg Cl-/L) en las estaciones de la Q. San Ignacio y sus afluentes.

También se analizaron otras sustancias disueltas en el agua y metales pesados, pero ninguna superó el límite de detección del método de análisis: Fenoles 0,001mg C6H6/L, Cromo Total 0,05mg Cobre 0,02mg Cu/L, Cadmio 0,003mg Cd/L, Plomo mg 0,01Pb/L, Zinc, 0,02mg Zn/L, Cr/L y Cromo Hexavalente 0,05mg Cr (VI)/L, lo cual significa que no hay contaminantes provenientes de la industria y de las actividades agropecuarias. En esta quebrada, con excepción de SI3 Quebrada Afloramiento (lago) (12 mg/L) con conservación restrictiva para conservación de la fauna, consumo directo y recreación, en las demás estaciones, las grasas y/o aceites no sobrepasan el nivel de detección mínimo del método de análisis utilizado, <9,32 mg Grasas y Aceites/L, por lo tanto no se sabe si superan la concentración de 0,01 mg/L para la conservación de la fauna o están ausentes para su consumo y uso recreativo directo.

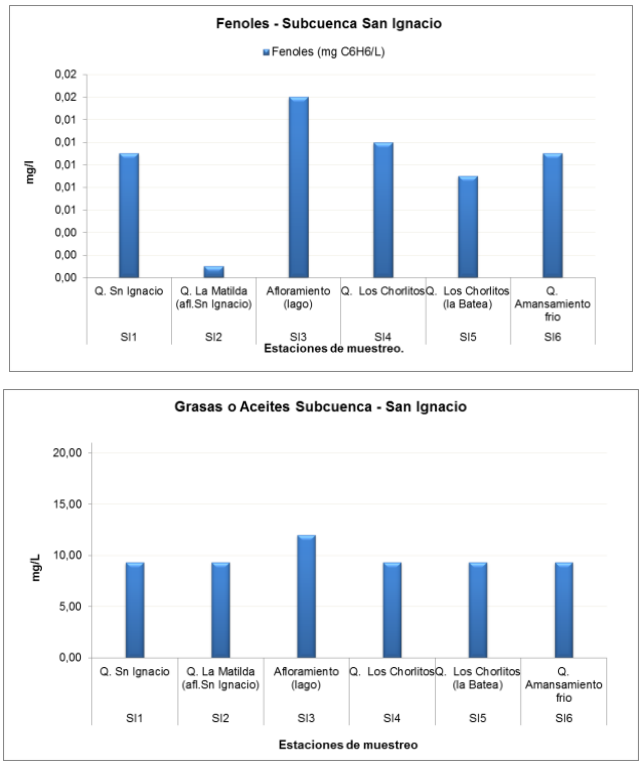



Figura 3-179 - Fenoles (mg C6H6/L) Grasas y/o Aceites - Q. San Ignacio y sus afluentes..

La demanda química de oxígeno, DQO, presenta valores entre 3,9 - 344 mg O2/L; todas las estaciones sobrepasan el rango para aguas superficiales no contaminadas, 1,0 -5,0 mg/L; las más altas demandas de oxígeno se presentan en SI1 Quebrada San Ignacio (22 mg/L) y SI2 Quebrada La Matilda (344 mg/L), esta última con una demanda química muy alta, propia de aguas residuales domésticas entre 260 y 600 mgO2L. La DBO5 presentó demandas de oxígeno por debajo del límite de detección del método de análisis, <1,89 mgO2/L que son inferiores a cualquier tipo de restricción. La relación DBO/DQO<0,2, lo que hace suponer que estas estaciones reciben escorrentías y/o vertidos inorgánicos, imposible de depurar de forma biológica.

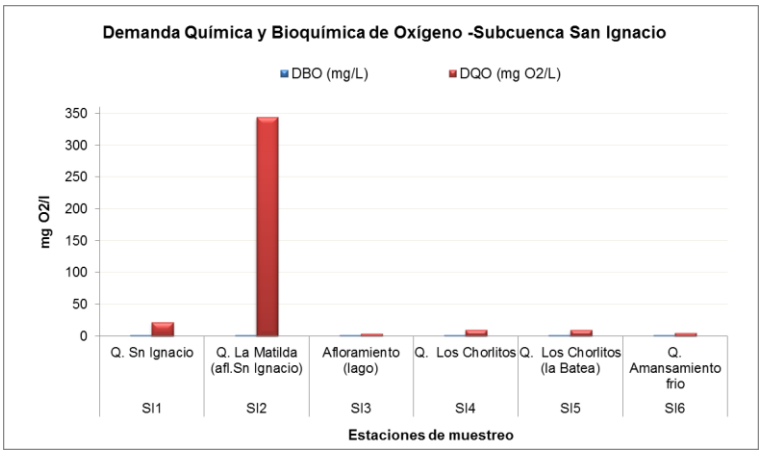


Figura 3-180 - Contaminación orgánica, medida como demanda de oxígeno, DBO (mg/L) y DQO (mg O2/L) en las estaciones de la Q. San Ignacio y sus afluentes.

Todas las estaciones de la quebrada tienen presencia de coliformes totales y fecales. Los coliformes fecales son una fracción de los coliformes totales e indican la presencia de heces animales y humanas en el agua por vertido de aguas residuales, uso de fertilizantes orgánicos (gallinaza y porquinaza) o por escorrentía de explotaciones pecuarias y por lo tanto evidencian la posibilidad de microorganismos patógenos para humanos y animales, bien sea por contacto o por vía digestiva. SI6 Quebrada "Amagamiento frio", la estación más contaminada, presenta contaminación fecal por encima de 200 NMP/100 ml y coliformes totales mayores de 20.000, por lo que tiene restricciones para uso pecuario, agrícola, recreación primaria, contacto secundario, conservación de flora y fauna y para ser usada para simple tratamiento convencional. Las demás estaciones, por tener coliformes totales mayores de 1000, excepto SI3 Quebrada Afloramiento (lago), tienen restricciones para uso pecuario, recreación primaria y conservación de la flora y la fauna.

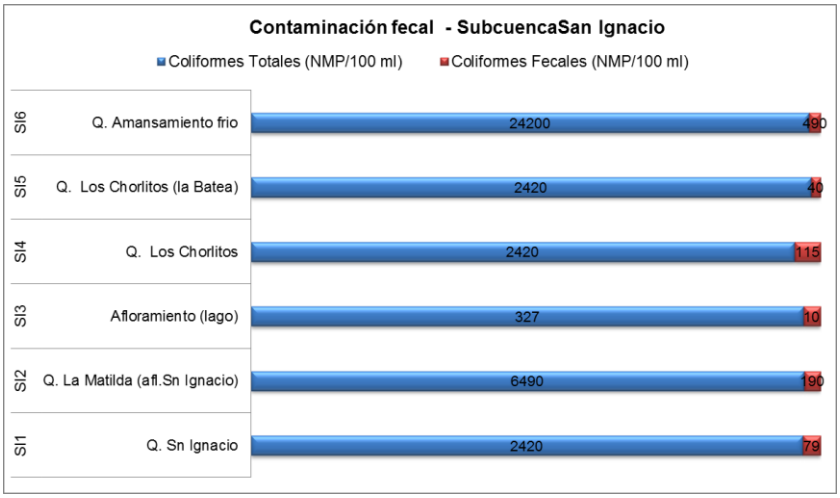



Figura 3-181 - Contaminación fecal en las estaciones de la Q. San Ignacio y sus afluentes

## Indice de Calidad de Agua para las estaciones de la Subcuenca San Ignacio-Santa Elena

Los ICAfa calculados para las estaciones de la Q. San Ignacio, afluente de la Q. Santa Elena, indican agua de calidad buena, excepto el afluente de Q. La Matilde, SI2, cuya agua, de acuerdo alICAfa tiene calidad media, o sea que tiene restricciones para el contacto humano y la preservación de la vida; el deterioro de esta quebrada obedece a que presenta 344,0 mg/l de DQO , fósforo alto, 7,5 mg/l, saturación de oxígeno de 70,9% y sólidos suspendidos de 2216,0 mg/l.

En la quebrada San Ignacio, exceptuando la estación SI2 Quebrada La Matilda, que tiene una altísima concentración de sólidos en su mayoría suspendidos, tienen calidad buena. SI2 Quebrada La Matilda tiene calidad media porque tiene saturación de oxígeno muy baja, alta demanda química de oxígeno y sobretodo sólidos totales, la mayoría sólidos suspendidos muy altos que le dan alta turbidez al agua.

Tabla 3-87 - Calidad del agua en las estaciones de la Q. San Ignacio, afluente de la Q. Santa Elena.

| Nombre | No. Estación | pH (unidades pH) | DQO ( mg/L O2) | DBO5 (mg/L) | Sólidos suspendidos Totales(SST) | FOSFORO TOT (mg/L-P) | CONDUCTIVIDAD ((usiemens/cm) | % SATURACION OXIGENO | E Coli (UFC/100 mL) | IPH | IDQO | IDBO5 | Isst | Icond | I%sat | I Ecoli | I FOSFORO TOTAL (PO4) | ICA fa | DESCRIPTOR / COLOR |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Q. Sn Ignacio | SI1 | 6,67 | 22,0 | 1,89 | 30,00 | 1,88 | 20,0 | 88,8 | 79 | 0,84 | 0,001 | 1 | 0,93 | 0,97 | 0,89 | 1,00 | 0,25 | 0,86 | Buena |
| Q. "La Matilda" (afluente San Ignacio) | SI2 | 6,97 | 344,0 | 1,9 | 2216, | 7,51 | 28,0 | 70,9 | 190 | 0,98 | 0,000 | 1 | 0 | 0,95 | 0,71 | 1,00 | 0,25 | 0,69 | Media |
| Afloramiento (lago) | SI3 | 6,78 | 3,90 | 1,9 | 26,00 | 0,06 | 35,0 | 82,2 | 10 | 0,89 | 1 | 1 | 0,94 | 0,93 | 0,82 | 1,00 | 0,50 | 0,87 | Buena |
| Q. Los Chorlitos | SI4 | 6,67 | 9,80 | 1,9 | 4,90 | 0,06 | 71,0 | 79,2 | 115 | 0,84 | 1 | 1 | 1,00 | 0,83 | 0,79 | 1,00 | 0,50 | 0,87 | Buena |
| Q. " Los Chorlitos en la Batea" | SI5 | 6,81 | 9,50 | 1,9 | 4,23 | 0,065 | 50,00 | 78,80 | 40 | 0,907 | 1 | 1 | 1 | 0,896 | 0,788 | 1,000 | 0,50 | 0,87 | Buena |

| Nombre | No. Estación | pH (unidades pH) | DQO ( mg/L O2) | DBO5 (mg/L) | Sólidos suspendidos Totales(SST) | FOSFORO TOT (mg/L-P) | CONDUCTIVIDAD ((usiemens/cm) | % SATURACION OXIGENO | E Coli (UFC/100 mL) | IPH | IDQO | IDBO5 | Isst | Icond | I%sat | I Ecoli | I FOSFORO TOTAL (PO4) | ICA fa | DESCRIPTOR / COLOR |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Q. Amagamiento frio | SI6 | 6,87 | 5,20 | 1,89 | 7,80 | 0,065 | 36,00 | 77,50 | 490 | 0,936 | 1 | 1 | 0,997 | 0,933 | 0,775 | 1,00 | 0,50 | 0,88 | Buena |

Fuente: Consorcio Siga-Plyma

### 3.2.5.3.3 Subcuenca San Pedro- Santa Elena

Los resultados de las variables fisicoquímicas de las estaciones de la Q. San Pedro que pertenecen a la cuenca Santa Elena dentro del área de influencia directa local se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 3-88 - Análisis fisicoquímicos in situ y ex situ en las estaciones del área de influencia del túnel, subcuenca de la Quebrada San Pedro.

| VARIABLES | | Estaciones | | |
|---|---|---|---|---|
| | | SP1 | SP2 | SP3 |
| | | Q. San Pedro Parte alta | Q. San Pedro | Q. San Pedro |
| COORDENADAS | X | 842805 | 842812 | 842795 |
| | Y | 1177775 | 1178097 | 1178472 |
| | Z | 2570 | 2566 | 2543 |
| T agua(°C) | | 15,5 | 15,7 | 15,4 |
| Oxígeno Disuelto (mg/l) | | 6,39 | 6,14 | 6,06 |
| Saturación de Oxigeno (%) | | 81,8 | 84,3 | 84,1 |
| Conductividad (µS/cm) | | 123 | 118 | 128 |
| pH | | 6,57 | 6,86 | 7,15 |
| Oxígeno Disuelto (mg $O_2$/L) | | 7,63 | 7,61 | 7,64 |
| DBO (mg/L) | | < 1,89 | <1,89 | <1,89 |
| DQO (mg $O_2$/L) | | 13 | <2,46 | 9,8 |
| Turbiedad (N.T.U) | | 7,88 | 34,3 | 1,54 |
| Alcalinidad Total (mg $CaCO_3$/L) | | 23,5 | 22 | 30,5 |
| Acidez Total (mg $CaCO_3$/L) | | 4 | 4 | 3 |
| Amonio (mg $NH^{4+}$/l) | | < 0,060 | < 0,060 | < 0,060 |
| Nitritos (mg $NO^{2-}$/L) | | < 0,050 | <0,050 | 0,061 |
| Nitratos (mg $NO^{3-}$/L) | | 1,249 | 1,566 | 1,516 |
| Fósforo Total (mg P/L) | | < 0,065 | < 0,065 | 1,627 |
| Potasio (mg $K^+$/L) | | 1,220 | 1,461 | 1,416 |
| Hierro Total (mg Fe/L) | | 0,842 | 4,281 | 0,245 |
| Sólidos Totales (mg ST/L) | | 73 | 121 | 143 |
| Sólidos Disueltos Totales (mg SDT/L) | | 36 | 65 | 141 |
| Sólidos Suspendidos Totales (mg SST/L) | | 37 | 56 | <4,23 |
| Sólidos Sedimentables (mg/L) | | 0,4 | 0,3 | 0,0 |
| Sulfatos (mg $SO4^{-2}$ /L) | | 6,478 | 5,957 | 8,560 |
| Cloruros (mg $Cl^-$/L) | | 6,238 | 5,745 | 13,243 |
| Grasas/o Aceites(mg Grasas y Aceites/L) | | <9,32 | <9,32 | <9,32 |
| Fenoles (mg $C_6H_6$/L) | | 0,003 | < 0,001 | < 0,001 |
| Detergentes (mg SAAM/L) | | 0,088 | 0,082 | < 0,050 |
| Dureza Cálcica (mg $CaCO_3$/L) | | 8,295 | 9,039 | 12,930 |
| Dureza Magnésica (mg $CaCO_3$//L) | | 14,076 | 11,686 | 18,140 |
| Cobre (mg Cu/L) | | < 0,020 | < 0,020 | < 0,020 |
| Cadmio (mg Cd/L) | | < 0,003 | < 0,003 | < 0,003 |
| Plomo (mg Pb/L) | | <0,010 | <0,010 | <0,010 |
| Zinc (mg Zn/L) | | < 0,020 | < 0,020 | < 0,020 |
| Cromo Total (mg Cr/L) | | < 0,050 | <0,050 | < 0,050 |
| Cromo Hexavalente (mg Cr(VI)/L) | | < 0,050 | < 0,050 | < 0,050 |

| VARIABLES | Estaciones | | |
|---|---|---|---|
| | SP1 | SP2 | SP3 |
| | Q. San Pedro Parte alta | Q. San Pedro | Q. San Pedro |
| Coliformes Totales (NMP/100 ml) | 24200 | 24200 | 19860 |
| Coliformes Fecales (NMP/100 ml) | 1380 | 2360 | 3873 |

Fuente: Consorcio Siga-Plyma

La temperatura del agua de esta quebrada está dentro del rango para quebradas con esta altura sobre el nivel del mar, entre 15,4 a 15,7 ºC. El oxígeno disuelto en todas las quebradas está entre 60,6 y 6,39 mg/L que es una buena concentración para sostener la vida silvestre. El pH, entre 6,57 y 7,15 unid está dentro del rango de 6,2 y 8,6 unid propio para sostener vida silvestre, potabilizar el agua y para uso agrícola y pecuario. La saturación de oxígeno en todas las estaciones está alrededor del 80%, lo cual indica que en estas estaciones hay buena disponibilidad de oxígeno para los organismos acuáticos y para oxidarse la materia orgánica.

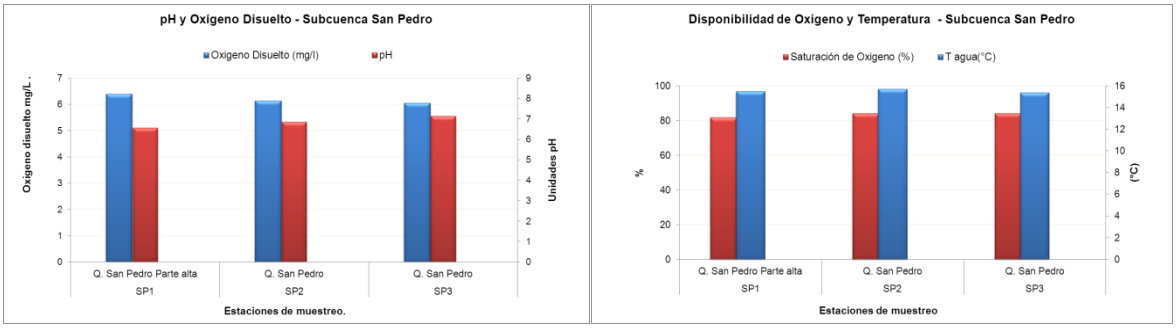



Figura 3-182 - Temperatura, pH, oxígeno y saturación de oxígeno en las estaciones de la Q. San Pedro y sus afluentes.

Los sólidos totales están por debajo del rango del rango promedio de los ríos (<120 mg/L), SP2 Quebrada San Pedro (Acueducto) y SP3 Quebrada San Pedro (Aguas Abajo Acueducto) tienen concentraciones alrededor de 100mg/L. Los sólidos totales están representados en SP1 Quebrada San Pedro Parte Alta y SP2 Quebrada San Pedro (Acueducto) tanto por sólidos suspendidos como por sólidos disueltos, mientras que en SP3 Quebrada San Pedro (Aguas Abajo Acueducto) casi todos los sólidos totales están representados por sólidos disueltos. Los sólidos suspendidos muestran una ligera contaminación en SP1 Quebrada San Pedro Parte Alta y SP2 Quebrada San Pedro (Acueducto), mientras que son muy bajos en SP1 Quebrada San Pedro Parte Alta. No se encontraron sólidos sedimentables en SP3 Quebrada San Pedro (Aguas Abajo Acueducto) y en las otras dos estaciones son muy bajos.

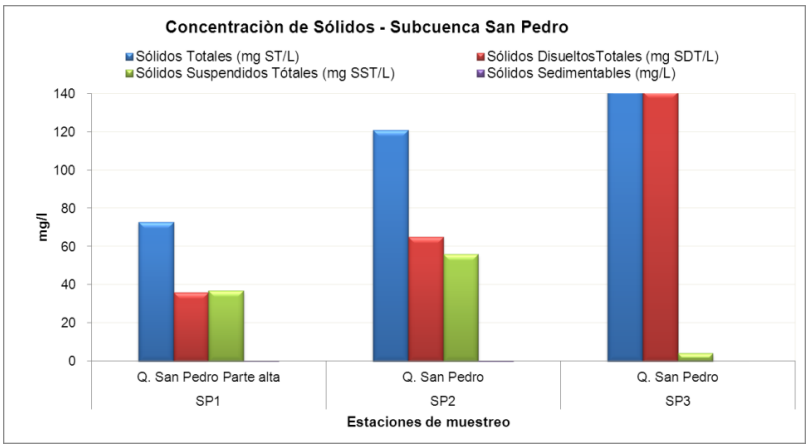



Figura 3-183 - Sólidos totales, suspendidos, disueltos y sedimentarios en las estaciones de la Q. San Pedro y sus afluentes.

La conductividad eléctrica está por encima de los 100 µS/cm, que aunque están dentro del rango de ríos neotropicales, entre 10 y 200 µS/cm, si están por encima de los 50 µS/cm propios de corrientes no contaminadas de cuenca alta. La turbiedad en todas las estaciones está por debajo de 10 NTU excepto en SP2 Quebrada San Pedro (Acueducto) que alcanza 34,3 NTU, debida a la concentración de sólidos disueltos que se presentan en esta estación.

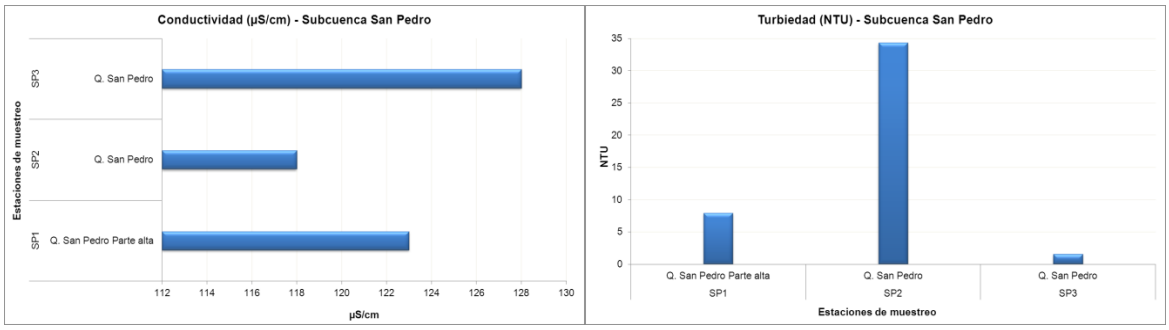



Figura 3-184 - Conductividad y turbiedad en las estaciones de la Q. San Pedro y sus afluentes..

La Dureza Cálcica (mg CaCO3/L) es muy baja en las estaciones SP1 Quebrada San Pedro Parte Alta y SP2 Quebrada San Pedro (Acueducto), que corresponde a aguas muy blandas, poco productivas, oligotróficas, mientras que SP3 Quebrada San Pedro (Aguas Abajo Acueducto) tiene una concentración de 12,9mg/L que corresponde a aguas blandas medianamente productivas. En cuanto a la Dureza Magnésica (mg CaCO3/L) las concentraciones son bajas, entre 11,6 -18,1 mg/L, muy por debajo del óptimo que es 30 mg/L. La mayor dureza total en la Q. San Pedro, está en un rango de 20,7 - 31,0 mg/L indicadora de aguas blandas, medianamente productivas.

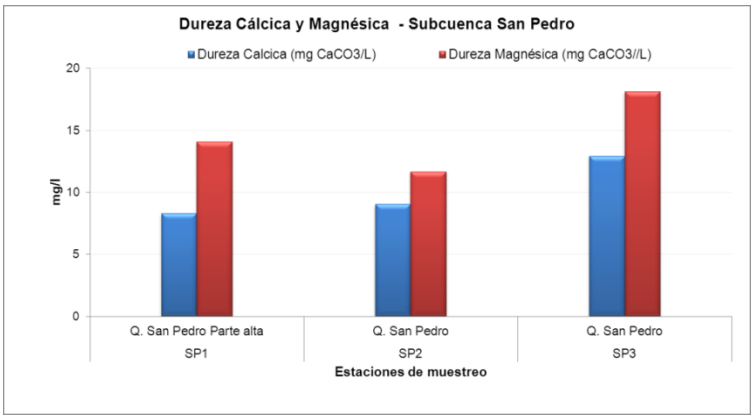



Figura 3-185 - Dureza cálcica y magnésica en las estaciones de la Q. San Pedro y sus afluentes.

La Alcalinidad Total (mg CaCO3/L) en las estaciones SP1 Quebrada San Pedro Parte Alta y SP2 Quebrada San Pedro (Acueducto) es menor de 25 mg/L que es límite superior para corrientes de alta montaña; SP3 Quebrada San Pedro (Aguas Abajo Acueducto) tiene una concentración de 30,5mg/L que aunque es más alta está dentro del rango 10-60 mg/L propio de ríos de montañas; de acuerdo con los valores de pH, la alcalinidad de esta quebrada corresponde principalmente a bicarbonatos. La acidez total es baja, entre 3 -4 mg/L, que por ser sistema de aguas naturales con el rango de pH entre 6.57 y 7,15 unid, se asume que la acidez se debe casi exclusivamente al $CO_2$, es decir, que la acidez es carbonácea y no mineral.

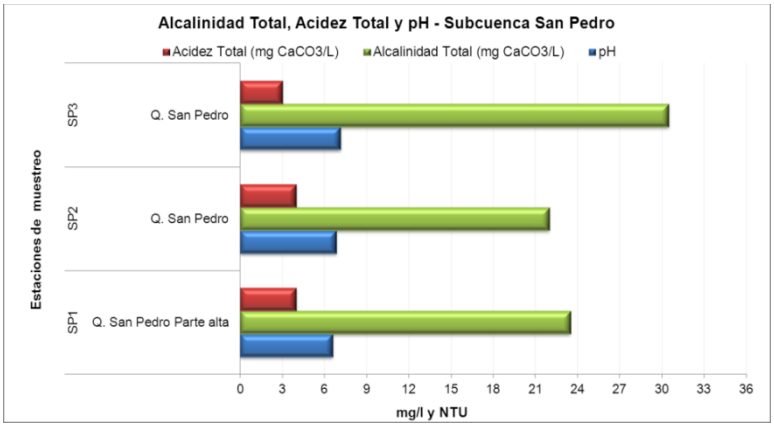



Figura 3-186 - Alcalinidad Total y Acidez Total en las estaciones de la Q. San Pedro y sus afluentes

En relación a los nutrientes, en las estaciones SP1 Quebrada San Pedro Parte Alta y SP2 Quebrada San Pedro (Acueducto), el Fósforo Total (mg P/L), no es posible saber si está por encima de 0,03mg/L que es el límite superior para los diferentes usos del agua, porque el análisis está en el límite de detección del método de análisis que es de <0,065mg/L. Por otra parte, SP3 Quebrada San Pedro (Aguas Abajo Acueducto) presenta una concentración de 1,63mg/L que es mayor 1,0mg/L que es el límite inferior para la hipereutrófica porque recibe aguas residuales domésticas como evidencian los análisis de coliformes. Los Detergentes (mg SAAM/L), presentan en todas las estaciones concentraciones muy por debajo de 0,5 mg/l que es el límite para diferentes usos del agua y por debajo de 0,143 mg/L que es el límite para la conservación de la vida acuática.

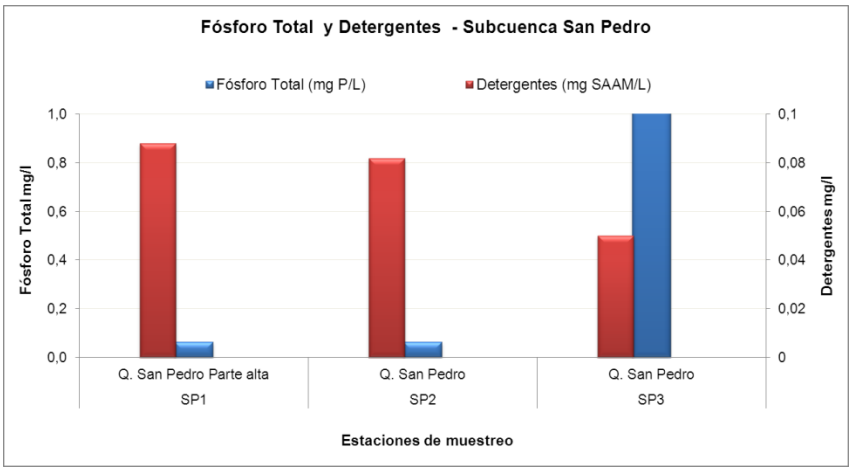



Figura 3-187 - Detergentes y fósforo total en las estaciones de la Q. San Pedro y sus afluentes. .

En relación a los nutrientes, los nitratos (mg NO3-/L), la forma biodisponible del nitrógeno, están dentro de un rango de 1,24 -1,56 mg/L, inferior al límite de uso de 10mg/L para diferentes usos del agua. Los nitritos (mg NO2- /L), la forma que rápidamente se convierte a nitratos en estas corrientes bien oxigenadas, exceptuando SP3 Quebrada San Pedro (Aguas Abajo Acueducto) (0,061 mg/L). Las estaciones no superan en ninguna estación el límite de detección del método de análisis utilizado de 0,05 mg/L, que están por debajo de las concentraciones recomendadas para diferentes usos de 1,0mg/L. El nitrógeno amoniacal (mg NH4+ /l) también es muy bajo, en ninguna estación las concentraciones límite para diferentes usos y para la conservación de la vida silvestre, 1,0mg/L y 0,1mg/L respectivamente.

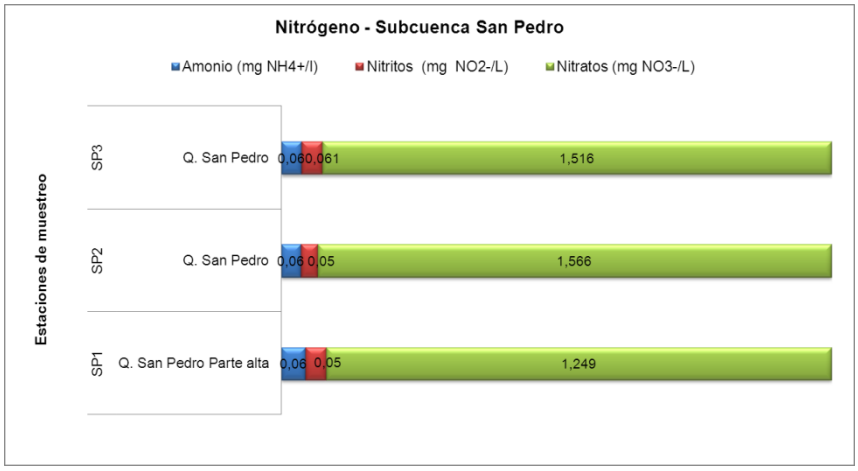



Figura 3-188 - Nitrógeno (Nitratos, nitritos y N-amoniacal) en las estaciones de la Q. San Pedro y sus afluentes.

En relación a los iones disueltos en el agua, se observa que el potasio (mgK+/L) en todas las estaciones tiene concentraciones menores de 10 mg/L esperado para aguas naturales superficiales. La presencia de hierro es un problema de calidad del agua muy común en esta región donde los suelos son ricos en este elemento. El agua aún con una pequeña cantidad de hierro puede tornarse rojiza por su exposición al aire y especialmente cuando su pH está por encima de 7,5 unid. Aunque no es tóxico, la coloración y el sabor se transforman en problema cuando la concentración es mayor que 0,3 mg/L. Exceptuando las estación SP3 Quebrada San Pedro (Aguas

Abajo Acueducto), se supera el límite de 0,3 mg/L límite para recreación, contacto y consumo; en SP2 Quebrada San Pedro (Acueducto) (4,2 mg/L) se supera la concentración de 1,0 mg/L que es ideal para la conservación de la vida acuática. Los sulfatos (mg SO4-/L) tienen concentraciones muy bajas en todas las estaciones, 6,4 -8,5 mg/L, cuando el límite para aguas naturales, recreación y para potabilizar está en 250 mg/L; la estación con mayor concentración de sulfatos es SP3 Quebrada San Pedro (Aguas Abajo Acueducto). Los cloruros (mg Cl-/L) son bajos en todas las estaciones, entre 5,74 -13,24 mg/L, pues la concentración en aguas dulces no debe superar el rango 10-250mg/L; la estación con mayor concentración de cloruros es SP3 Quebrada San Pedro (Aguas Abajo Acueducto).

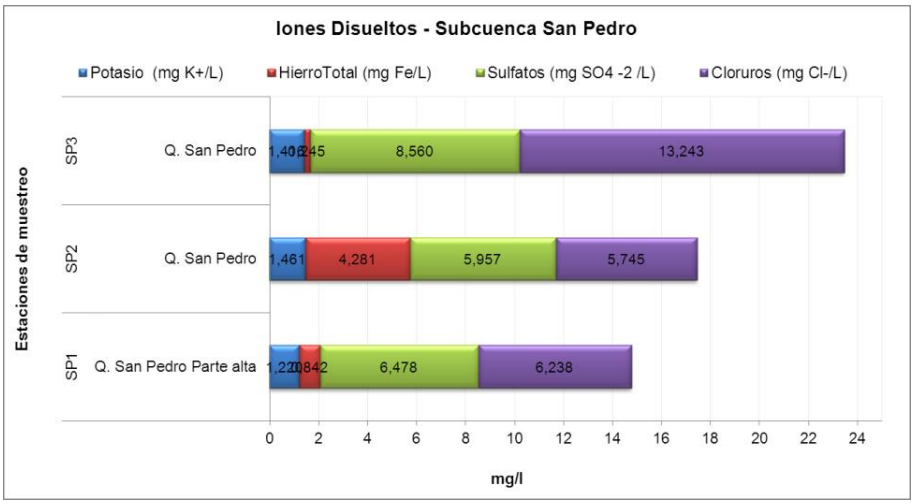



Figura 3-189 - Iones disueltos Q. San Pedro y sus afluentes.

También se analizaron otras sustancias disueltas en el agua y metales pesados. Los Fenoles tuvieron concentraciones por debajo del límite de detección del método de análisis utilizado 0,001mg C6H6/L en SP2 Quebrada San Pedro (Acueducto) y SP3 Quebrada San Pedro (Aguas Abajo Acueducto), mientras que en SP1 Quebrada San Pedro Parte Alta alcanzó una concentración de 0,003 que ya es restrictiva para consumo tratamiento, consumo humano y animal, recreación directa. Los metales pesados en ninguna de las estaciones superaron el límite de detección del método de análisis: Cobre 0,02mg Cu/L, Cadmio 0,003mg Cd/L, Plomo mg 0,01Pb/L, Zinc, 0,02mg Zn/L, Cromo Total 0,05mg Cr/L y Cromo Hexavalente 0,05mg Cr (VI)/L, lo cual significa que no hay contaminantes provenientes de la industria y de las actividades agropecuarias.

En esta quebrada, las grasas y/o aceites no sobrepasan el nivel de detección mínimo del método de análisis utilizado, <9,32 mg Grasas y Aceites/L, por lo tanto no se sabe si superan la concentración de 0,01 mg/L para la conservación de la fauna o están ausentes para su consumo y uso recreativo directo.

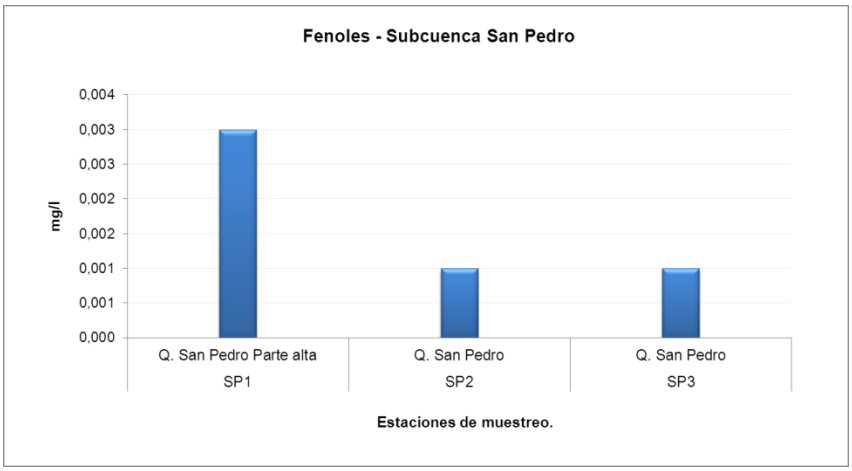



Figura 3-190 - Fenoles (mg C6H6/L) Q. San Pedro y sus afluentes.

La demanda química de oxígeno, DQO, en SP2 Quebrada San Pedro (Acueducto) está por debajo del nivel de detección del método de análisis utilizado, <2,46 mgO2/L, mientras que SP1 Quebrada San Pedro Parte Alta (13 mgO2/L) y SP3 Quebrada San Pedro (Aguas Abajo Acueducto) (9,8 mgO2/L) sobrepasan el rango para aguas superficiales no contaminadas, 1,0 -5,0 mg/L. La DBO5 presentó demandas de oxígeno por debajo del límite de detección del método de análisis, <1,89 mgO2/L que son inferiores a cualquier tipo de restricción. La relación DBO/DQO<0,2, lo que hace suponer que estas estaciones reciben escorrentías y/o vertidos inorgánicos, imposible de depurar de forma biológica.

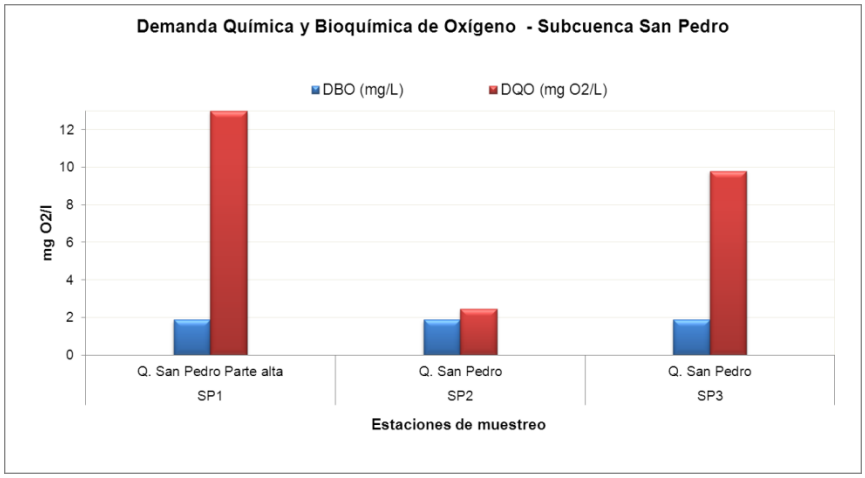



Figura 3-191 - Contaminación orgánica, medida como demanda de oxígeno, DBO (mg/L) y DQO (mg O2/L) en las estaciones de la Q. San Pedro y sus afluentes.

Todas las estaciones de la quebrada tienen presencia de coliformes totales y fecales. Los coliformes fecales son una fracción de los coliformes totales e indican la presencia de heces animales y humanas en el agua por vertido de aguas residuales, uso de fertilizantes orgánicos (gallinaza y porquinaza) o por escorrentía de explotaciones pecuarias y por lo tanto evidencian la posibilidad de microorganismo patógenos para humanos y animales, bien sea por contacto o por vía digestiva. Todas las estaciones presentan contaminación fecal por encima de 200 NMP/100 ml y coliformes totales mayores de 20.000 NMP/100, por lo que tiene restricciones para uso

pecuario, agrícola, recreación primaria, contacto secundario, conservación de flora y fauna y para ser usada para simple tratamiento convencional. La estación más contaminada es SP3 Quebrada San Pedro (Aguas Abajo Acueducto).

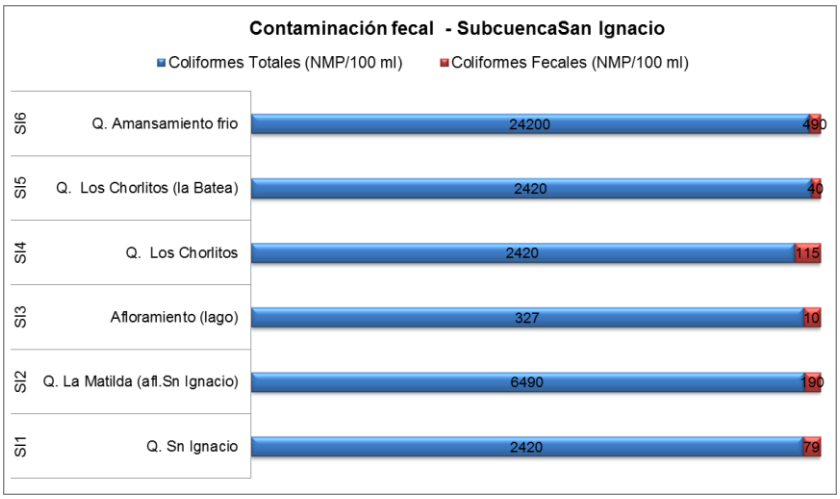



Figura 3-192 - Contaminación fecal en las estaciones de la Q. San Ignacio y sus afluentes

### Indice de Calidad de Agua para las estaciones de la Subcuenca San Ignacio-Santa Elena

Los ICAfa calculados para las estaciones de la Q. San Ignacio, afluente de la Q. Santa Elena, indican agua de calidad buena, excepto el afluente de Q. La Matilde, SI2, cuya agua, de acuerdo al ICAfa tiene calidad media, es decir, que tiene restricciones para el contacto humano y la preservación de la vida. El deterioro de esta quebrada obedece a que presenta 344,0 mg/l de DQO, fósforo alto, 7,5 mg/l, saturación de oxígeno de 70,9% y sólidos suspendidos de 2216,0 mg/l.

En la quebrada San Ignacio, exceptuando la estación SI2 Quebrada La Matilda, que tiene una altísima concentración de sólidos en su mayoría suspendidos, tienen calidad buena. SI2 Quebrada La Matilda tiene calidad media porque tiene saturación de oxígeno muy baja, alta demanda química de oxígeno y sobretodo sólidos totales, la mayoría sólidos suspendidos muy altos que le dan alta turbidez al agua.

Tabla 3-89 - Calidad del agua en las estaciones de la Q. San Ignacio, afluente de la Q. Santa Elena.

| Nombre | No. Estación | pH (unidades pH) | DQO ( mg/L O2) | DBO5 (mg/L) | Sólidos suspendidos Totales(SST) | FOSFORO TOT (mg/L-P) | CONDUCTIVIDAD (/usiemens/cm) | % SATURACION OXIGENO | E Coli (UFC/100 mL) | IPH | IDQO | IDBO5 | Isst | Icond | I%sat | I Ecoli | I FOSFORO TOTAL (PO4) | ICA fa | DESCRIPTOR / COLOR |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Q. San Ignacio | SI1 | 6,67 | 22,0 | 1,89 | 30,00 | 1,88 | 20,0 | 88,8 | 79 | 0,84 | 0,001 | 1 | 0,93 | 0,97 | 0,89 | 1,00 | 0,25 | 0,86 | Buena |
| Q. "La Matilda" (afluente San Ignacio) | SI2 | 6,97 | 344,0 | 1,9 | 2216, | 7,51 | 28,0 | 70,9 | 190 | 0,98 | 0,000 | 1 | 0 | 0,95 | 0,71 | 1,00 | 0,25 | 0,69 | Media |
| Afloramiento (lago) | SI3 | 6,78 | 3,90 | 1,9 | 26,00 | 0,06 | 35,0 | 82,2 | 10 | 0,89 | 1 | 1 | 0,94 | 0,93 | 0,82 | 1,00 | 0,50 | 0,87 | Buena |
| Q. Los Chorlitos | SI4 | 6,67 | 9,80 | 1,9 | 4,90 | 0,06 | 71,0 | 79,2 | 115 | 0,84 | 1 | 1 | 1,00 | 0,83 | 0,79 | 1,00 | 0,50 | 0,87 | Buena |
| Q. " Los Chorlitos en la Batea" | SI5 | 6,81 | 9,50 | 1,9 | 4,23 | 0,065 | 50,00 | 78,80 | 40 | 0,907 | 1 | 1 | 1 | 0,896 | 0,788 | 1,000 | 0,50 | 0,87 | Buena |
| Q. Amagamiento frio | SI6 | 6,87 | 5,20 | 1,89 | 7,80 | 0,065 | 36,00 | 77,50 | 490 | 0,936 | 1 | 1 | 0,997 | 0,933 | 0,775 | 1,00 | 0,50 | 0,88 | Buena |

Fuente: Consorcio Siga-Plyma

### 3.2.5.3.4 Cuenca La Cascada Subcuenca La Cascada

Los resultados de las variables fisicoquímicas de las estaciones de la Q. La Cascada dentro del área de influencia directa puntual se presentan en la Tabla 3.36.

Tabla 3-90 - Resultados de los análisis fisicoquímicos in situ y ex situ en las estaciones del área de influencia del túnel, subcuenca de las Quebrada La Cascada

| Estaciones | C1 | C2 | C3 | C4 |
|---|---|---|---|---|
| Variable | Q." Doña Clara" | Q. "Dos captaciones" | Q. "Adonay" | Q. La Cascada |
| Coordenada X | 844802 | 844580 | 844424 | 844892 |
| Coordenada Y | 1177616 | 1177816 | 1177789 | 1178102 |
| Coordenada Z | 2593 | 2612 | 2639 | 2467 |
| T agua(°C) | 14,8 | 14,3 | 13,4 | 14,8 |
| Oxigeno Disuelto (mg/l) | 2,87 | 6,17 | 6,27 | 6,64 |
| Saturación de Oxigeno (%) | 38,7 | 84,7 | 86,6 | 88,5 |
| Conductividad (µS/cm) | 10,00 | 10,00 | 10,00 | 20,00 |
| pH | 7,66 | 7,71 | 7,56 | 6,78 |
| Oxiqeno Disuelto (mg $O_2$/L) | 7,04 | 7,3 | 7,47 | 7,45 |

| Estaciones | C1 | C2 | C3 | C4 |
|---|---|---|---|---|
| Variable | Q." Doña Clara" | Q. "Dos captaciones" | Q. "Adonay" | Q. La Cascada |
| DBO (mg/L) | 1,89 | 1,89 | 1,89 | 1,89 |
| DQO (mg $O_2$/L) | 20 | 22 | 8,4 | 6 |
| Turbiedad (N.T.U) | 5,83 | 10 | 3,36 | 0,74 |
| Alcalinidad Total (mg $CaCO_3$/L) | 8,00 | 8,00 | 10 | 21,5 |
| Acidez Total (mg $CaCO_3$/L) | 2 | 8 | 4 | 2 |
| Amonio (mg $NH^{4+}$/l) | 0,074 | 0,098 | 0,06 | 0,06 |
| Nitritos (mg $NO^{2-}$/L) | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 |
| Nitratos (mg $NO^{3-}$/L) | 0,25 | 0,477 | 0,673 | 1,889 |
| Fósforo Total (mg P/L) | 0,416 | 1,375 | 2,08 | 3,197 |
| Potasio (mg $K^+$/L) | 1,193 | 0,9 | 0,9 | 0,9 |
| HierroTotal (mg Fe/L) | 0,352 | 0,107 | 0,27 | 0,173 |
| Sólidos Totales (mg ST/L) | 65 | 117 | 135 | 72 |
| Sólidos DisueltosTotales (mg SDT/L) | 48 | 91 | 114 | 68 |
| Sólidos Suspendidos Tótales (mg SST/L) | 18 | 27 | 23 | 4,23 |
| Sólidos Sedimentables (mg/L) | 0,2 | 0,3 | 0,2 | 0 |
| Sulfatos (mg $SO4^{-2}$ /L) | 4,187 | 2,592 | 1,713 | 1,583 |
| Cloruros (mg $Cl^-$/L) | 1,522 | 1,357 | 1,365 | 2,201 |
| Grasasv/o Aceites(mg Grasas y Aceites/L) | 9,32 | 9,32 | 9,32 | 9,32 |
| Fenoles (mg $C_6H_6$/L) | 0,001 | 0,001 | 0,001 | 0,001 |
| Detergentes (mg SAAM/L) | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,041 |
| Dureza Calcica (mg $CaCO_3$/L) | 6,642 | 5,667 | 5,413 | 9,920 |
| Dureza Magnésica (mg $CaCO_3$//L) | 6,799 | 6,271 | 6,210 | 4,636 |
| Cobre (mg Cu/L) | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,02 |
| Cadmio (mg Cd/L) | 0,003 | 0,003 | 0,003 | 0,003 |
| Plomo (mg Pb/L) | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 |
| Zinc (mg Zn/L) | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,02 |
| Cromo Total (mg Cr/L) | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 |
| Cromo Hexavalente (mg Cr(VI)/L) | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 |
| Coliformes Totales (NMP/100 ml) | 242010 | 1203000 | 3880 | 3870 |
| Coliformes Fecales (NMP/100 ml) | 1401 | 41 | 74 | 910 |

Fuente: Consorcio Siga-Plyma

La temperatura del agua de esta quebrada está dentro del rango para quebradas con esta altura sobre el nivel del mar, entre 13,4 y 14,8 ºC, siendo relativamente frías para el área de estudio. El oxígeno disuelto en todas las quebradas, con excepción de C1 Quebrada Doña Clara, sobrepasa los 6,1 mg/L que es una buena concentración para sostener la vida silvestre. En C1 Quebrada Doña Clara la concentración de oxígeno medida in situ es muy baja, 2,87 mg/L lo cual indica deterioro de la calidad del agua. El pH, en la quebrada fluctúa entre 6,78 y 7,71 unid en el rango de 6,2 y 8,6 unid para sostener vida silvestre, potabilizar el agua y para uso agrícola y pecuario. La saturación de oxígeno, en todas las estaciones está por encima del 84 mg/L, excepto en C1 Quebrada Doña Clara donde la disponibilidad de oxígeno para mantener la vida silvestre es limitante, sólo 38,7%.

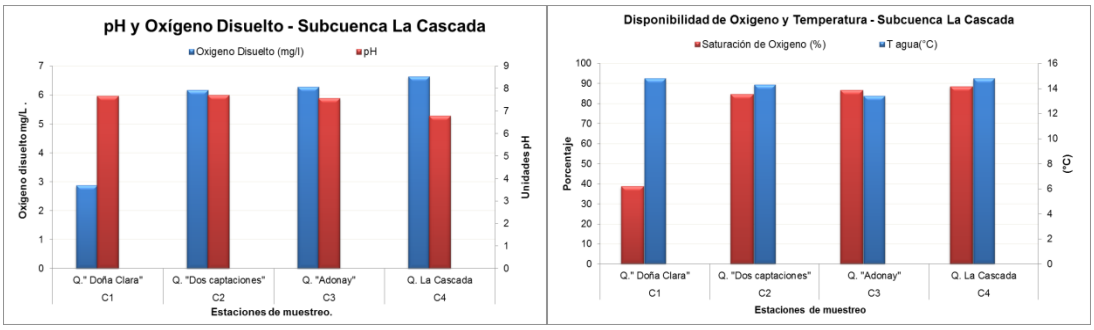



Figura 3-193 - Temperatura, pH, oxígeno y saturación de oxígeno en las estaciones de la Q. La Cascada y sus afluentes.

Los sólidos totales están por debajo del rango promedio de los ríos (<120 mg/L), pero en las estaciones C2 Quebrada "Dos Captaciones" y C3 Quebrada Adonaí sobrepasa el límite de 100 mg/L que puede afectar algunos organismos de la vida silvestre. Los sólidos totales están representados en su mayoría por sólidos disueltos, éstos tienen concentración alta, pero no limitantes, en C3 Quebrada Adonaí y C4 Quebrada La Cascada. Los sólidos suspendidos sólo superan los 25 mg/L propios de corrientes de cuenca alta en C2 Quebrada "Dos Captaciones", 27 mg/L. Los sólidos sedimentables son muy bajos.

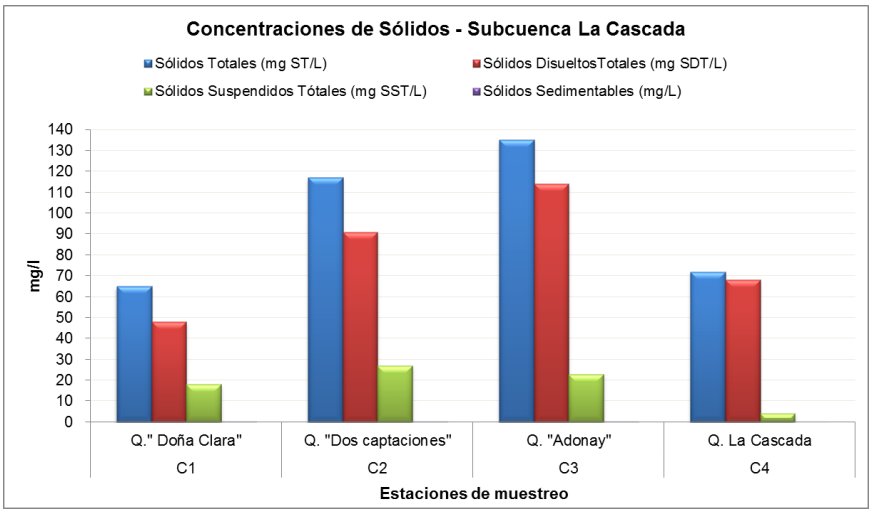
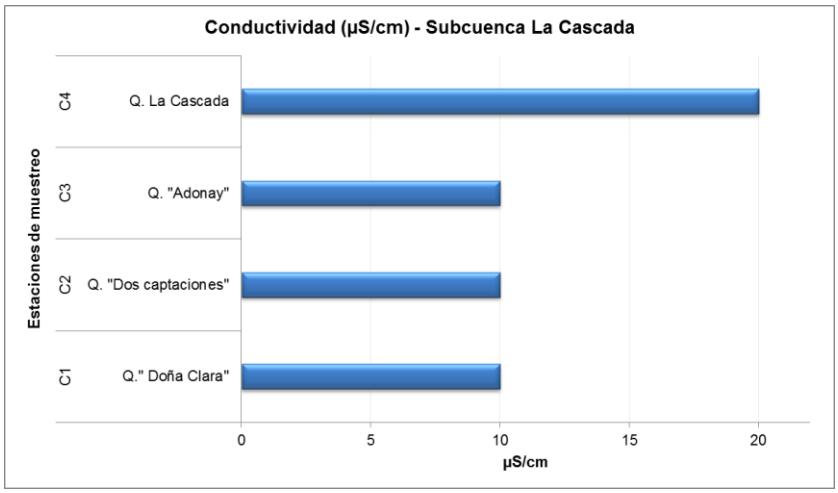



Tabla 3-91 - Sólidos totales, suspendidos, disueltos y sedimentarios en las estaciones de la Q. La Cascada y sus afluentes.

La conductividad eléctrica es baja, no supera en ninguna estación el límite de 50 µS/cm, propio de corrientes de cuenca alta no contaminadas. La turbiedad en todas las estaciones está por debajo de 10 NTU.



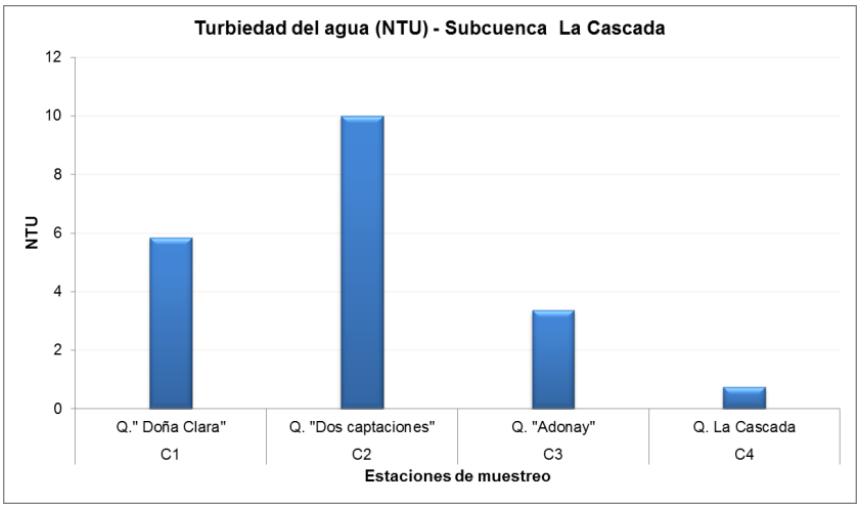




Tabla 3-92 - Conductividad y turbiedad en las estaciones de la Q. La Cascada y sus afluentes.

La Dureza Cálcica (mg CaCO3/L) es muy baja en todas las estaciones, con un rango entre 5,4 - 9,2 mg/L que corresponde a aguas muy blandas, poco productivas, oligotróficas. En cuanto a la Dureza Magnésica (mg CaCO3//L) las concentraciones son muy bajas, entre 4,6 - 6,7 mg/L, muy por debajo del óptimo que es 30 mg/L. La mayor dureza total 14,5 mg/L se presenta en C4 Quebrada La Cascada y es indicadora de aguas blandas, poco productivas.

La Alcalinidad Total (mg CaCO3/L) de todas las estaciones de la Q. La Cascada es menor de 25 mg/L que es límite superior para corrientes de alta montaña, el rango va desde 8,0-21,5 mg/L que para los valores de pH de esta quebrada corresponde a carbonatos y bicarbonatos. La acidez total en estas quebradas es baja, entre 2,0 -8,0 mg/L, que por ser sistema de aguas naturales con el rango de pH de estas quebradas puede asumirse que la acidez se debe casi exclusivamente al $CO_2$, es decir, que la acidez es carbonácea y no mineral.

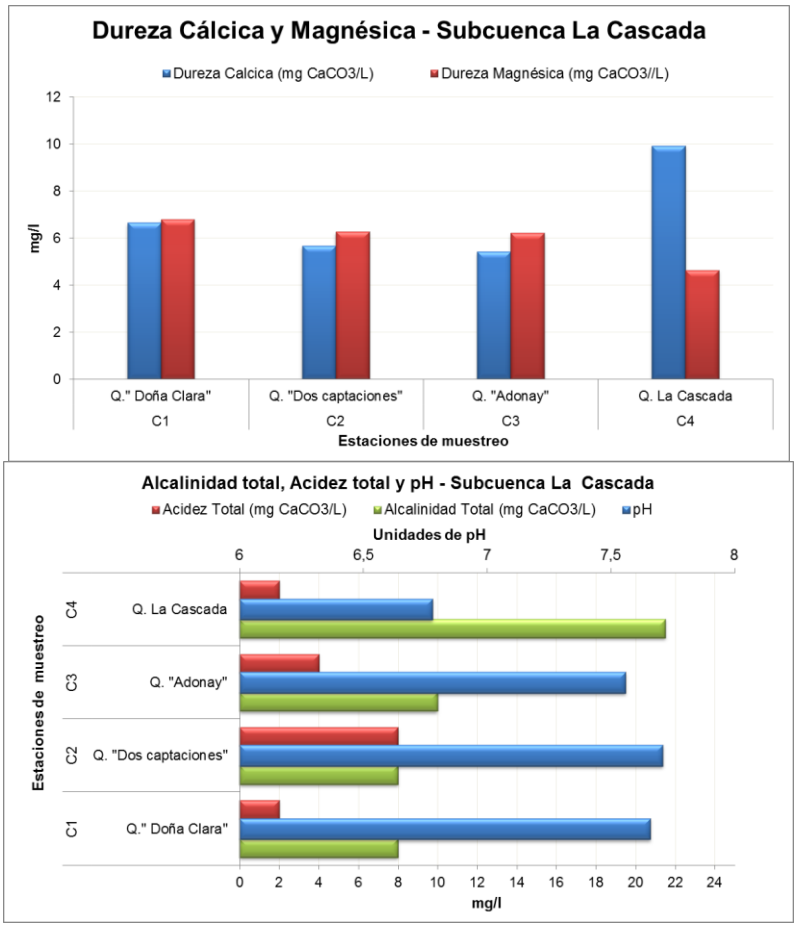



Figura 3-194 - Dureza cálcica y magnésica, Alcalinidad Total y Acidez Total en las estaciones de la Q. La Cascada y sus afluentes.

En relación a los nutrientes, el Fósforo Total (mg P/L) presenta en esta quebrada concentraciones por encima de la concentración límite de 0,03mg/L,C1 Quebrada Doña Clara con 0,416 está en el rango de la eutrofia, mientras que C2 Quebrada "Dos Captaciones", C3 Quebrada Adonaí y C4 Quebrada La Cascada con concentraciones entre 1,37 y-3,19 mg/L, son hipereutróficas porque sobrepasan el límite de 1,0 mg/L. Todas las estaciones presentan contaminación fecal por lo que sus aguas deben recibir aguas de escorrentía de potreros o explotaciones pecuarias o aguas residuales domésticas y en la región es común utilizar abonos y fertilizantes en cultivos y potreros. Los Detergentes (mg SAAM/L), presentan concentraciones muy bajas en todas las estaciones, por debajo del límite de detección del método de análisis, <0,05 mg/l.

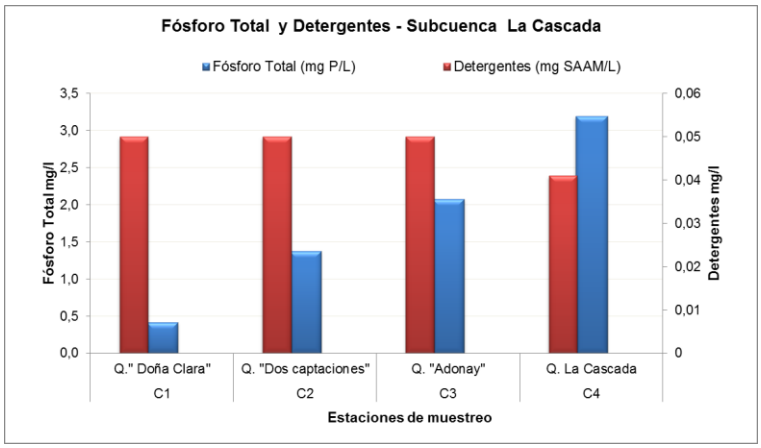



Figura 3-195 - Detergentes y fósforo total en las estaciones de la Q. La Cascada y sus afluentes. .

En relación a los nutrientes, los nitratos (mg NO3-/L), la forma biodisponible del nitrógeno, están dentro de un rango de 0,25-1,88 mg/L, inferior al límite de uso de 10mg/L para diferentes usos del agua. Los nitritos, la forma que rápidamente se convierte a nitratos en estas corrientes bien oxigenadas, no superan en ninguna estación el límite de detección del método de análisis utilizado de 0,05 mg/L, que están por debajo de las concentraciones recomendadas para diferentes usos de 1,0mg/L. El nitrógeno amoniacal (mg NH4+ /l) también es muy bajo, no supera en ninguna estación las concentraciones límite para diferentes usos y para la conservación de la vida silvestre, 1,0mg/L y 0,1mg/L respectivamente.

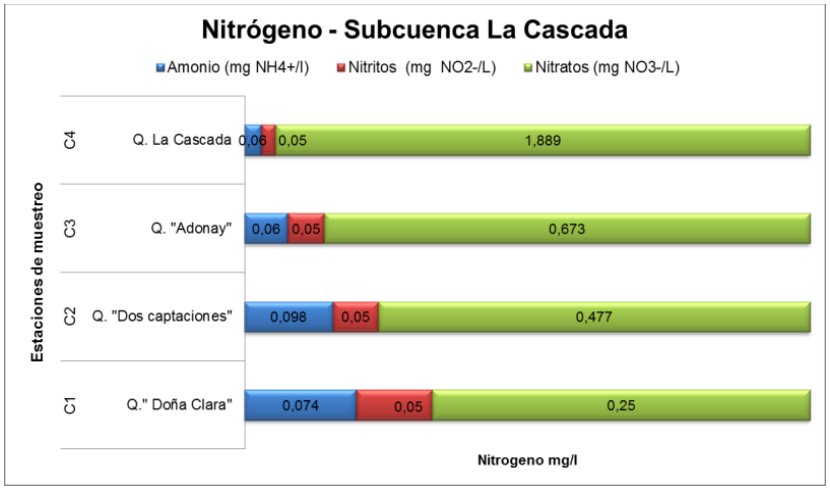



Figura 3-196 - Nitrógeno en las estaciones de la Q. La Cascada y sus afluentes.

En relación con los iones disueltos en el agua, se observa que el potasio (mgK+/L) en todas las estaciones tiene concentraciones menores de 10 mg/L que es lo esperado para aguas naturales superficiales. La presencia de hierro es un problema de calidad del agua muy común en esta región donde los suelos son ricos en este elemento. El agua aún con una pequeña cantidad de hierro puede tornarse rojiza por su exposición al aire y especialmente cuando su pH está por encima de 7,5 unid. Aunque no es tóxico, la coloración y el sabor se transforman en problema cuando la concentración es mayor que 0,3 mg/L. Exceptuando las estación C3 Quebrada Adonaí, en las demás se supera el límite de 0,3 mg/L que es el límite para recreación, contacto y consumo, pero

no la concentración de 1,0 mg/L que es ideal para la conservación de la vida acuática. Los sulfatos (mg SO4-/L) tienen concentraciones muy bajas en todas las estaciones, entre1, 5 -4,18 mg/L, cuando el límite para aguas naturales, recreación y para potabilizar está en 250 mg/L. Los cloruros (mg Cl-/L) son bajos en todas las estaciones, entre 1,35 - 2,2 mg/L pues la concentración en aguas dulces no debe superar el rango 10-250mg/L.

También se analizaron otras sustancias disueltas en el agua y metales pesados, pero ninguna superó el límite de detección del método de análisis: Fenoles 0,001mg C6H6/L, Cobre 0,02mg Cu/L, Cadmio 0,003mg Cd/L, Plomo mg 0,01Pb/L, Zinc, 0,02mg Zn/L, Cromo Total 0,05mg Cr/L y Cromo Hexavalente 0,05mg Cr (VI)/L, lo cual significa que no hay contaminantes provenientes de la industria y de las actividades agropecuarias.

En esta quebrada, las grasas y/o aceites no sobrepasan el nivel de detección mínimo del método de análisis utilizado, <9,32 mg Grasas y Aceites/L, por lo tanto no se sabe si superan la concentración de 0,01 mg/L para la conservación de la fauna o están ausentes para su consumo y uso recreativo directo.

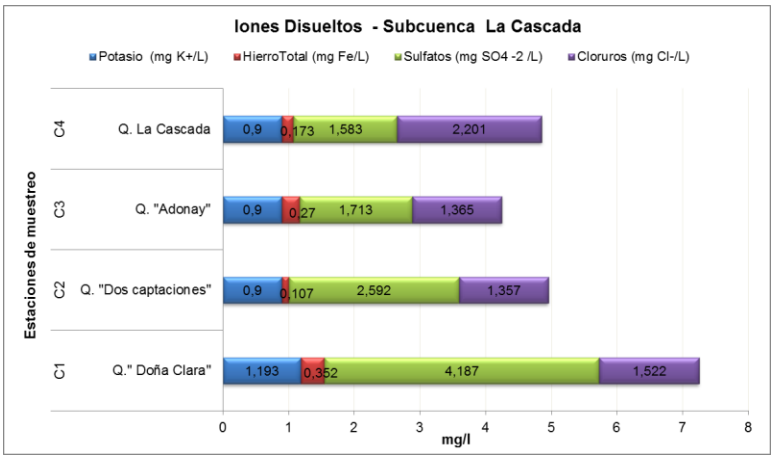



Figura 3-197 - Iones disueltos en el agua Potasio (mg K+/L) Hierro Total (mg Fe/L) Sulfatos (mg SO4 -2/L) Cloruros (mg Cl-/L) en las estaciones de la Q. La Cascada y sus afluentes.

La demanda química de oxígeno, DQO, presenta valores entre 2 -22 mg O2/L; todas las estaciones sobrepasan el rango para aguas superficiales no contaminadas, 1,0 -5,0 mg/L; las más altas demandas de oxígeno se presentan en C1 Quebrada Doña Clara (20 mg/L) y C2 Quebrada "Dos Captaciones" (22 mg/L). La DBO5 presentó demandas de oxígeno por debajo del límite de detección del método de análisis, <1,89 mgO2/L que son inferiores a cualquier tipo de restricción. La relación DBO/DQO<0,2, lo que hace suponer que estas estaciones reciben escorrentías y/o vertidos inorgánicos, imposible de depurar de forma biológica.

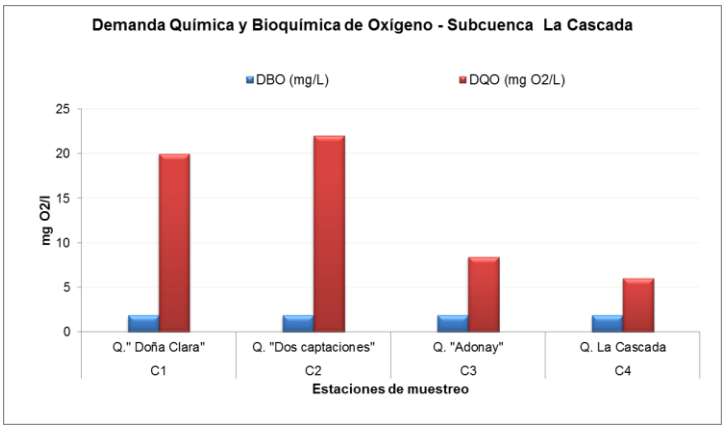



Figura 3-198 - Contaminación orgánica, DBO (mg/L) y DQO (mg O2/L) en las estaciones de la Q. La Cascada y sus afluentes.

Todas las estaciones de la quebrada tienen presencia de coliformes totales y fecales. Los coliformes fecales son una fracción de los coliformes totales e indican la presencia de heces animales y humanas en el agua por vertido de aguas residuales, uso de fertilizantes orgánicos (gallinaza y porquinaza) o por escorrentía de explotaciones pecuarias y por lo tanto evidencian la posibilidad de microorganismos patógenos para humanos y animales, bien sea por contacto o por vía digestiva. CA1 Quebrada La Espadera Aguas Arriba y CA4 Quebrada Cañada Negra presentan contaminación fecal por encima de 200 NMP/100 ml y más de 1000 coliformes fecales que restringen estas aguas para uso pecuario, recreación primaria (contacto directo) y preservación de la flora y la fauna. CA2 Quebrada La Espadera Aguas Abajo y CA3 Quebrada El Chupadero Aguas Arriba tienen esas mismas restricciones por tener más de 1000 coliformes totales. C1 Quebrada Doña Clara y C2 Quebrada "Dos Captaciones", las estaciones más contaminadas, por tener más de 20.000 coliformes totales también tienen restricciones para sólo tratamiento convencional del agua, uso agrícola y contacto secundario.

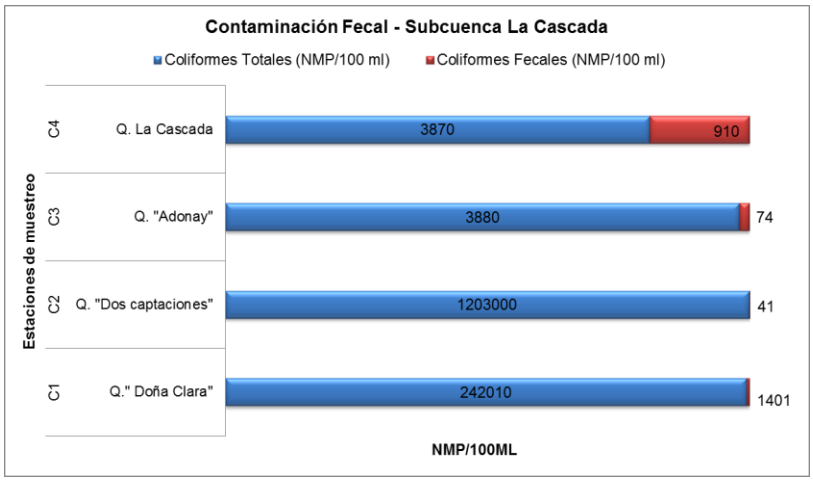



Figura 3-199 - Contaminación fecal en las estaciones de la Q. La Cascada y sus afluentes .

### Índice de la calidad del agua de la Subcuenca La Cascada

En la subcuenca La Cascada, tienen calidad Buena, excepto una estación en La Cascada, C1 Quebrada Doña Clara que tiene calidad media. Todas las estaciones de La Cascada tienen contaminación fecal y concentraciones de fósforo altas; se destaca C1 Quebrada Doña Clara por tener una muy baja saturación de oxígeno y alta DQO.

En la siguiente tabla se presenta el índice de la calidad del agua en las estaciones de la Q. La Cascada, afluente de la Q. La Cascada, presentan ICAfa de calidad de agua Buena, excepto C1 Quebrada Doña Clara, que presenta agua de calidad media por tener una saturación de oxígeno muy baja, 38,7% que es inconveniente para mantener la vida en el agua.

Tabla 3-93 - Calidad del agua en las estaciones de la Q. La Cascada, afluente de La Honda, cuenca La Cascada.

| Nombre | No. Estación | pH (unidades pH) | DQO ( mg/L O2) | DBO5 (mg/L) | Sólidos suspendidos Totales(SST) | FOSFORO TOT (mg/L-P) | CONDUCTIVIDAD ((usiemens/cm) | % SATURACION OXIGENO | E Coli (UFC/100 mL) | IPH | IDQO | IDBO5 | Isst | Icond | I%sat | I Ecoli | I FOSFORO TOTAL (PO4) | ICA fa | DESCRIPTOR / COLOR |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Q." Dña. Clara" | C1 | 7,66 | 20,0 | 20,0 | 18,0 | 0,42 | 26,2 | 38,7 | 1401 | 1 | 0,001 | 0,14 | 0,97 | 0,95 | 0,39 | 1,0 | 0,50 | 0,7 | Media |
| Q. "Dos captaciones" | C2 | 7,71 | 22,0 | 22,0 | 27,0 | 1,37 | 19,1 | 84,7 | 41 | 1 | 0,001 | 0,11 | 0,94 | 0,97 | 0,85 | 1,0 | 0,25 | 0,7 | Buena |
| Q. "Adonay " | C3 | 7,56 | 8,40 | 8,40 | 23,0 | 2,08 | 18,7 | 86,6 | 74 | 1 | 1 | 0,40 | 0,95 | 0,97 | 0,87 | 1,0 | 0,25 | 0,8 | Buena |
| Q. La Cascada | C4 | 6,78 | 6,00 | 6,00 | 4,23 | 3,20 | 51,9 | 88,5 | 910 | 0,89 | 1 | 0,50 | 1 | 0,89 | 0,88 | 1,0 | 0,25 | 0,9 | Buena |

Fuente: Consorcio Siga-Plyma

#### 3.2.5.3.5 Subcuenca Honda

Los resultados de las variables fisicoquímicas de las estaciones de la Q. la Honda se presentan en la siguiente tabla:

Figura 3-200 - Resultados de los análisis fisicoquímicos in situ y ex situ en las estaciones del área de influencia del túnel, subcuenca de las Quebrada La Honda.

| Estación | Ho2 | Ho1 |
|---|---|---|
| Variable | Q. Villanueva | Q.Manguruma |
| Coordenada X | 845014 | 845460 |
| Coordenada Y | 1177222 | 1177483 |
| Coordenada Z | 2540 | 2500 |
| Saturación de Oxigeno (%) | 79 | 89,6 |
| Conductividad (µS/cm) | 10,00 | 10 |
| pH | 6,8 | 8,6 |

| Estación | Ho2 | Ho1 |
|---|---|---|
| Variable | Q. Villanueva | Q.Manguruma |
| Oxiqeno Disuelto (mg $O_2$/L) | 7,6 | 7,73 |
| DBO (mg/L) | 1,89 | 1,89 |
| DQO (mg $O_2$/L) | 33,00 | 2,46 |
| Turbiedad (N.T.U) | 0,8 | 3,17 |
| Alcalinidad Total (mg $CaCO_3$/L) | 11,5 | 13 |
| Acidez Total (mg $CaCO_3$/L) | 3 | 3 |
| Amonio (mg $NH^{4+}$/l) | 0,083 | 0,06 |
| Nitritos (mg $NO^{2-}$/L) | 0,05 | 0,05 |
| Nitratos (mg $NO^{3-}$/L) | 0,25 | 0,27 |
| Fósforo Total (mg P/L) | 1,36 | 1,46 |
| Potasio (mg $K^{+}$/L) | 0,90 | 0,90 |
| HierroTotal (mg Fe/L) | 0,122 | 0,898 |
| Sólidos Totales (mg ST/L) | 25,00 | 96,00 |
| Sólidos DisueltosTotales (mg SDT/L) | 21,00 | 84,00 |
| Sólidos Suspendidos Tótales (mg SST/L) | 4,23 | 11,00 |
| Sólidos Sedimentables (mg/L) | 0,00 | 0,1 |
| Sulfatos (mg $SO4^{-2}$ /L) | 1,27 | 1,25 |
| Cloruros (mg $Cl^{-}$/L) | 1,25 | 1,25 |
| Grasasv/o Aceites(mg Grasas y Aceites/L) | 11,00 | 9,32 |
| Fenoles (mg $C_6H_6$/L) | 0,00 | 0,00 |
| Detergentes (mg SAAM/L) | 0,047 | 0,06 |
| Dureza Calcica (mg $CaCO_3$/L) | 3,02 | 2,50 |
| Dureza Magnésica (mg $CaCO_3$//L) | 3,71 | 3,71 |
| Cobre (mg Cu/L) | 0,02 | 0,02 |
| Cadmio (mg Cd/L) | 0,003 | 0,003 |
| Plomo (mg Pb/L) | 0,01 | 0,01 |
| Zinc (mg Zn/L) | 0,02 | 0,02 |
| Cromo Total (mg Cr/L) | 0,05 | 0,05 |
| Cromo Hexavalente (mg Cr(VI)/L) | 0,05 | 0,05 |
| Coliformes Totales (NMP/100 ml) | 520 | 6870 |
| Coliformes Fecales (NMP/100 ml) | 85 | 350 |

Fuente: Consorcio Siga-Plyma

La temperatura del agua de esta quebrada está dentro del rango para quebradas con esta altura sobre el nivel del mar, entre 14,7 ºC en Ho2 y 16,1 ºC en Ho1. El oxígeno disuelto en Ho1 es alto, 8,61mg/l, mientras que en Ho2 (5,78 mg/L) está ligeramente por debajo de la concentración de 6,2 mg/L que es la mínima para sostener la vida silvestre, pero no está restringida para otros usos como el agropecuario o el contacto primario. El pH en ambas estaciones está dentro del rango 6,2 - 8,6unid. Que es el rango para sostener vida silvestre, potabilizar el agua y para uso agrícola y pecuario. La saturación de oxígeno en ambas estaciones es alta, 79% en Ho2 y 89,6% en Ho1, lo cual indica que en estas estaciones hay una disponibilidad de oxígeno para los organismos acuáticos y para la oxidación de la materia orgánica.

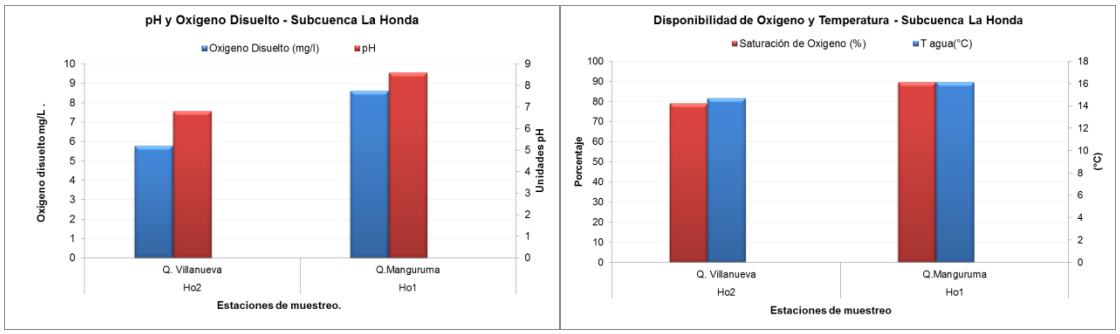



Figura 3-201 - Temperatura, pH, oxígeno y saturación de oxígeno en las estaciones de la Q. La Honda y sus afluentes.

Los sólidos totales están por debajo del rango promedio de los ríos (<120 mg/L) y del límite para peces de 100 mg/L, siendo más altos en Ho 1 donde alcanza 96.0mg/L. Los sólidos totales están representados en su mayoría por sólidos disueltos totales. Los sólidos suspendidos son bajos, en Ho2 no alcanzan al límite de detección del método y en Ho1 están ligeramente por encima de los 10mg/L, concentración propia de aguas de buena calidad. No hay sólidos sedimentables en Ho2 y en HO1 son muy bajos, no pasan de 0,1 mg/L. Los sólidos disueltos en todas las estaciones están por debajo de 200 mg/L que es el parámetro de agua potable.

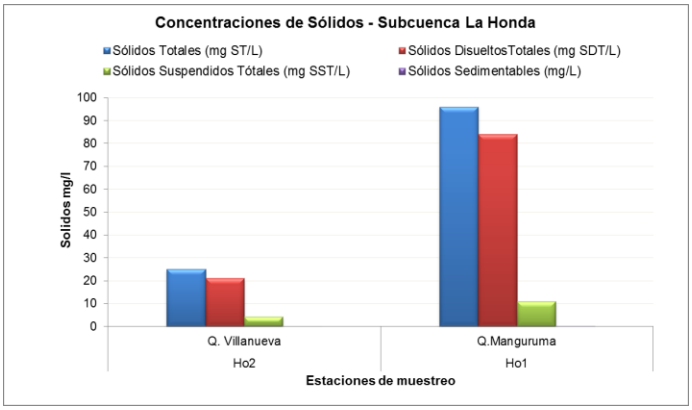



Figura 3-202 - Sólidos totales, suspendidos, disueltos y sedimentarios en las estaciones de la Q. La Honda y sus afluentes.

.

La conductividad eléctrica es baja, 10 µS/cm, en ambas estaciones, valor que está en el límite inferior del rango de ríos neotropicales, entre 10 y 200 µS/cm, La turbiedad en todas las estaciones es menor a 10 NTU, la más alta es de 3,17 NTU en Ho1, con lo cual se evidencia que esta quebrada tiene aguas claras.

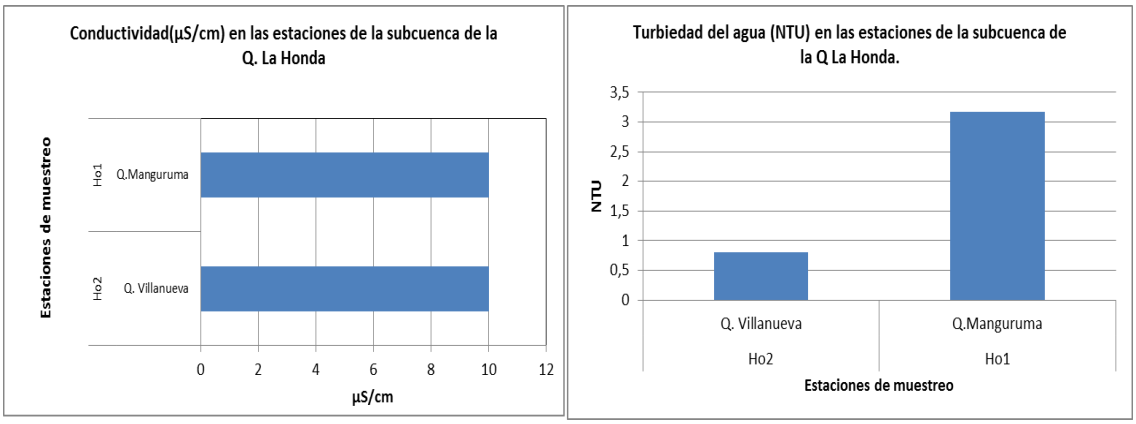



Figura 3-203 - Conductividad y turbiedad en las estaciones de la Q. La Honda y sus afluentes..

La Dureza Cálcica (mg CaCO3/L) es muy baja en todas las estaciones, con un rango entre 2,5 - 3,2 mg/L que corresponde a aguas muy blandas, poco productivas, oligotróficas. En cuanto a la Dureza Magnésica (mg CaCO3//L) las concentraciones son muy bajas, 3,7 mg/L en ambas estaciones, muy por debajo del óptimo que es 30 mg/L. La mayor dureza total 6,7 mg/L se presenta en HO2 y es indicadora de aguas blandas, poco productivas. La Alcalinidad Total (mg CaCO3/L) de todas las estaciones de la Q. La Honda es menor de 25 mg/L que es límite superior para corrientes de alta montaña, el rango va desde 11,5 - 13 mg/L que para los valores de pH de esta quebrada corresponde a carbonatos y bicarbonatos. La acidez total en estas quebradas es baja, 3,0 mg/L, que por ser sistema de aguas naturales con el rango de pH de estas quebradas puede asumirse que la acidez se debe casi exclusivamente al $CO_2$, es decir, que la acidez es carbonácea y no mineral.

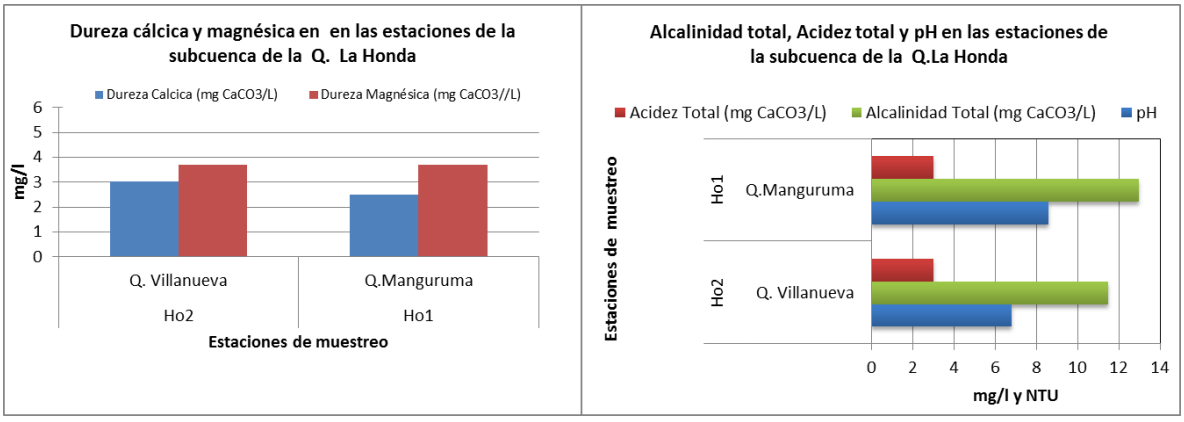



Figura 3-204 - Dureza cálcica y magnésica, Alcalinidad Total y Acidez Total en las estaciones de la Q. La Honda .

En relación a los nutrientes, el Fósforo Total (mg P/L) presenta en esta quebrada concentraciones muy altas, por encima de la concentración límite de 0,03mg/L, las dos estaciones Ho1 y Ho2 están en el rango de la hipereutrófica, por encima de 1,0 mg/L. Ambas presentan contaminación fecal por lo que sus aguas deben recibir aguas de escorrentía de potreros, explotaciones pecuarias o aguas residuales domésticas y en la región es común utilizar abonos y fertilizantes en cultivos y potreros Los Detergentes (mg SAAM/L), que además de ser tensoactivos se relacionan con las concentraciones de fósforo, presentan en todas las estaciones concentraciones por debajo de 0,5

mg/l que es el límite para diferentes usos del agua y por debajo de 0,143 mg/L que es el límite para la conservación de la vida acuática.

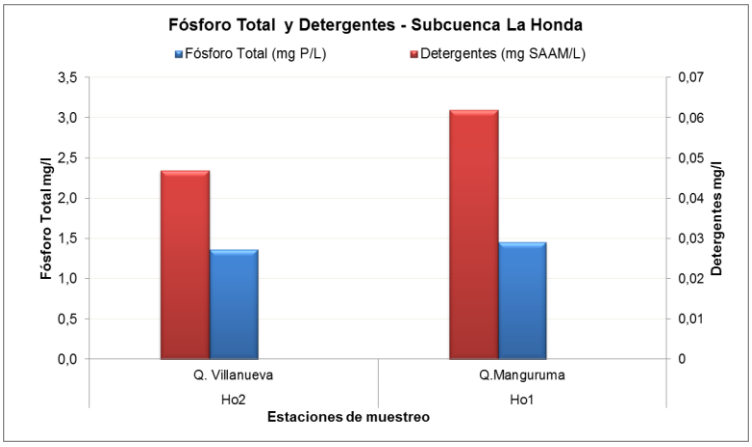



Figura 3-205 - Detergentes y fósforo total en las estaciones de la Q. La Honda y sus afluentes. .

Los nitratos (mg NO3-/L), la forma biodisponible del nitrógeno, están dentro de un rango de 0,25-0,27 mg/L, inferior al límite de uso de 10mg/L para diferentes usos del agua. Los nitritos, la forma que rápidamente se convierte a nitratos en estas corrientes bien oxigenadas, no superan en ninguna estación el límite de detección del método de análisis utilizado de 0,05 mg/L, que están por debajo de las concentraciones recomendadas para diferentes usos de 1,0mg/L. El nitrógeno amoniacal (mg NH4+ /l) también es muy bajo, no supera en ninguna estación las concentraciones límite para diferentes usos y para la conservación de la vida silvestre, 1,0mg/L y 0,1mg/L respectivamente.

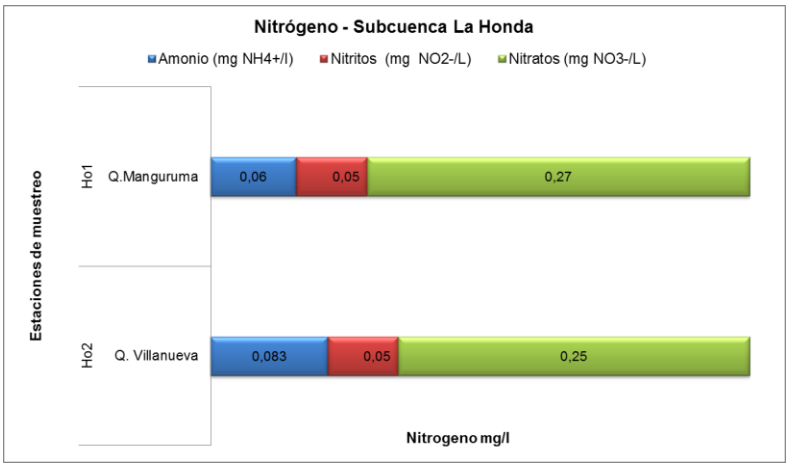



Figura 3-206 - Nitrógeno en las estaciones de la Q. La Honda y sus afluentes.

En relación con los iones disueltos en el agua, se observa que el potasio (mgK+/L) en todas las estaciones tiene concentraciones <0,9 mgL que es el límite de detección del método de análisis, que son menores de 10 mg/L que es lo esperado para aguas naturales superficiales. La presencia de hierro es un problema de calidad del agua muy común en esta región donde los suelos son ricos en este elemento. El agua aún con una pequeña cantidad de hierro puede tornarse rojiza por su exposición al aire y especialmente cuando su pH está por encima de 7,5 unid. Aunque no es tóxico,

la coloración y el sabor se transforman en problema cuando la concentración es mayor que 0,3 mg/L. En Ho1 (0,898 mg/L) se supera el límite de 0,3 mg/L para recreación, contacto y consumo, mientras que en Ho2 está por debajo (0,12 mg/L); en ninguna de las dos se supera la concentración de 1,0 mg/L que es ideal para la conservación de la vida acuática. Los sulfatos (mg SO4-/L) tienen concentraciones muy bajas en todas las estaciones, <1,25 mg/L que es el límite del método de análisis, cuando el límite para aguas naturales, recreación y para potabilizar está en 250 mg/L. Los cloruros (mg Cl-/L) son bajos en todas las estaciones, <1,25 mg/L que es el límite de detección del método de análisis, pues la concentración en aguas dulces no debe superar el rango 10-250mg/L.

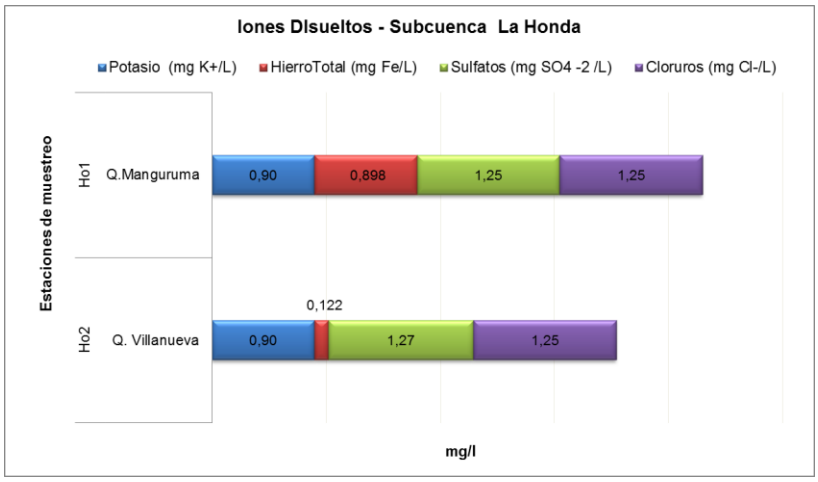



Figura 3-207 - Iones disueltos en las estaciones de la Q. La Honda y sus afluentes.

También se analizaron otras sustancias disueltas en el agua y metales pesados, pero ninguna superó el límite de detección del método de análisis: Fenoles 0,001mg C6H6/L, Cobre 0,02mg Cu/L, Cadmio 0,003mg Cd/L, Plomo mg 0,01Pb/L, Zinc, 0,02mg Zn/L, Cromo Total 0,05mg Cr/L y Cromo Hexavalente 0,05mg Cr (VI)/L, lo cual significa que no hay contaminantes provenientes de la industria y de las actividades agropecuarias. En esta quebrada, las grasas y/o aceites en Ho1 no sobrepasan el nivel de detección mínimo del método de análisis utilizado, <9,32 mg Grasas y Aceites/L, por lo tanto no se sabe si superan la concentración de 0,01 mg/L para la conservación de la fauna o están ausentes para su consumo y uso recreativo directo. En Ho2 (11 mg/L) sí presentan restricciones para el consumo directo, la recreación y la conservación de la fauna silvestre.

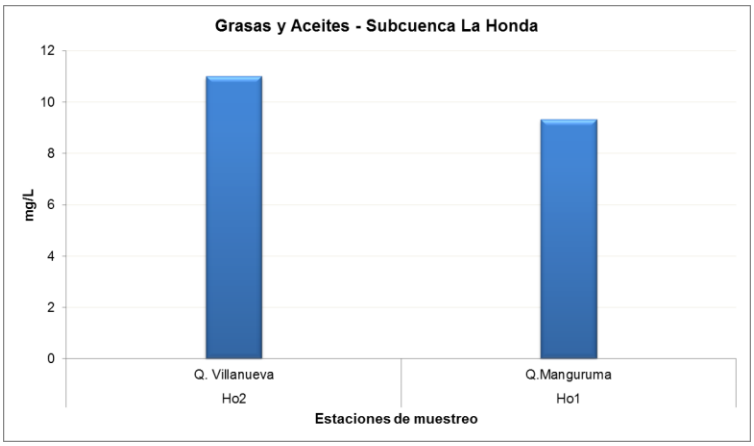



Figura 3-208 - Grasas y/o Aceites en las estaciones de la Q. La Honda y sus afluentes.

La demanda química de oxígeno, DQO, presenta en Ho2 una demanda de oxígeno de 33 mg/L que sobrepasa el rango para aguas superficiales no contaminadas, 1,0 -5,0 mg/L, F2 está por debajo de los límites de detección del método de análisis de <2,46. La DBO5 presentó demandas de oxígeno por debajo del límite de detección del método de análisis, <1,89 mgO2/L que son inferiores a cualquier tipo de restricción. La relación DBO/DQO<0,2, lo que hace suponer que estas estaciones reciben escorrentías y/o vertidos inorgánicos, imposible de depurar de forma biológica.

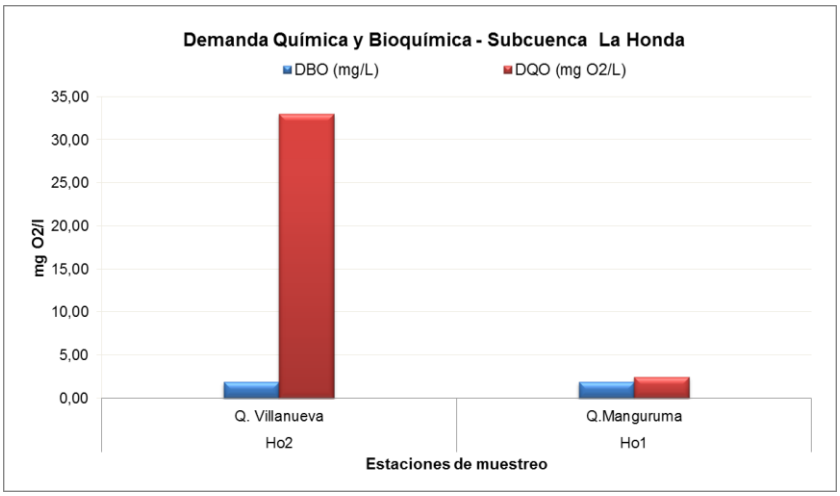



Figura 3-209 - Contaminación orgánica, medida como demanda de oxígeno, DBO (mg/L) y DQO (mg O2/L) en las estaciones de la Q. La Honda y sus afluentes.

Todas las estaciones de la quebrada tienen presencia de coliformes totales y fecales. Los coliformes fecales son una fracción de los coliformes totales e indican la presencia de heces animales y humanas en el agua por vertido de aguas residuales, uso de fertilizantes orgánicos (gallinaza y porquinaza) o por escorrentía de explotaciones pecuarias y por lo tanto evidencian la posibilidad de microorganismos patógenos para humanos y animales, bien sea por contacto o por vía digestiva. Ho1 presentan contaminación fecal por encima de 200 NMP/100 ml que restringe estas aguas para uso pecuario, recreación primaria (contacto directo) y preservación de la flora y la fauna y por tener más de 5000 NMP/100 ml de coliformes totales, también tiene restricciones para uso agrícola y contacto secundario.

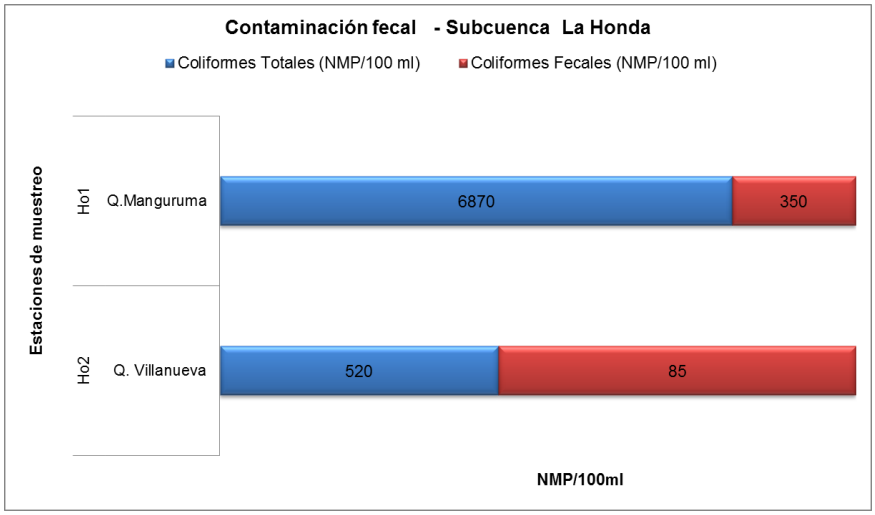



Figura 3-210 - Contaminación fecal en las estaciones de la Q. La Honda y sus afluentes.

### Índice de Calidad del agua de las estaciones en la Subcuenca La Honda

La quebrada La Honda tiene calidad media en sus dos estaciones porque tiene contaminación fecal. La calidad del agua es más deteriorada en Ho1 porque tiene alta concentración de fósforo.

De acuerdo con el cálculo de los ICAfa, las dos estaciones de la quebrada La Honda tienen agua de buena calidad, no alcanzan a ser excelentes porque tienen concentraciones de fósforo por encima de 0,03 mg/L y contaminación fecal.

Tabla 3-94 - Calidad del agua en las estaciones de la Q.La Honda, afluente de La Cascada.

| Nombre | No. Estación | pH (unidades pH) | DQO ( mg/L O2) | DBO5 (mg/L) | Sólidos suspendidos Totales(SST) | FOSFORO TOT (mg/L-P) | CONDUCTIVIDAD ((usiemens/cm) | % SATURACION OXIGENO | E Coli (UFC/100 mL) | IPH | IDQO | IDBO5 | Isst | Icond | I%sat | I Ecoli | I FOSFORO TOTAL (PO4) | ICA fa | DESCRIPTOR / COLOR |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Q. Villanueva | Ho2 | 6,80 | 33,00 | 1,89 | 4,23 | 1,360 | 22,00 | 79,00 | 520 | 0,902 | 0,000 | 1 | 1 | 0,965 | 0,790 | 1,00 | 0,25 | 0,85 | Buena |
| Q.Manguruma | Ho1 | 8,60 | 2,46 | 1,89 | 11,00 | 1,458 | 25,40 | 89,60 | 6870 | 0,733 | 1 | 1 | 0,99 | 0,958 | 0,896 | 1,000 | 0,25 | 0,86 | Buena |

Fuente: Consorcio Siga-Plyma

### 3.2.5.3.6 Cuenca del Rio Negro

Para el estudio de la calidad fisicoquímica del agua se consideró la Cuenca de Ríonegro, las partes altas de la subcuenca La Yarumal con sus quebradas afluentes La Floresta, La Hondina y La Salazar

### *3.2.5.3.6.1 Subcuenca La Hondina*

Los resultados de las variables fisicoquímicas de las estaciones de la subcuenca de la quebrada la Hondina se presentan en la tabla 3.40.

Tabla 3-95 - Resultados de los análisis fisicoquímicos in situ y ex situ en las estaciones del área de influencia del túnel, subcuenca de la Q. La Hondina.

| Estaciones | H1 | H2 | H3 | H4 | H5 | H6 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Variable | Q. El Cerro | Q. El Cerro Aguas Abajo | Q. Los Parra | Q. Los Parra Aguas Abajo | Q. La Hondina 2 | Q. La Hondina |
| Coordenada X | 844631 | 844781 | 844574 | 844621 | 845379 | 845765 |
| Coordenada Y | 1176990 | 1176876 | 1176587 | 1177527 | 1176098 | 1175775 |
| Coordenada Z | 2610 | 2481 | 2597 | 2570 | 2352 | 2317 |
| T agua(°C) | 14,7 | 14,4 | 15,4 | 14,4 | 16,3 | 16,7 |
| Oxigeno Disuelto (mg/l) | 6,77 | 6,55 | 6,8 | 6,8 | 7,06 | 7,55 |
| Saturación de Oxigeno (%) | 92 | 89,8 | 93,8 | 93,4 | 88,8 | 98,2 |
| Conductividad (µS/cm) | 21 | 10 | 36 | 40 | 31 | 33 |
| pH | 8,26 | 6,71 | 6,94 | 7,15 | 6,77 | 6,95 |
| Oxiqeno Disuelto (mg $O_2$/L) | 7,72 | 7,52 | 7,76 | 7,68 | 7,85 | 7,57 |
| DBO (mg/L) | 1,89 | 1,89 | 1,89 | 1,89 | 1,89 | 1,89 |
| DQO (mg $O_2$/L) | 2,46 | 12 | 6,6 | 2,46 | 29 | 27 |
| Turbiedad (N.T.U) | 0,8 | 12 | 5,24 | 5,22 | 1,75 | 8,76 |
| Alcalinidad Total (mg $CaCO_3$/L) | 10,5 | 12 | 15 | 16 | 16 | 15 |
| Acidez Total (mg $CaCO_3$/L) | 2 | 3 | 4 | 3 | 3 | 2 |
| Amonio (mg $NH^{4+}$/l) | 0,071 | 0,06 | 0,06 | 0,06 | 0,119 | 0,119 |
| Nitritos (mg $NO^{2-}$/L) | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 |
| Nitratos (mg $NO^{3-}$/L) | 0,439 | 0,803 | 0,377 | 0,296 | 0,32 | 0,342 |
| Fósforo Total (mg P/L) | 0,065 | 0,065 | 0,066 | 0,067 | 0,397 | 1,766 |
| Potasio (mg $K^+$/L) | 0,9 | 0,901 | 0,902 | 0,903 | 0,904 | 0,905 |
| HierroTotal (mg Fe/L) | 0,06 | 2,14 | 0,50 | 0,62 | 0,15 | 1,43 |
| Sólidos Totales (mg ST/L) | 21 | 74 | 46 | 60 | 63 | 60 |
| Sólidos DisueltosTotales (mg SDT/L) | 21 | 26 | 45 | 55 | 61 | 57 |
| Sólidos Suspendidos Tótales (mg SST/L) | 4 | 48,00 | 4,23 | 5,40 | 4,23 | 4,23 |
| Sólidos Sedimentables (mg/L) | 0 | 0,5 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Sulfatos (mg $SO4^{-2}$ /L) | 1,542 | 1,895 | 2,201 | 2,007 | 1,250 | 1,250 |
| Cloruros (mg $Cl^-$/L) | 1,267 | 1,874 | 1,894 | 1,750 | 1,691 | 1,733 |
| Grasasv/o Aceites(mg Grasas y Aceites/L) | 9,32 | 9,32 | 9,32 | 9,32 | 9,32 | 9,32 |
| Fenoles (mg $C_6H_6$/L) | 0,009 | 0,009 | 0,004 | 0,016 | 0,001 | 0,001 |
| Detergentes (mg SAAM/L) | 0,126 | 0,103 | 0,071 | 0,094 | 0,115 | 0,082 |
| Dureza Calcica (mg $CaCO_3$/L) | 5,206 | 8,723 | 6,704 | 7,495 | 5,561 | 4,773 |
| Dureza Magnésica (mg $CaCO_3$//L) | 3,974 | 5,708 | 4,910 | 5,444 | 3,706 | 3,706 |
| Cobre (mg Cu/L) | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,02 |
| Cadmio (mg Cd/L) | 0,003 | 0,003 | 0,003 | 0,003 | 0,003 | 0,003 |

| Estaciones | H1 | H2 | H3 | H4 | H5 | H6 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Variable | Q. El Cerro | Q. El Cerro Aguas Abajo | Q. Los Parra | Q. Los Parra Aguas Abajo | Q. La Hondina 2 | Q. La Hondina |
| Plomo (mg Pb/L) | 0,01 | 0,01 | 0,011 | 0,012 | 0,013 | 0,014 |
| Zinc (mg Zn/L) | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,02 |
| Cromo Total (mg Cr/L) | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 |
| Cromo Hexavalente (mg Cr(VI)/L) | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 |
| Coliformes Totales (NMP/100 ml) | 2420 | 2420 | 2420 | 2420 | 450 | 6800 |
| Coliformes Fecales (NMP/100 ml) | 40 | 58 | 186 | 308 | 20 | 200 |

Fuente: Consorcio Siga-Plyma

La temperatura del agua de esta quebrada está dentro del rango para quebradas con esta altura sobre el nivel del mar, alrededor de 14ºC en las estaciones más frías H1, H2 y H4 hasta las más cálidas H5 y H6, cuyas temperaturas son de 16,3 y 16,7ºC respectivamente. El oxígeno disuelto en todas las quebradas sobrepasa los 6,55 mg/L que es una buena concentración para sostener la vida silvestre, Las estaciones H5 y H7 tienen las concentraciones más altas, 7,06 y 7,55 mg/L respectivamente. El pH en todas las estaciones está dentro del rango 6,2 - 8,6 unid, que es el rango para sostener vida silvestre, potabilizar el agua y para uso agrícola y pecuario. El pH más alto, de 8,26 unid se presenta en H1 y el más bajo 6,71 unid en H2. La saturación de oxígeno, que está en función de la temperatura y la concentración de oxígeno disuelto, en todas las estaciones está por encima del 70%, la mayoría entre 80 y 92%, lo cual indica que en estas estaciones hay una disponibilidad alta de oxígeno para los organismos acuáticos y contaminación ligera con probabilidad de fácil autodepuración.

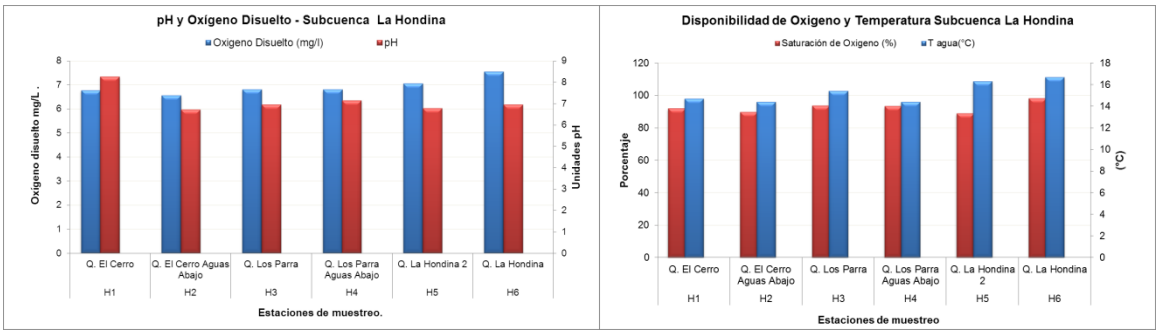



Figura 3-211 - Temperatura, pH, oxígeno y saturación de oxígeno en las estaciones de la Q. La Hondina y sus afluentes.

Los sólidos totales están por debajo del rango promedio de los ríos (<120 mg/L) y del límite para peces de 100 mg/L, fluctúan en estas estaciones entre 21 y 74 mg/L, presentando el valor más alto H2. Los sólidos totales están representados en su mayoría por sólidos disueltos. Los sólidos suspendidos, con excepción la estación H2, en las demás estaciones son tan bajos en que no alcanzan el límite de detección del método de análisis; se encontraron sólidos sedimentables en una sola estación, H2 con 0,5 mg/L. Los sólidos disueltos, que son la mayor fracción de los sólidos totales, están muy por debajo de 200 mg/L que es el parámetro de agua potable, pues su mayor

concentración en H5 apenas alcanza a 61 mg/L. Por lo anterior, se deduce que la Hondina es una quebrada de aguas con muy pocos sólidos.

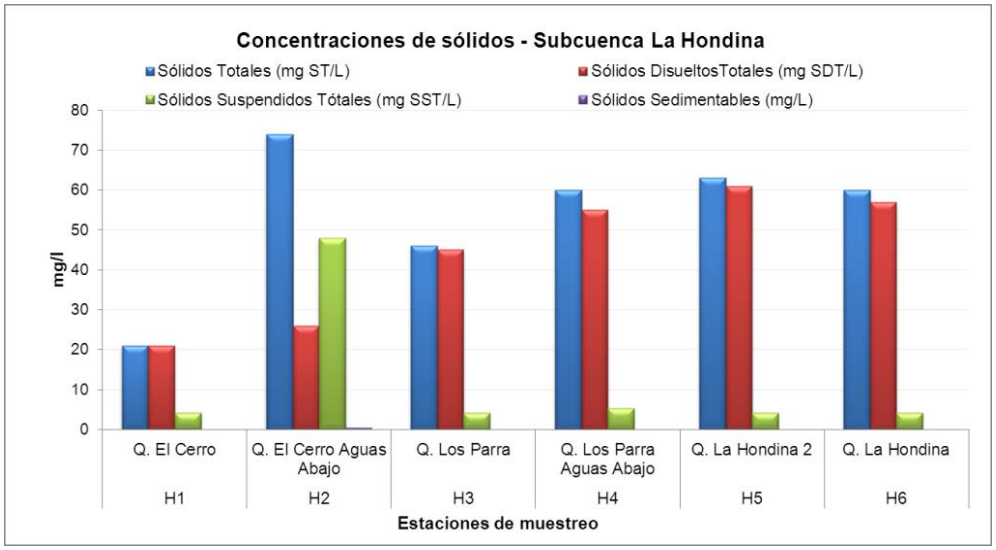
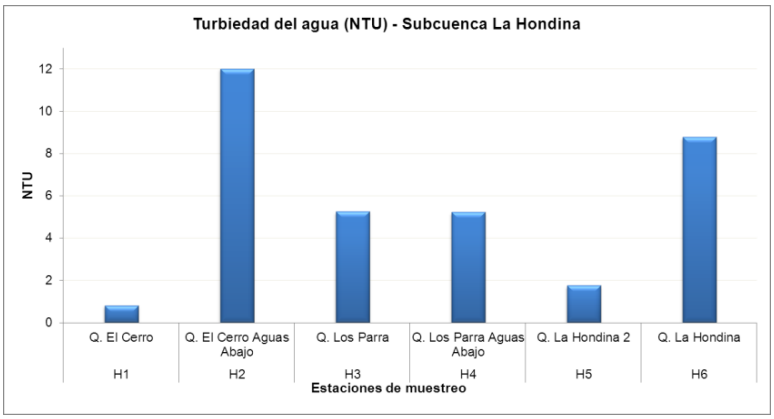



Figura 3-212 - Sólidos totales, suspendidos, disueltos y sedimentarios en las estaciones de la Q. La Hondina y sus afluentes. .

La conductividad eléctrica es baja, la más alta es de 40 µS/cm, en H4, es decir, que las estaciones de esta quebrada presentan aguas que están dentro del rango de corrientes de cuenca alta no contaminadas, entre 10 y 50 µS/cm. La turbiedad en todas las estaciones está por debajo de 10 NTU, concordando con las concentraciones bajas de sólidos encontrados en sus aguas.



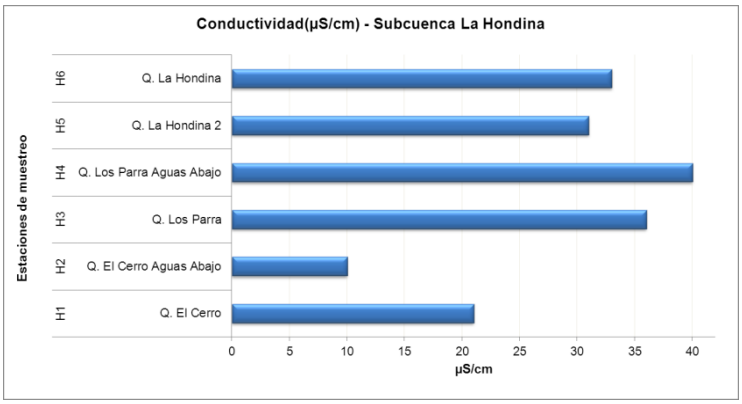



Figura 3-213 - Conductividad y turbiedad en las estaciones de la Q. La Hondina y sus afluentes.

La Dureza Cálcica (mg CaCO3/L) es muy baja en todas las estaciones, con un rango entre 4,7 - 8,7 mg/L que corresponde a aguas muy blandas, poco productivas, oligotróficas. En cuanto a la Dureza Magnésica (mg CaCO3//L) las concentraciones son muy bajas, entre 3,7-5,7 mg/L, muy por debajo del óptimo que es 30 mg/L. La mayor dureza total 14,4 mg/L se presenta en H2 y es indicadora de aguas blandas, poco productivas.

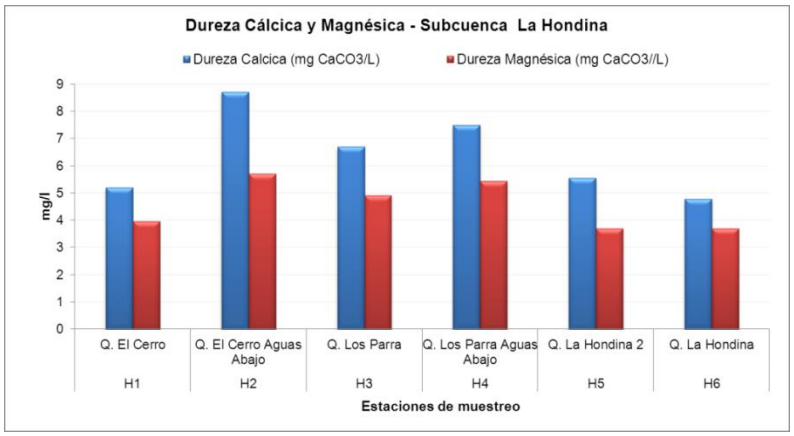



Figura 3-214 - Dureza Cálcica y Magnésica en Q. La Hondina y sus afluentes.

La Alcalinidad Total (mg CaCO3/L) de todas las estaciones de la Q. La Hondina es menor de 25 mg/L que es límite superior para corrientes de alta montaña, el rango va desde 10,5 - 16,0 mg/L que para los valores de pH de esta quebrada corresponde a carbonatos y bicarbonatos. La acidez total en estas quebradas es baja, entre 2,0 – 4,0 mg/L, que por ser sistema de aguas naturales con el rango de pH de estas quebradas puede asumirse que la acidez se debe casi exclusivamente al $CO_2$, es decir, que la acidez es carbonácea y no mineral.

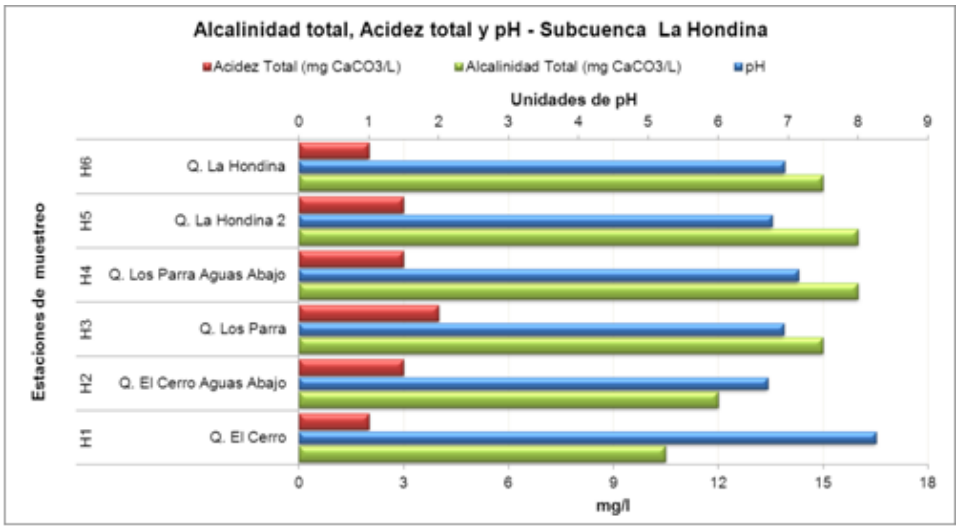



Figura 3-215 - Alcalinidad Total y Acidez Total en las estaciones de la Q. La Hondina y sus afluentes.

En relación a los nutrientes, el Fósforo Total (mg P/L), para las estaciones H1, H2, H3 y H4, no es posible saber si el parámetro está por encima de 0,03mg/L que es el límite superior para los diferentes usos del agua porque el análisis está en el límite de detección del método que es de <0,065mg/L. Por otra parte, las demás otras dos estaciones en esta quebrada presentan concentraciones muy altas, por encima de la concentración límite, H5 con 0,397 mg/L está en el rango de la eutrofia y H6 1,766mg/L se considera hipereutrófica porque sus concentraciones de fósforo total por encima de 1,0 mg/L. Todas las estaciones presentan contaminación fecal por lo que sus aguas deben recibir aguas de escorrentía de potreros o explotaciones pecuarias o aguas residuales domésticas y en la región se utilizan fertilizantes y abonos en cultivos y potreros. Los Detergentes (mg SAAM/L), que además de ser tensoactivos se relacionan con las concentraciones de fósforo, presentan en todas las estaciones concentraciones por debajo de 0,5 mg/l que es el límite para diferentes usos del agua y por debajo de 0,143 mg/L que es el límite para la conservación de la vida acuática.

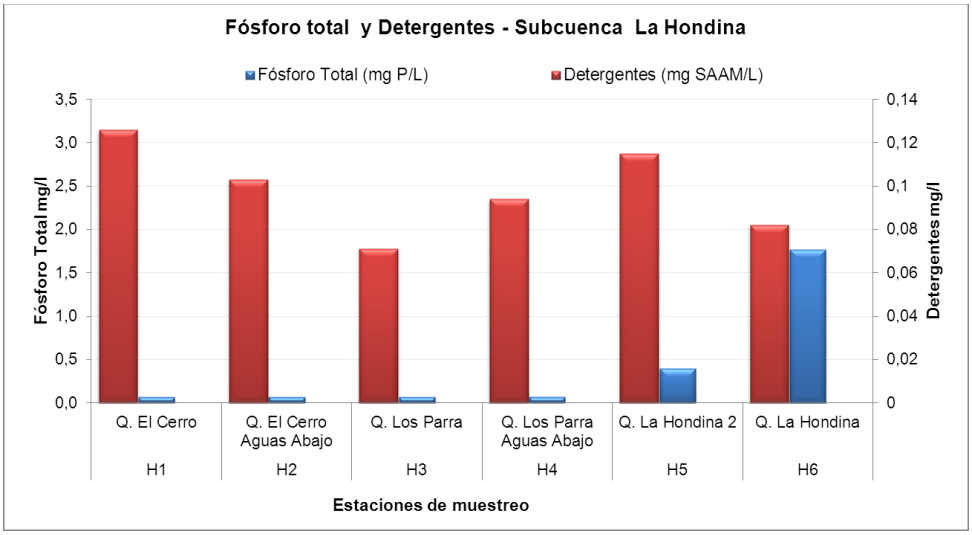


Figura 3-216 - Detergentes y fósforo total en las estaciones de la Q. La Hondina y sus afluentes. .

Los nitratos (mg NO3-/L), la forma biodisponible del nitrógeno, están dentro de un rango de 0,29 - 0,80 mg/L, inferior al límite de uso de 10mg/L para diferentes usos del agua. Los nitritos, la forma que rápidamente se convierte a nitratos en estas corrientes bien oxigenadas, no superan en ninguna estación el límite de detección del método de análisis utilizado de 0,05 mg/L, que están por debajo de las concentraciones recomendadas para diferentes usos de 1,0mg/L. El nitrógeno amoniacal (mg NH4+ /l) también es muy bajo, con excepción de H5 (0,119 mg/L), no supera en ninguna estación las concentraciones límite para diferentes usos y para la conservación de la vida silvestre, 1,0mg/L y 0,1mg/L respectivamente.

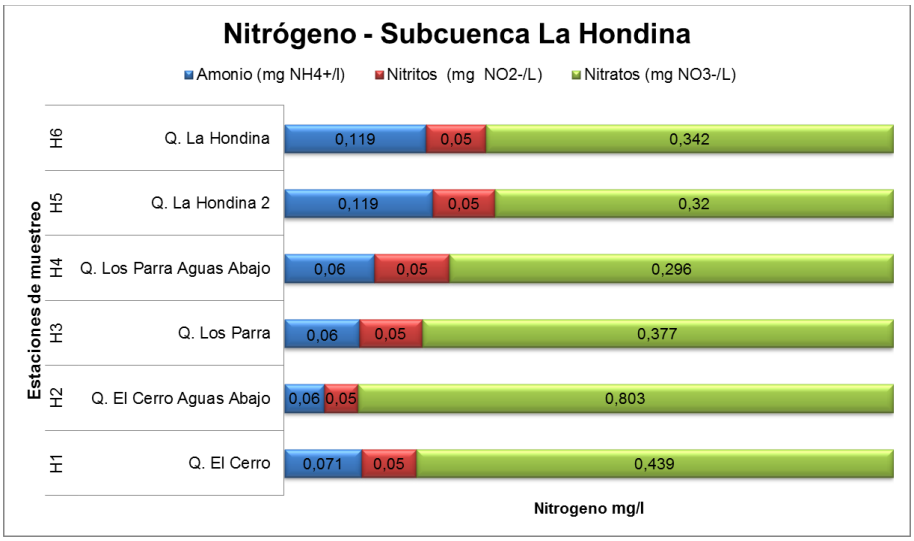



Figura 3-217 - Nitrógeno (Nitratos, nitritos y N-amoniacal) en las estaciones de la Q. La Hondina y sus afluentes-

En relación con los iones disueltos en el agua, se observa que el potasio (mgK+/L) en todas las estaciones tiene concentraciones menores de 10 mg/L que es lo esperado para aguas naturales superficiales. La presencia de hierro es un problema de calidad del agua muy común en esta región donde los suelos son ricos en este elemento. El agua aún con una pequeña cantidad de hierro puede tornarse rojiza por su exposición al aire y especialmente cuando su pH está por encima de 7,5 unid. Aunque no es tóxico, la coloración y el sabor se transforman en problema cuando la concentración es mayor que 0,3 mg/L. Exceptuando las estaciones H1 y H5, en las demás estaciones se supera el límite de 0,3 mg/L que es el límite para recreación, contacto y consumo, sólo en H2 (2,14 mg/L) y H6 (1,43 mg/L) se supera la concentración de 1,0 mg/L que es ideal para la conservación de la vida acuática. Los sulfatos (mg SO4-/L) tienen concentraciones muy bajas en todas las estaciones, entre 1,25 - 2,2 mg/L, cuando el límite para aguas naturales, recreación y para potabilizar está en 250 mg/L. Los cloruros (mg Cl-/L) son bajos en todas las estaciones, entre 1,26 -1,89 mg/L, pues la concentración en aguas dulces no debe superar el rango 10-250mg/L.

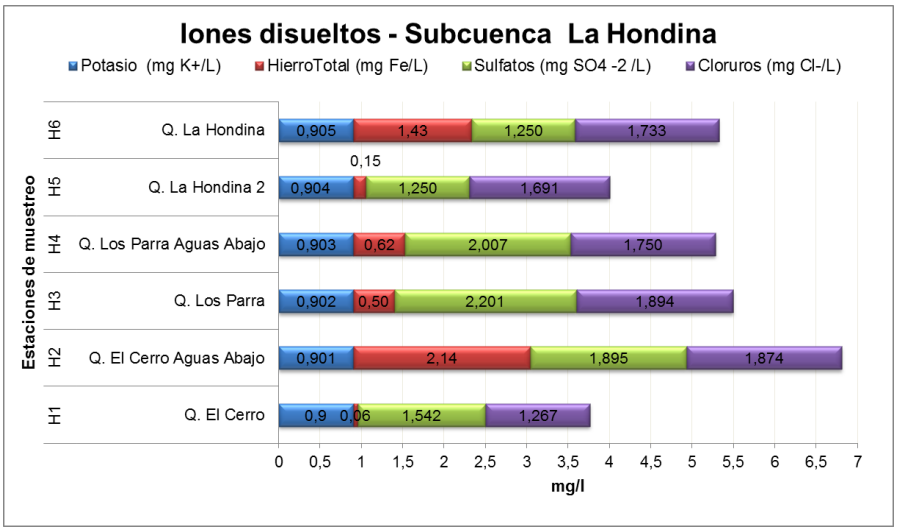



Figura 3-218 - Iones disueltos de la Q. La Hondina y sus afluentes.

También se analizaron otras sustancias disueltas en el agua y metales pesados, pero ninguna superó el límite de detección del método de análisis: Fenoles 0,001mg C6H6/L, Cobre 0,02mg Cu/L, Cadmio 0,003mg Cd/L, Plomo mg 0,01Pb/L, Zinc, 0,02mg Zn/L, Cromo Total 0,05mg Cr/L y Cromo Hexavalente 0,05mg Cr (VI)/L, lo cual significa que no hay contaminantes provenientes de la industria y de las actividades agropecuarias. En esta quebrada, las grasas y/o aceites no sobrepasan el nivel de detección mínimo del método de análisis utilizado, <9,32 mg Grasas y Aceites/L, por lo tanto no se sabe si superan la concentración de 0,01 mg/L para la conservación de la fauna o están ausentes para su consumo y uso recreativo directo.

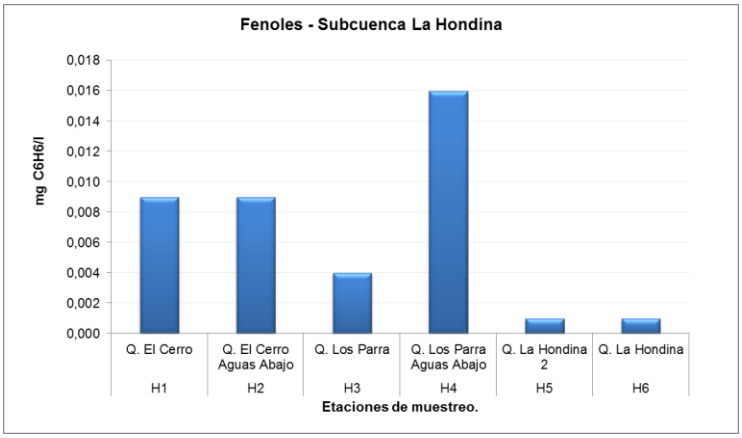



Figura 3-219 - Fenoles (mg C6H6/L) de la Q. La Hondina y sus afluentes.

La demanda química de oxígeno, DQO, presenta valores entre <2,46 - 29 mg O2/L; excepto H1, H3 y H4 que presentan demandas de oxígeno por debajo del límite de detección del método de análisis utilizado, <2,46 mgO2/L, las demás sobrepasan el rango para aguas superficiales no contaminadas, 1,0 -5,0 mg/L; las más altas demandas de oxígeno se presentan en H5 (29 mg/L) y H6 (27 mg/L). La DBO5 presentó demandas de oxígeno por debajo del límite de detección del método de análisis, <1,89 mgO2/L que son inferiores a cualquier tipo de restricción. La relación

DBO/DQO<0,2, lo que hace suponer que estas estaciones reciben escorrentías y/o vertidos inorgánicos, imposible de depurar de forma biológica.

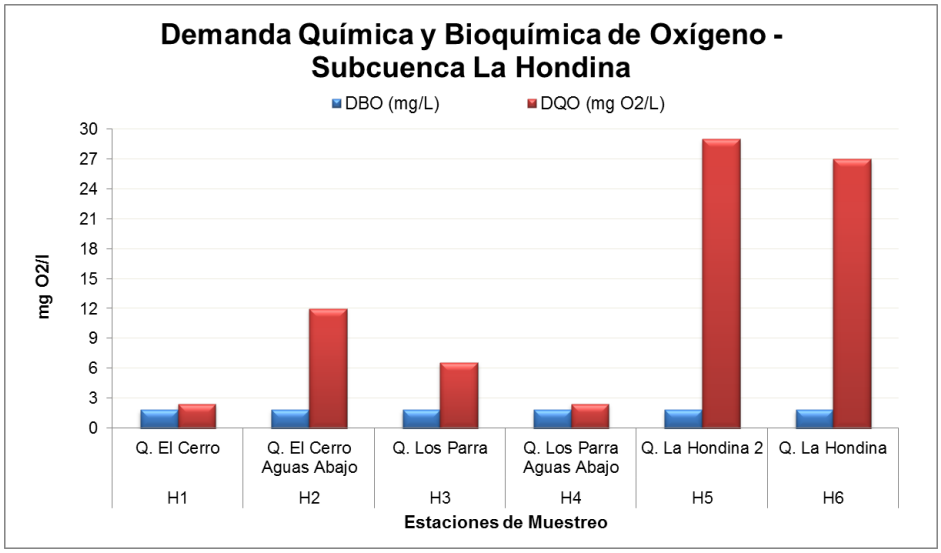



Figura 3-220 - Contaminación orgánica, DBO (mg/L) y DQO (mg O2/L) de la Q. La Hondina y sus afluentes.

Todas las estaciones de la quebrada tienen presencia de coliformes totales y fecales. Los coliformes fecales son una fracción de los coliformes totales e indican la presencia de heces animales y humanas en el agua por vertido de aguas residuales, uso de fertilizantes orgánicos (gallinaza y porquinaza) o por escorrentía de explotaciones pecuarias y por lo tanto evidencian la posibilidad de microorganismos patógenos para humanos y animales, bien sea por contacto o por vía digestiva. H4 y H6 presentan contaminación fecal igual o por encima de 200 NMP/100 ml que restringe estas aguas para su uso pecuario, recreación primaria (contacto directo) y preservación de la flora y la fauna. Por presentar más de 1000 NMP/100 ml de coliformes totales, todas las estaciones, exceptuando H5, tienen restricciones para uso pecuario, recreación primaria y conservación de flora y fauna. H6, la más contaminada de todas, por tener más de 5000 también tiene restricciones para uso agrícola y contacto secundario.

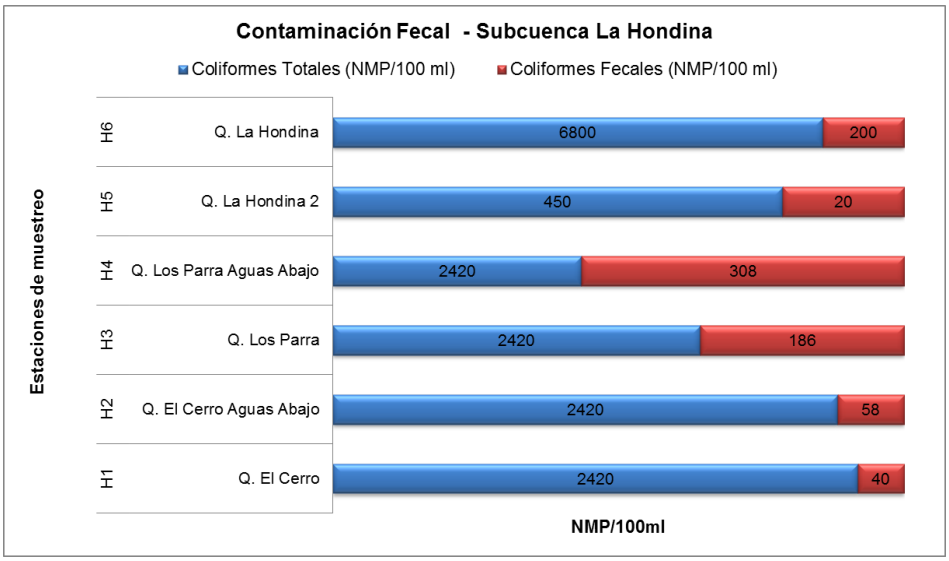



Figura 3-221 - Contaminación fecal en las estaciones de la Q. La Hondina y sus afluentes

### Índice de Calidad de agua de las estaciones de la Cuenca La Hondina.

Todas las estaciones de la Q. La Hondina, afluente de la Yarumal presentan ICAfa que indican calidad de agua buena, las condiciones que no permiten clasificar estas aguas como excelentes son la contaminación fecal y las concentraciones de fósforo, especialmente en H6, cerca de la confluencia con la Q. La Yarumal.

En la quebrada la Hondina el principal problema es la contaminación fecal, razón para que el ICAfa muestre calidad buena en todas las estaciones. H6 presenta también concentración alta de fósforo, de hierro y de DQO.

Tabla 3-96 - Calidad del agua en las estaciones de la Q.La Hondina y sus afluentes.

| Nombre | No. Estación | pH (unidades pH) | DQO ( mg/L O2) | DBO5 (mg/L) | Sólidos suspendidos Totales(SST) | FOSFORO TOT (mg/L-P) | CONDUCTIVIDAD ((usiemens/cm) | % SATURACION OXIGENO | E Coli (UFC/100 mL) | IPH | IDQO | IDBO5 | Isst | Icond | I%sat | I Ecoli | I FOSFORO TOTAL (PO4) | ICA fa | DESCRIPTOR / COLOR |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Q. El Cerro | H1 | 8,26 | 7,72 | 2,46 | 4,23 | 0,065 | 0,06 | 92,00 | 40 | 0,874 | 1 | 0,776 | 1 | 1,000 | 0,920 | 1,000 | 0,50 | 0,88 | Buena |
| Q. El Cerro Aguas Abajo acued. | H2 | 6,71 | 7,52 | 12,00 | 48,00 | 0,065 | 2,14 | 89,80 | 58 | 0,861 | 1 | 0,295 | 0,876 | 0,998 | 0,898 | 1,000 | 0,50 | 0,78 | Buena |
| Q. Los Parra aguas arriba acued. | H3 | 6,94 | 7,76 | 6,60 | 4,23 | 0,065 | 0,50 | 93,80 | 186 | 0,971 | 1 | 0,476 | 1 | 1,000 | 0,938 | 1,000 | 0,50 | 0,84 | Buena |
| Q. Los Parra Aguas Abajo Acued. | H4 | 7,15 | 7,68 | 2,46 | 5,40 | 0,065 | 0,62 | 93,40 | 58 | 1 | 1 | 0,776 | 1,004 | 1,000 | 0,934 | 1,000 | 0,50 | 0,89 | Buena |
| Q. La Hondina 2 | H5 | 6,77 | 29,00 | 1,89 | 4,23 | 0,397 | 28,90 | 88,80 | 200 | 0,889 | 0,000 | 1 | 1 | 0,950 | 0,888 | 1,00 | 0,50 | 0,90 | Buena |
| Q. La Hondina 1 | H6 | 6,95 | 27,00 | 1,89 | 4,23 | 1,766 | 27,30 | 98,2 | 200 | 0,976 | 0,000 | 1 | 1 | 0,954 | 0,982 | 1,000 | 0,25 | 0,90 | Buena |

Fuente: Consorcio Siga-Plyma

### *3.2.5.3.6.2 Quebrada La Floresta*

Los resultados de las variables fisicoquímicas de las estaciones de la Q. La Floresta se presenta en la tabla 3.42.Resultados de los análisis fisicoquímicos in situ y ex situ en las estaciones del área de influencia del túnel, subcuenca de la Q. La Floresta

Tabla 3-97 - Resultados de los análisis fisicoquímicos in situ y ex situ en las estaciones del área de influencia del túnel, subcuenca de la Q. La Flloresta.

| Estación | F1 | F2 | F3 |
|---|---|---|---|
| Variable | Q. La Floresta Parte Alta | Q. La Floresta 1 | Q. La Floresta 2. |
| Coordenada X | 844923 | 845159 | 846281 |
| Coordenada Y | 1175077 | 1175088 | 1175053 |
| Coordenada Z | 2378 | 2423 | 2239 |
| T agua(°C) | 15,5 | 14 | 15,3 |
| Oxigeno Disuelto (mg/l) | 6,87 | 7,02 | 7,08 |
| Saturación de Oxigeno (%) | 93,7 | 93,7 | 70 |
| Conductividad (µS/cm) | 24,30 | 18 | 52,6 |
| pH | 7,02 | 6,76 | 8,8 |
| Oxiqeno Disuelto (mg $O_2$/L) | 7,78 | 7,92 | 7,08 |
| DBO (mg/L) | 1,89 | 1,89 | 1,89 |
| DQO (mg $O_2$/L) | 24 | 2,8 | 18 |
| Turbiedad (N.T.U) | 4,38 | 1,27 | 5,46 |
| Alcalinidad Total (mg $CaCO_3$/L) | 11,5 | 13,5 | 22,5 |
| Acidez Total (mg $CaCO_3$/L) | 3 | 3 | 2 |
| Amonio (mg $NH^{4+}$/l) | 0,06 | 0,142 | 0,06 |
| Nitritos (mg $NO^{2-}$/L) | 0,05 | 0,05 | 0,05 |
| Nitratos (mg $NO^{3-}$/L) | 0,994 | 0,562 | 0,394 |
| Fósforo Total (mg P/L) | 1,939 | 0,426 | 0,067 |
| Potasio (mg $K^{+}$/L) | 0,9 | 0,99 | 0,9 |
| HierroTotal (mg Fe/L) | 1,504 | 0,019 | 0,709 |
| Sólidos Totales (mg ST/L) | 33 | 58 | 65 |
| Sólidos DisueltosTotales (mg SDT/L) | 32 | 56 | 55 |
| Sólidos Suspendidos Tótales (mg SST/L) | 4,23 | 4,23 | 11 |
| Sólidos Sedimentables (mg/L) | 0 | 0 | 0 |
| Sulfatos (mg $SO4^{-2}$ /L) | 1,665 | 1,693 | 2,584 |
| Cloruros (mg $Cl^{-}$/L) | 1,328 | 1,456 | 1,890 |
| Grasasv/o Aceites(mg Grasas y Aceites/L) | 9,32 | 9,32 | 9,32 |
| Fenoles (mg $C_6H_6$/L) | 0,006 | 0,001 | 0,001 |
| Detergentes (mg SAAM/L) | 0,05 | 0,156 | 0,05 |
| Dureza Calcica (mg $CaCO_3$/L) | 4,689 | 6,509 | 11,191 |
| Dureza Magnésica (mg $CaCO_3$//L) | 3,706 | 6,857 | 6,915 |
| Cobre (mg Cu/L) | 0,02 | 0,02 | 0,02 |
| Cadmio (mg Cd/L) | 0,003 | 0,003 | 0,003 |

Fuente: Consorcio Siga-Plyma

La temperatura del agua de esta quebrada está dentro del rango para quebradas con esta altura sobre el nivel del mar, entre 14 y 15,5 ºC, siendo la más fría F2, Q.La Floresta 1. El oxígeno disuelto en todas las quebradas sobrepasa los 6,87 mg/L que es una buena concentración para sostener la vida silvestre, las otras dos estaciones tienen concentraciones alrededor de 7,0 mg/L. El pH,

fluctúa entre 6,76 unid en F2 y 8,8 unid en F3, es decir, que están dentro del rango de 6,2 - 8,6unid. Que es el rango para sostener la vida silvestre, potabilizar el agua y para uso agrícola y pecuario. La saturación de oxígeno, con excepción de F3 que presenta baja saturación de oxígeno, 70%, en las otras dos estaciones F1 y F2 están muy por encima de ese porcentaje, 93,7 % lo cual indica aguas con buena disponibilidad de oxígeno para los organismos acuáticos y para la oxidación de la materia orgánica biodegradable.

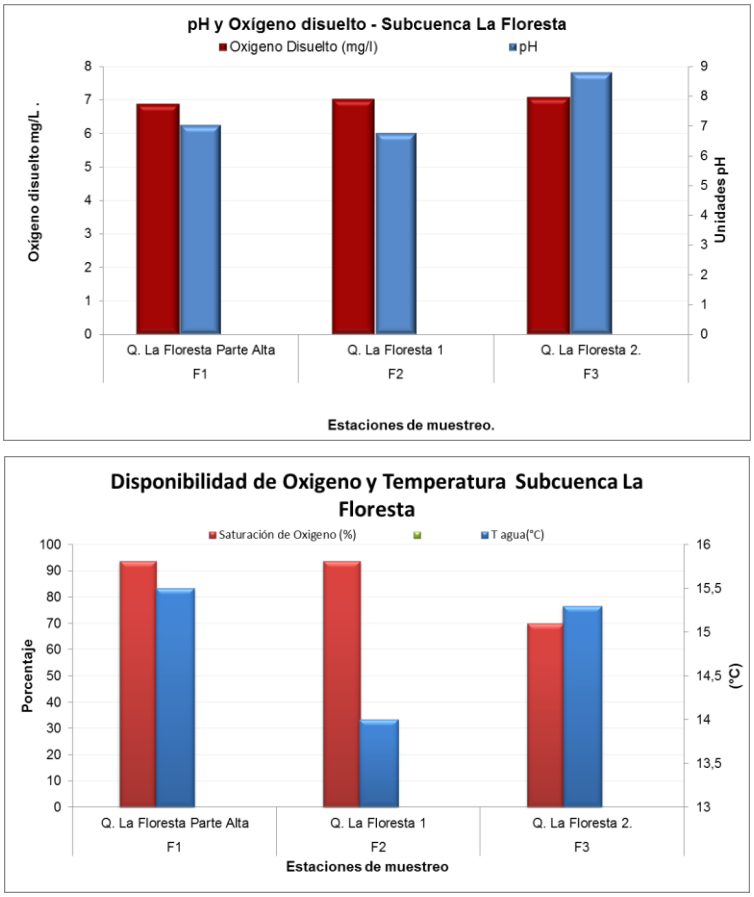



Figura 3-222 - Temperatura, pH, oxígeno y saturación de oxígeno en las estaciones de la Q. La Floresta y sus afluentes..

Los sólidos totales están por debajo del rango promedio de los ríos (<120 mg/L) y del límite para peces de 100 mg/L, en un rango de 33 a 65 mg/L, el mayor en F3. Los sólidos totales están representados en todas las estaciones por los sólidos disueltos como la fracción mayor. Los sólidos suspendidos no alcanzan el límite de detección del método de análisis en F1 y F2, en F3 también es baja la concentración, 11 mg/L, que indica calidad buena en todas las estaciones. Los sólidos sedimentables son 0,0 mg/L en las tres estaciones. Los sólidos disueltos en todas las estaciones son muy bajos, su rango va de 32 a 56 mg/L.

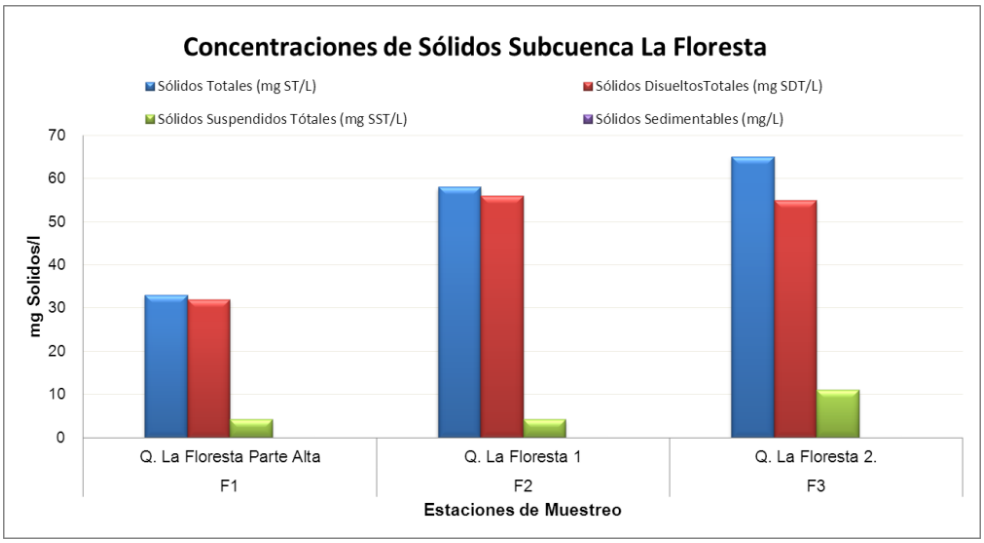
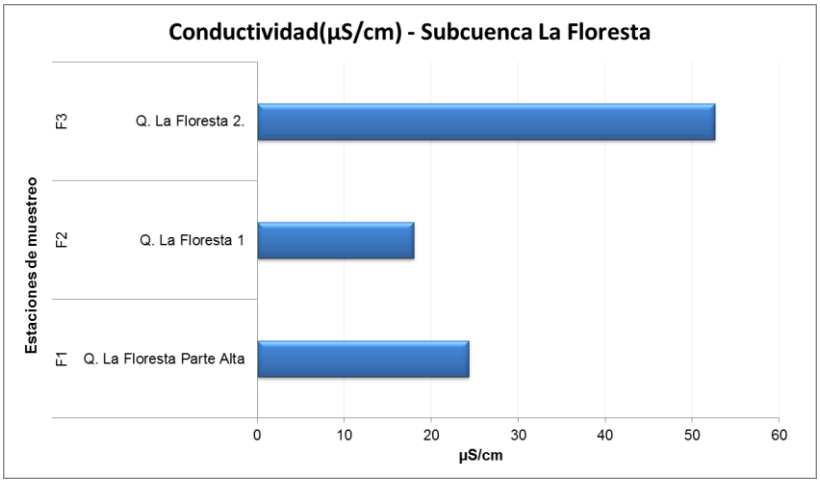



Figura 3-223 - Sólidos de la Q. La Floresta y sus afluentes. .

La conductividad eléctrica es baja en las estaciones F1 y F2, cuyas concentraciones son propias de corrientes de cuencas altas no contaminadas que están en un rango entre 10 y 50 µS/cm, mientras que en F3 es ligeramente más alta 52,6 µS/cm, que tampoco supera el rango de ríos neotropicales, entre 10 y 200 µS/cm. La turbiedad en todas las estaciones está por debajo de 10 NTU, en un rango 1,27 a 5,46 NTU.



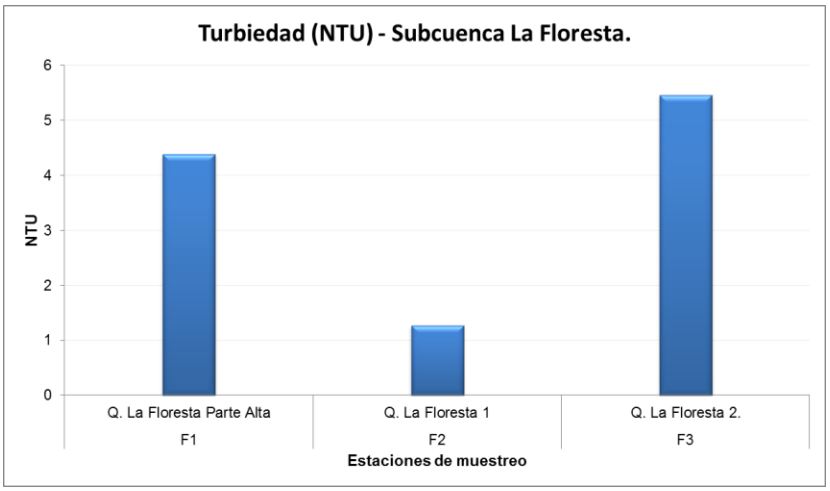



Figura 3-224 Conductividad y turbiedad en las estaciones de la Q. La Floresta y sus afluentes.

La Dureza Cálcica (mg CaCO3/L) es muy baja en todas las estaciones, con un rango entre 4,6 - 11,1 mg/L que corresponde a aguas muy blandas, poco productivas, oligotróficas. En cuanto a la Dureza Magnésica (mg CaCO3//L) las concentraciones son muy bajas, entre 3,7 - 9,4 mg/L, muy por debajo del óptimo que es 30 mg/L. La mayor dureza total 18,0 mg/L se presenta en F3 y es indicadora de aguas blandas, poco productivas.

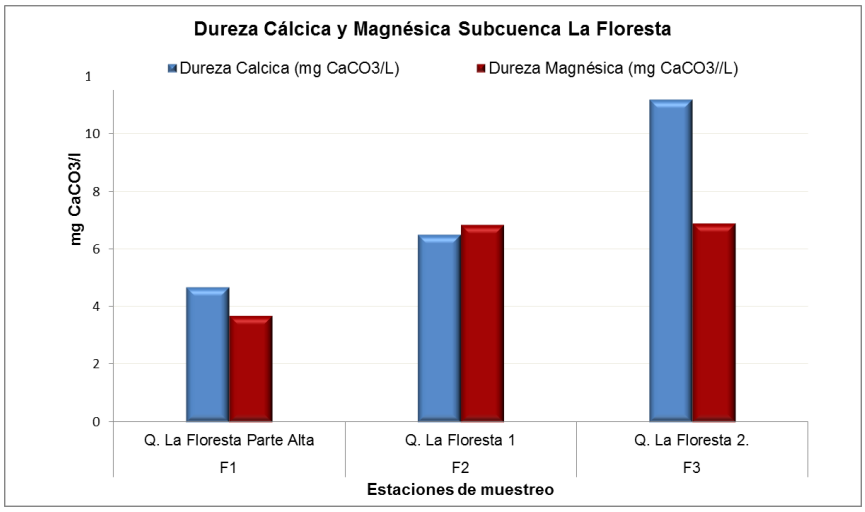



Figura 3-225 - Dureza cálcica y magnésica de la Q. La Floresta y sus afluentes.

La Alcalinidad Total (mg CaCO3/L) de todas las estaciones de la Q. La Floresta es menor de 25 mg/L que es límite superior para corrientes de alta montaña, el rango va desde 11,5 - 22,5 mg/L que para los valores de pH de esta quebrada corresponde a carbonatos y bicarbonatos. La acidez total en estas quebradas es baja, entre 2,0 – 3,0 mg/L, que por ser sistema de aguas naturales con el rango de pH de estas quebradas puede asumirse que la acidez se debe casi exclusivamente al $CO_2$, es decir, que la acidez es carbonácea y no mineral.

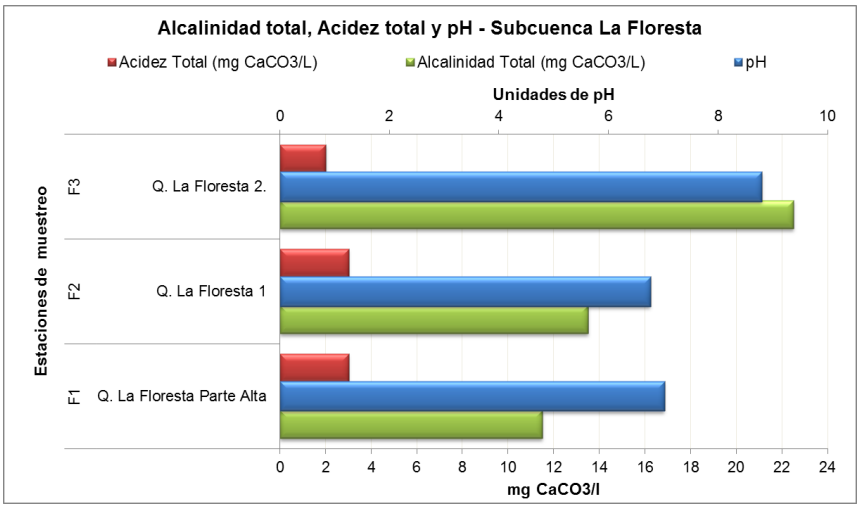



Figura 3-226 - Alcalinidad Total y Acidez Total en las estaciones de la Q. La Floresta y sus afluentes.

En relación a los nutrientes, el Fósforo Total (mg P/L) presenta en esta quebrada concentraciones muy altas, por encima de la concentración límite de 0,03mg/L, todas están en el rango de la eutrofia, entre 0,067 - 1,94 mg/L; se destacan F1 (1,94 mg/L) porque concentraciones por encima de 1,0 mg/L se consideran hipereutróficas. Todas las estaciones presentan contaminación fecal por lo que sus aguas deben recibir aguas de escorrentía de potreros o explotaciones pecuarias o aguas residuales domésticas y en la región es común utilizar abonos y fertilizantes en cultivos y potreros. Los Detergentes (mg SAAM/L), que además de ser tensoactivos se relacionan con las concentraciones de fósforo, presentan en todas las estaciones concentraciones por debajo de 0,5 mg/l que es el límite para diferentes usos del agua y por debajo de 0,143 mg/L que es el límite para la conservación de la vida acuática, excepto en F2 donde presenta una concentración de 0,156 mg/L.

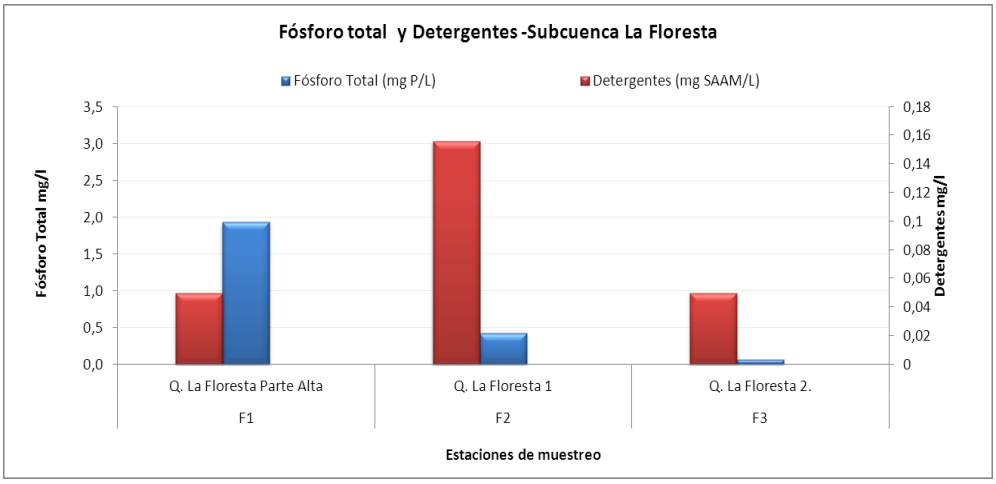



Figura 3-227 - Detergentes y fósforo total en las estaciones de la Q. La Floresta y sus afluentes.

Los nitratos (mg NO3-/L), la forma biodisponible del nitrógeno, están dentro de un rango de 0,39 – 0,94 mg/L, inferior al límite de uso de 10mg/L para diferentes usos del agua. Los nitritos, la forma que rápidamente se convierte a nitratos en estas corrientes bien oxigenadas, no superan en

ninguna estación el límite de detección del método de análisis utilizado de 0,05 mg/L, que están por debajo de las concentraciones recomendadas para diferentes usos de 1,0mg/L. El nitrógeno amoniacal (mg NH4+ /l) también es muy bajo, con excepción de F2 (0,142 mg/L), no supera en ninguna estación las concentraciones límite para diferentes usos y para la conservación de la vida silvestre, 1,0mg/L y 0,1mg/L respectivamente.

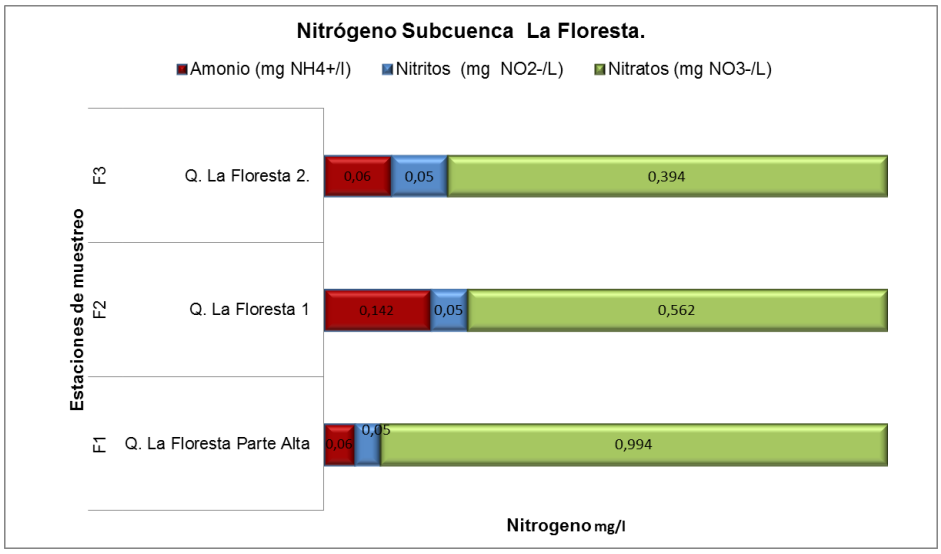



Figura 3-228 - Nitrógeno (Nitratos, nitritos y N-amoniacal) en las estaciones de la Q. y sus afluentes

En relación con los iones disueltos en el agua, se observa que el potasio (mgK+/L) en todas las estaciones tiene concentraciones menores de 10 mg/L que es lo esperado para aguas naturales superficiales. La presencia de hierro es un problema de calidad del agua muy común en esta región donde los suelos son ricos en este elemento. El agua aún con una pequeña cantidad de hierro puede tornarse rojiza por su exposición al aire y especialmente cuando su pH está por encima de 7,5 unid. Aunque no es tóxico, la coloración y el sabor se transforman en problema cuando la concentración es mayor que 0,3 mg/L. Exceptuando las estaciones F2 cuya concentración está por debajo del límite de detección del método de análisis, en las demás estaciones se supera el límite de 0,3 mg/L que es el límite para recreación, contacto y consumo, en F1 (1,5 mg/L) se supera la concentración de 1,0 mg/L que es ideal para la conservación de la vida acuática. Los sulfatos (mg SO4-/L) tienen concentraciones muy bajas en todas las estaciones, entre 1,66 - 2,68 mg/L, cuando el límite para aguas naturales, recreación y para potabilizar está en 250 mg/L. Los cloruros (mg Cl-/L) son bajos, entre 1,32 -1,89 mg/L en todas las estaciones, pues la concentración en aguas dulces no debe superar el rango 10-250mg/L.

También se analizaron otras sustancias disueltas en el agua y metales pesados, los fenoles están por debajo del método de análisis, 0,001mg C6H6/L, en las estaciones F2 y F3, en F1 tienen una concentración de 0,006 mg/L que está muy por debajo de lo permitido para consumo humano y pecuario, cuyo límite es 0,002 mg/L y del límite en aguas naturales <•,5 mg/L. Los metales pesados no superaron en ninguna de las estaciones el límite de detección del método de análisis: Cobre 0,02mg Cu/L, Cadmio 0,003mg Cd/L, Plomo mg 0,01Pb/L, Zinc, 0,02mg Zn/L, Cromo Total 0,05mg

Cr/L y Cromo Hexavalente 0,05mg Cr (VI)/L, lo cual significa que no hay contaminantes provenientes de la industria y de las actividades agropecuarias en esta quebrada.

En esta quebrada, las grasas y/o aceites no sobrepasan el nivel de detección mínimo del método de análisis utilizado, <9,32 mg Grasas y Aceites/L, por lo tanto no se sabe si superan la concentración de 0,01 mg/L para la conservación de la fauna o están ausentes para su consumo y uso recreativo directo.

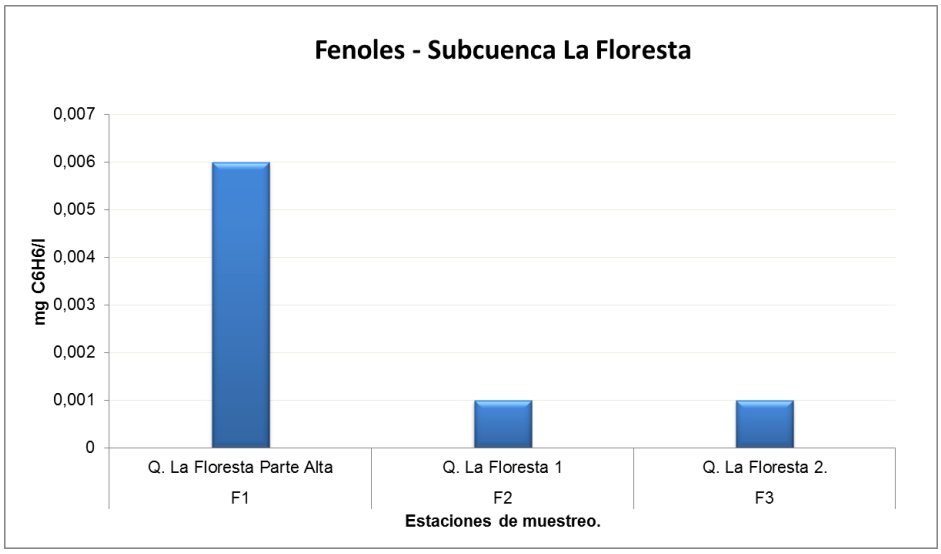



Figura 3-229 - Fenoles (mg C6H6/L) disueltos en el agua en las estaciones de la Q. La Floresta y sus afluentes..

La demanda química de oxígeno, DQO, presenta valores entre 2,8 - 24 mg O2/L; F1 (24 mgO2/L) y F3 (18 mg O2/L) sobrepasan el rango para aguas superficiales no contaminadas, 1,0 -5,0 mg/L, F2 está por debajo de los límites . La DBO5 presentó demandas de oxígeno por debajo del límite de detección del método de análisis, <1,89 mgO2/L que son inferiores a cualquier tipo de restricción. La relación DBO/DQO<0,2, lo que hace suponer que estas estaciones reciben escorrentías y/o vertidos inorgánicos, imposible de depurar de forma biológica.

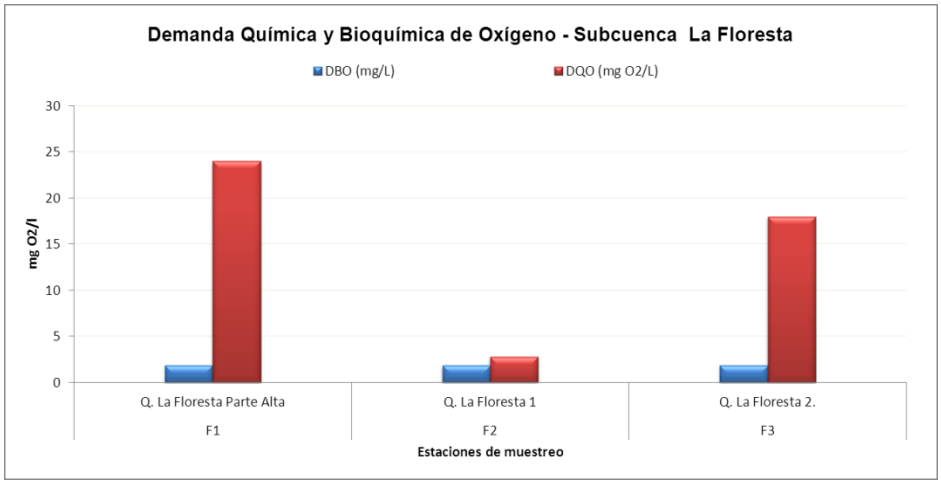


Figura 3-230 - Contaminación orgánica, medida como demanda de oxígeno, DBO (mg/L) y DQO (mg O2/L) en las estaciones de la Q. La Floresta y sus afluentes .

Los coliformes fecales son una fracción de los coliformes totales e indican la presencia de heces animales y humanas en el agua por vertido de aguas residuales, uso de fertilizantes orgánicos (gallinaza y porquinaza) o por escorrentía de explotaciones pecuarias y por lo tanto evidencian la posibilidad de microorganismos patógenos para humanos y animales, bien sea por contacto o por vía digestiva. La estación F3, presenta contaminación fecal por encima de 200 NMP/100 ml que restringe estas aguas para su uso pecuario, recreación primaria (contacto directo) y preservación de la flora y la fauna. Las tres estaciones presentan coliformes totales mayores de 1000 NMP/100ml, por lo que sus aguas, además de las restricciones nombradas antes, tienen limitaciones para uso pecuario, recreación primaria y conservación de flora y fauna. F3, la más contaminada de todas, también tiene restricciones para uso agrícola, contacto secundario y para tratamiento convencional, por tener más de 20.000 coliformes totales NMP/100ml.

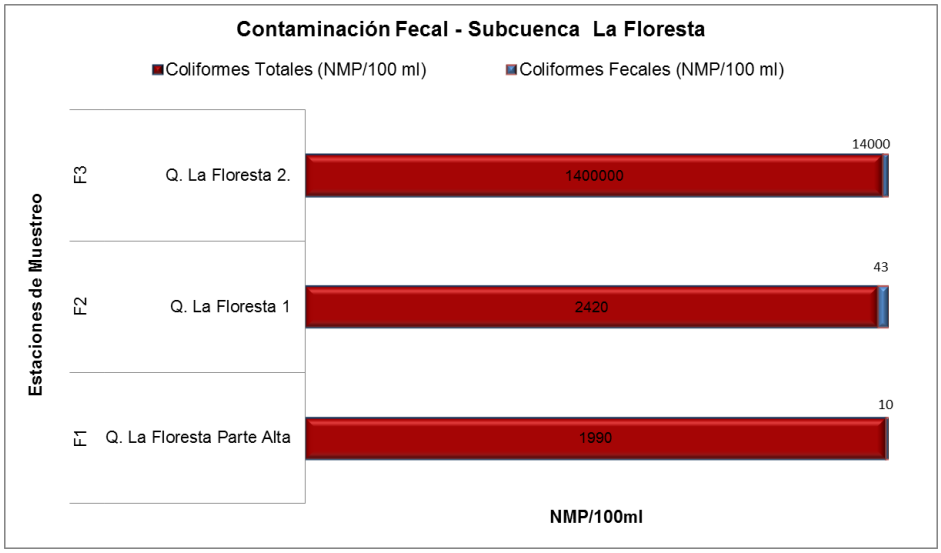



Figura 3-231 - Contaminación fecal en las estaciones de la Q. La Floresta y sus afluentes.

## Índice de la calidad de agua de la Subcuenca La Floresta

Las estaciones de la Q. La Floresta presentan ICAfa que corresponden a calidad de agua Excelente en F2, Q.La Floresta 1, y en F1 y F3, calidad de agua Buena. Todas presentan concentraciones de fósforo por encima de 0,03 mg/l y presencia de coliformes fecales.

Esta quebrada y sus afluentes son los de mejor calidad de toda la cuenca de la Quebrada La Yarumal. El índice de calidad ICAfa para F2 es excelente y para F1 y F3 es bueno. En términos generales la contaminación fecal, es el principal problema de estas fuentes.

Tabla 3-98 - Calidad del agua en las estaciones de la Q.La Floresta, afluente de la Q. Yarumal..

| Nombre | No. Estación | pH (unidades pH) | DQO ( mg/L O2) | DBO5 (mg/L) | Sólidos suspendidos Totales(SST) | FOSFORO TOT (mg/L-P) | CONDUCTIVIDAD ((usiemens/cm) | % SATURACION OXIGENO | E Coli (UFC/100 mL) | IPH | IDQO | IDBO5 | Isst | Icond | I%sat | I Ecoli | I FOSFORO TOTAL (PO4) | ICA fa | DESCRIPTOR / COLOR |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Q. La Floresta Parte alta | F1 | 7,02 | 24 | 1,89 | 4,23 | 1,939 | 24,30 | 93,7 | 10 | 1 | 0,000 | 1 | 1 | 0,960 | 0,937 | 1,000 | 0,25 | 0,89 | Buena |
| Q. La Floresta 1 | F2 | 6,76 | 2,8 | 1,89 | 4,23 | 0,426 | 18 | 93,7 | 43 | 0,884 | 1 | 1 | 1 | 0,974 | 0,937 | 1,00 | 0,50 | 0,91 | Excelente |
| Q. La Floresta.2 | F3 | 8,8 | 18 | 1,89 | 11 | 0,067 | 52,6 | 70 | 14000 | 0,660 | 0,002 | 1 | 0,99 | 0,889 | 0,700 | 0,388 | 0,50 | 0,72 | Buena |

Fuente: Consorcio Siga-Plyma

### *3.2.5.3.6.3 Subcuenca La Yarumal.*

Los resultados de las variables fisicoquímicas de las estaciones de la Q. La Yarumal se presenta en la siguiente tabla:

Tabla 3-99 - Resultados de los análisis fisicoquímicos in situ y ex situ en las estaciones de la Q. Yarumal.

| Estaciones | Y1 | Y2 | Y3 | Y4 | Y5 | Y6 | Y7 | Y8 | Y9 | Y10 | Y11 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Variables | Q. Yarumal 1 | Afluente 1 Yarumal | Afluente 2 Yarumal | Afluente 3-Yarumal | Q. Yarumal 2 | Afluente 4 Yarumal | Afluente 5 Yarumal | Yarumal 3 | Q. Yarumal (confluy Y-H) | Q. Yarumal 4 | Q. Yarumal 5 |
| T agua(°C) | 16,8 | 16,5 | 16,3 | 15,2 | 16,6 | 16,4 | 16,6 | 16,3 | 16,8 | 14,3 | 14,9 |
| Oxigeno Disuelto (mg/l) | 6,52 | 5,52 | 6,96 | 6,14 | 6,89 | 7,11 | 6,92 | 8,8 | 7,13 | 6,92 | 6,86 |
| Saturación de Oxigeno (%) | 86,8 | 71,4 | 85,5 | 83,8 | 89,7 | 92,5 | 91,7 | 95,1 | 92,8 | 70 | 69 |
| Conductividad (µS/cm) | 31 | 13 | 8 | 0,01 | 23 | 13 | 47 | 9,39 | 31 | 83,9 | 80 |
| pH | 6,4 | 7,36 | 7,38 | 8,8 | 7,25 | 7,68 | 7,1 | 5,83 | 6,92 | 8,8 | 6,5 |
| Oxiqeno Disuelto (mg $O_2$/L) | 7,06 | 7,05 | 7,18 | 7,51 | 7,57 | 7,54 | 7,45 | 7,66 | 7,46 | 6,92 | 6,86 |
| DBO (mg/L) | 1,89 | 1,89 | 1,89 | 1,89 | 1,89 | 1,89 | 1,89 | 1,89 | 1,89 | 1,89 | 1,89 |
| DQO (mg $O_2$/L) | 34 | 33 | 34 | 23 | 7,9 | 8,4 | 7,1 | 2,46 | 40 | 10 | 37 |
| Turbiedad (N.T.U) | 8,69 | 3,37 | 2,29 | 5,59 | 2,29 | 1,44 | 3,06 | 2,06 | 2,79 | 18,8 | 133 |
| Alcalinidad Total (mg $CaCO_3$/L) | 15 | 7 | 6 | 8,5 | 10 | 10 | 21,5 | 13,5 | 13 | 20 | 20 |
| Acidez Total (mg $CaCO_3$/L) | 4 | 6 | 4 | 3 | 3 | 2 | 3 | 2 | 5 | 6 | 6 |
| Amonio (mg $NH^{4+}$/l) | 0,205 | 0,06 | 0,095 | 0,06 | 0,09 | 0,06 | 0,06 | 0,096 | 0,182 | 0,06 | 0,06 |

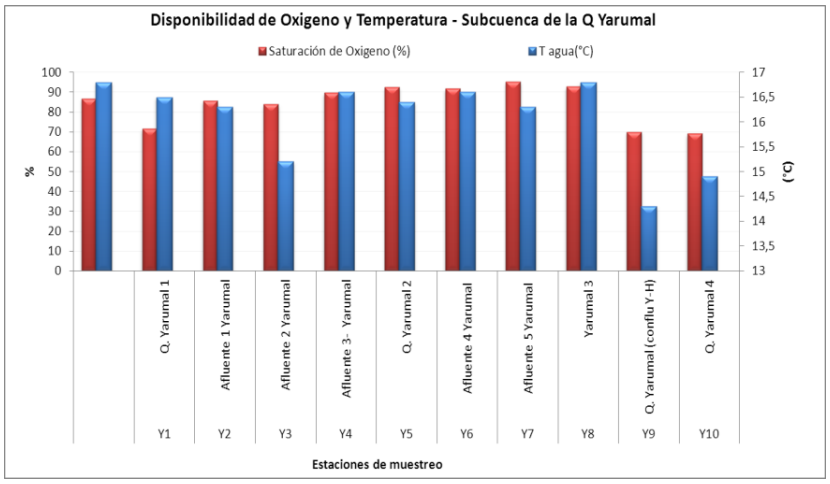
| Estaciones | Y1 | Y2 | Y3 | Y4 | Y5 | Y6 | Y7 | Y8 | Y9 | Y10 | Y11 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Variables | Q. Yarumal 1 | Afluente 1 Yarumal | Afluente 2 Yarumal | Afluente 3-Yarumal | Q. Yarumal 2 | Afluente 4 Yarumal | Afluente 5 Yarumal | Yarumal 3 | Q. Yarumal (conflu Y-H) | Q. Yarumal 4 | Q. Yarumal 5 |
| Nitritos (mg $NO^{2-}$/L) | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 |
| Nitratos (mg $NO^{3-}$/L) | 0,304 | 0,25 | 0,25 | 0,25 | 0,474 | 0,34 | 0,338 | 0,43 | 0,366 | 0,457 | 0,477 |
| Fósforo Total (mg P/L) | 3,033 | 0,63 | 1 | 2,282 | 1,62 | 0,532 | 2,159 | 0,358 | 3,261 | 0,085 | 0,108 |
| Potasio (mg $K^{+}$/L) | 1,099 | 0,916 | 0,9 | 0,9 | 1,378 | 1,418 | 1,147 | 1,356 | 0,9 | 0,9 | 0,9 |
| HierroTotal (mg Fe/L) | 2,397 | 0,367 | 0,25 | 0,51 | 0,224 | 0,019 | 0,245 | 0,143 | 0,979 | 1,530 | 5,709 |
| Sólidos Totales (mg ST/L) | 43 | 77 | 60 | 60 | 77 | 63 | 27 | 27 | 85 | 197 | 610 |
| Sólidos DisueltosTotales (mg SDT/L) | 41 | 69 | 54 | 12 | 76 | 61 | 24 | 24 | 73 | 15,3 | 82 |
| Sólidos Suspendidos Tótales (mg SST/L) | 4,23 | 9 | 4,9 | 48 | 4,23 | 4,23 | 4,23 | 4,23 | 12 | 182 | 529 |
| Sólidos Sedimentables (mg/L) | 0 | 0,2 | 0 | 0,8 | 0 | 0,1 | 0 | 0 | 0,1 | 0,7 | 1,3 |
| Sulfatos (mg $SO4^{-2}$ /L) | 1,25 | 1,25 | 1,25 | 1,25 | 1,379 | 1,346 | 1,412 | 1,395 | 1,25 | 3,425 | 3,405 |
| Cloruros (mg $Cl^{-}$/L) | 1,610 | 1,455 | 1 | 1,25 | 1,510 | 1,372 | 1,773 | 1,517 | 1,771 | 9,116 | 8,805 |
| Grasasv/o Aceites(mg Grasas y Aceites/L) | 9,32 | 9,32 | 9,32 | 9,32 | 9,32 | 9,32 | 9,32 | 9,32 | 9,32 | 9,32 | 9,32 |
| Fenoles (mg $C_6H_6$/L) | 0,001 | 0,001 | 0,001 | 0,001 | 0,001 | 0,001 | 0,001 | 0,001 | 0,001 | 0,001 | 0,001 |
| Detergentes (mg SAAM/L) | 0,062 | 0,053 | 0,05 | 0,082 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,112 | 0,05 |
| Dureza Calcica (mg $CaCO_3$/L) | 2,807 | 2,247 | 2,247 | 2,247 | 4,192 | 3,304 | 8,268 | 4,761 | 3,883 | 8,637 | 8,297 |
| Dureza Magnésica (mg $CaCO_3$//L) | 3,706 | 3,706 | 3,706 | 3,706 | 5,269 | 3,706 | 9,473 | 5,712 | 3,706 | 4,070 | 4,813 |
| Cobre (mg Cu/L) | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,02 |
| Cadmio (mg Cd/L) | 0,003 | 0,003 | 0,003 | 0,003 | 0,003 | 0,003 | 0,003 | 0,003 | 0,003 | 0,003 | 0,003 |
| Plomo (mg Pb/L) | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 |
| Zinc (mg Zn/L) | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,02 |
| Cromo Total (mg Cr/L) | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 |
| Cromo Hexavalente (mg Cr(VI)/L) | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 |
| Coliformes Totales (NMP/100 ml) | 450 | 780000 | 4500 | 460 | 2420 | 1986 | 9800 | 2420 | 14000 | 330000 | 84000000 |

Fuente: *Consorcio* Siga-Plyma

La temperatura del agua de esta quebrada está dentro del rango para quebradas con esta altura sobre el nivel del mar, entre 14 y 17ºC, siendo la más fría Y10, Q. La Yarumal. Las estaciones con más alta temperatura son Y1 y Y9, 16, ºC. El oxígeno disuelto en todas las quebradas sobrepasa los 6 mg/L que es una buena concentración para sostener la vida silvestre, con excepción de la estación Y2, Q. afluente La Yarumal, que tiene 5,56 mg/L lo cual indica un ligero deterioro. El pH, con excepción de la estación Y5 (pH 5,83 unid.), fluctúa en las demás estaciones entre 6,2 y 8,6

unid. que es el rango para sostener la vida silvestre, potabilizar el agua y para uso agrícola y pecuario.

La saturación de oxígeno, que está en función de la temperatura y la concentración de oxígeno disuelto, en todas las estaciones está por encima del 70%, la mayoría entre 80 y 92%, excepto Y10 con 70% y Y11 con 69%, lo cual indica que en estas estaciones hay una disponibilidad baja de oxígeno para los organismos acuáticos y sospecha de contaminación.



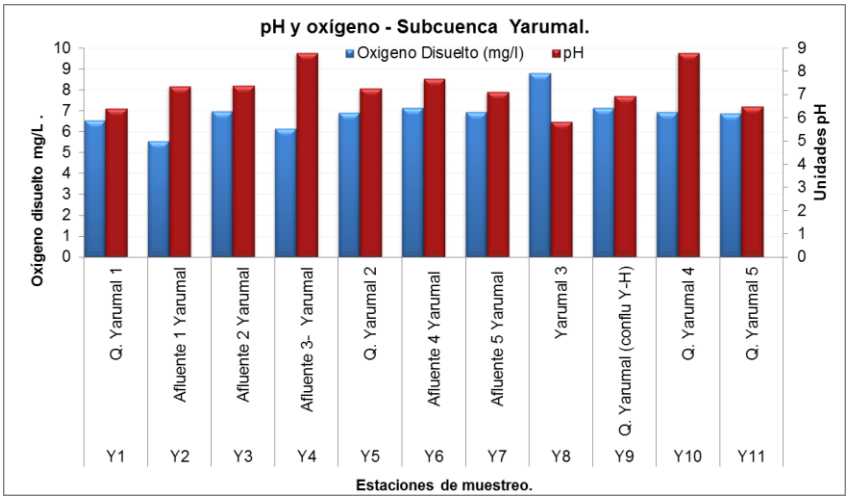




Figura 3-232 - Temperatura, pH, oxígeno y saturación de oxígeno en las estaciones de la Q. Yarumal y sus afluentes.

Los sólidos totales están por debajo del rango de agua potable en todas las estaciones (<280 mg/l) con excepción de Y11 que alcanza 610 mg/L. Los sólidos totales están representados en su mayoría por sólidos suspendidos totales en Y4, Y10 y Y11, mientras que en las demás estaciones los sólidos disueltos son la fracción mayor. Los sólidos suspendidos son bajos en todas las estaciones exceptuando Y10 con 182 mg/L que indica calidad media y Y11 con 529 mg/L, que indica que hay un aporte de sólidos apreciable para esta cuenca. Los sólidos sedimentables son muy bajos, por debajo del límite de 5 mg/L permitido para peces. Los sólidos disueltos en todas las estaciones están por debajo de 200 mg/L que es el parámetro de agua potable.

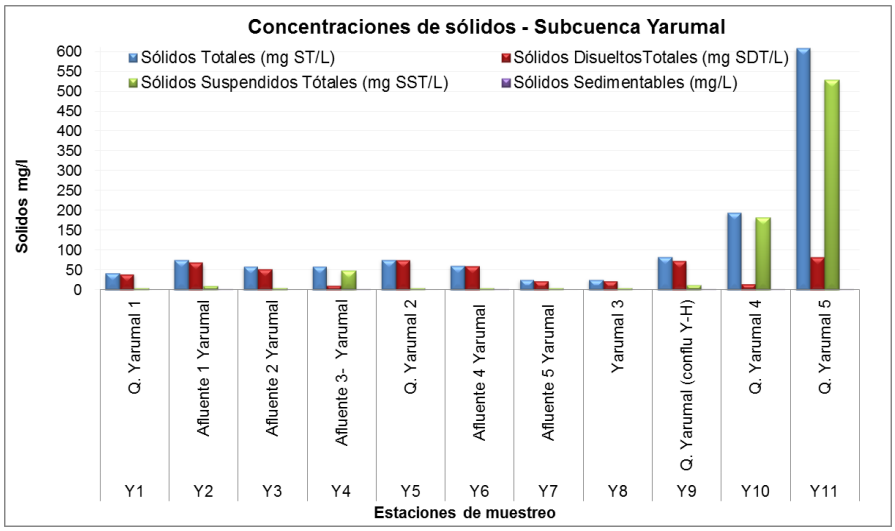
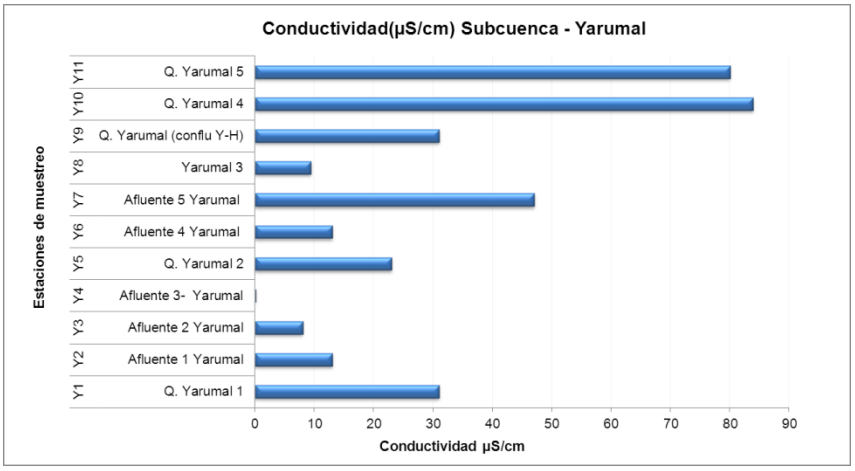



Figura 3-233 - Sólidos totales, suspendidos, disueltos y sedimentarios en las estaciones de la Q. Yarumal y sus afluentes.

La conductividad eléctrica es baja, con excepción de Y10 y Y11 que tienen conductividades alrededor de 80 µS/cm, en las demás no supera 47 µS/cm, valores que están dentro del rango de ríos neotropicales, entre 10 y 200 µS/cm.

La turbiedad en todas las estaciones está por debajo de 10 NTU excepto en Y10 que alcanza 18,8 NTU y Y11 que sube hasta 133 NTU, coincidiendo con las concentraciones más altas de sólidos suspendidos en estas estaciones.



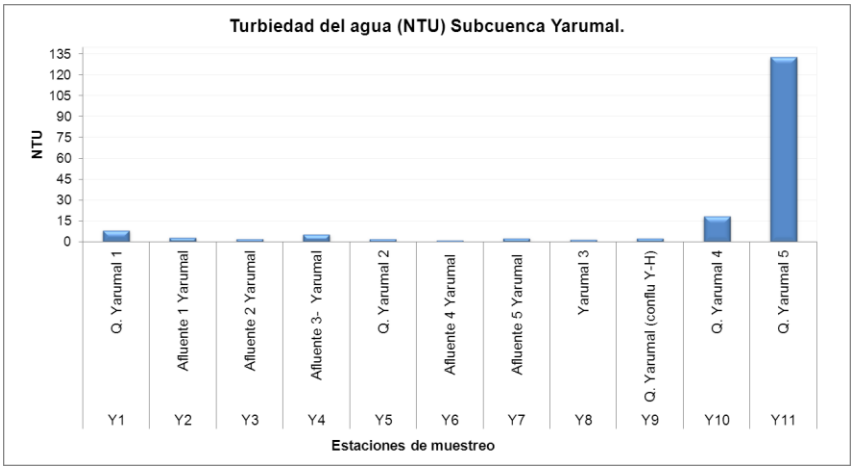



Figura 3-234 - Conductividad y turbiedad en las estaciones de la Q. Yarumal y sus afluentes..

La Dureza Cálcica (mg CaCO3/L) es muy baja en todas las estaciones, con un rango entre 2,24 8,63 mg/L que corresponde a aguas muy blandas, poco productivas, oligotróficas. En cuanto a la Dureza Magnésica (mg CaCO3//L) las concentraciones son muy bajas, entre 3,7 - 9,4 mg/L, muy por debajo del óptimo que es 30 mg/L. La mayor dureza total 17,7mg/L se presenta en Y7 y es indicadora de aguas blandas, poco productiva.

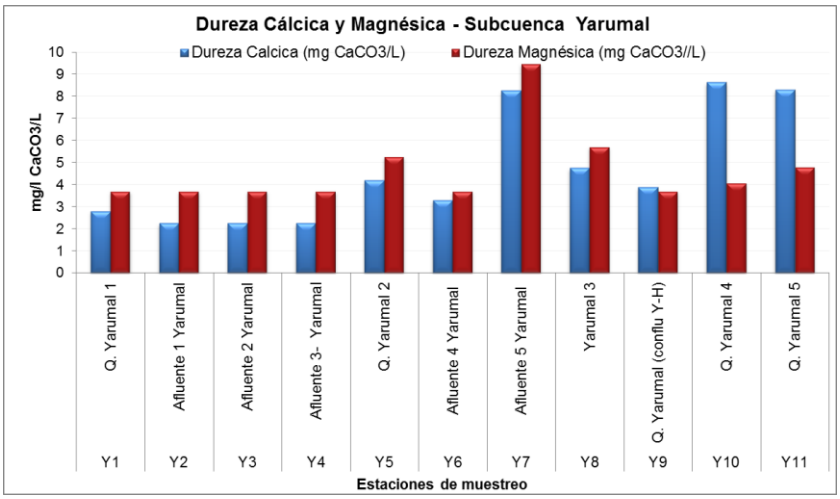



Figura 3-235 - Dureza cálcica y magnésica en las estaciones de la Q. Yarumal y sus afluentes.

La Alcalinidad Total (mg CaCO3/L) de todas las estaciones de la Q. Yarumal es menor de 25 mg/L que es límite superior para corrientes de alta montaña, el rango va desde 6,0 - 21,5 mg/L que para el pH de esta quebrada corresponde a carbonatos y bicarbonatos. La acidez total en estas quebradas es baja, entre 3,0 – 6,0 mg/L, que por ser sistema de aguas naturales con el rango de pH de estas quebradas puede asumirse que la acidez se debe casi exclusivamente al $CO_2$, es decir, que la acidez es carbonácea y no mineral.

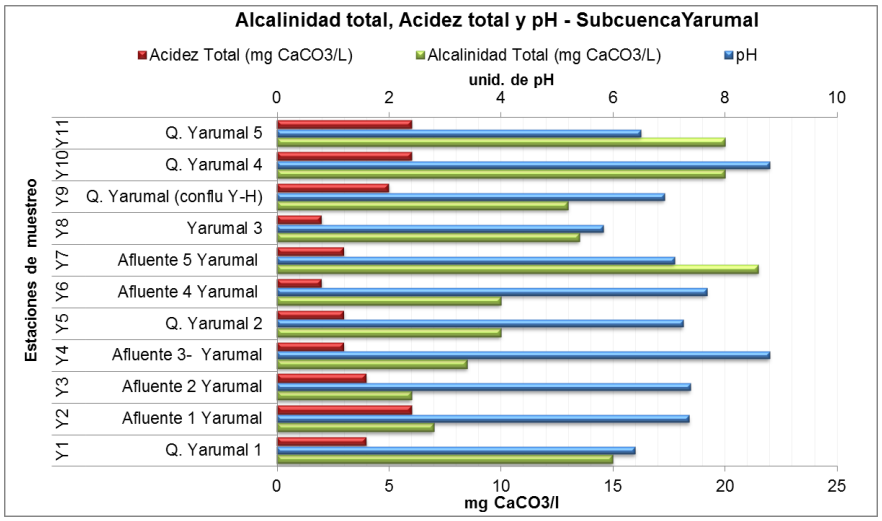



Figura 3-236 - Alcalinidad Total y Acidez Total en las estaciones de la Q. Yarumal y sus afluentes.

En relación a los nutrientes, el Fósforo Total (mg P/L) presenta en esta quebrada concentraciones muy altas, por encima de la concentración límite de 0,03mg/L, todas están en el rango de la eutrofia, entre 0,085 - 3,261 mg/L; se destacan Y2 (3,03mg/L) y Y4 (2,3 mg/L), Y7 (2,1 mg/L) y Y9 (3,2 mg/L) porque concentraciones por encima de 1,0 mg/L se consideran hipereutróficas. Todas las estaciones presentan contaminación fecal por lo que sus aguas deben recibir aguas de escorrentía de potreros o explotaciones pecuarias o aguas residuales domésticas. Los Detergentes (mg SAAM/L), que además de ser tensoactivos se relacionan con las concentraciones de fósforo, presentan en todas las estaciones concentraciones por debajo de 0,5 mg/l que es el límite para diferentes usos del agua y por debajo de 0,143 mg/L que es el límite para la conservación de la vida acuática.

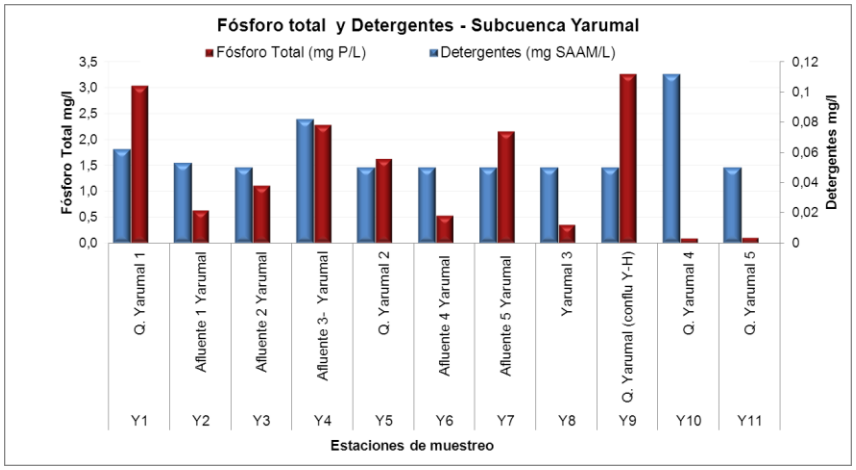



Figura 3-237 - Detergentes y fósforo total en las estaciones de la Q. Yarumal y sus afluentes..

Los nitratos (mg NO3-/L), la forma biodisponible del nitrógeno, están dentro de un rango de 0,25 - 0,47mg/L, inferior al límite de uso de 10mg/L para diferentes usos del agua. Los nitritos, la forma que rápidamente se convierte a nitratos en estas corrientes bien oxigenadas, no superan en ninguna estación el límite de detección del método de análisis utilizado de 0,05 mg/L, que está por

debajo de las concentraciones recomendadas para diferentes usos de 1,0mg/L. El nitrógeno amoniacal (mg NH4+ /l) también es muy bajo, no supera en ninguna estación las concentraciones límite para diferentes usos y para la conservación de la vida silvestre, 1,0mg/L y 0,1mg/L respectivamente.

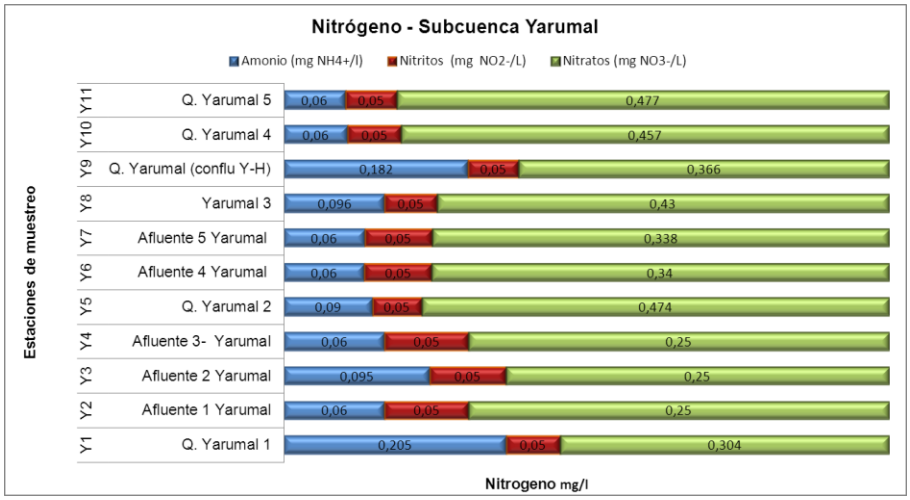



Figura 3-238 - Nitrógeno (Nitratos, nitritos y N-amoniacal) en las estaciones de la Q. Yarumal y sus afluentes.

En relación con los iones disueltos en el agua, se observa que el potasio (mgK+/L) en todas las estaciones tiene concentraciones menores de 10 mg/L que es lo esperado para aguas naturales superficiales. La presencia de hierro es un problema de calidad del agua muy común en esta región donde los suelos son ricos en este elemento. El agua aún con una pequeña cantidad de hierro puede tornarse rojiza por su exposición al aire y especialmente cuando su pH está por encima de 7,5 unid. Aunque no es tóxico, la coloración y el sabor se transforman en problema cuando la concentración es mayor que 0,3 mg/L. Exceptuando las estaciones Y3,Y5, Y6, Y7 Y Y8, en las demás estaciones se supera el límite de 0,3 mg/L que es el límite para recreación, contacto y consumo, sólo en Y1 (2,4 mg/L), Y10 (1,5 mg/L) y Y5 (5,7 mg/L) se supera la concentración de 1,0 mg/L que es ideal para la conservación de la vida acuática y en Y11 se supera el límite de 5,0 mg/L que es el límite para su uso agrícola. Los sulfatos (mg SO4-/L) tienen concentraciones muy bajas en todas las estaciones, entre 1,3 - 3,4 mg/L, cuando el límite para aguas naturales, recreación y para potabilizar está en 250 mg/L. Los cloruros (mg Cl-/L) son bajos en todas las estaciones pues la concentración en aguas dulces no debe superar el rango 10-250mg/L.

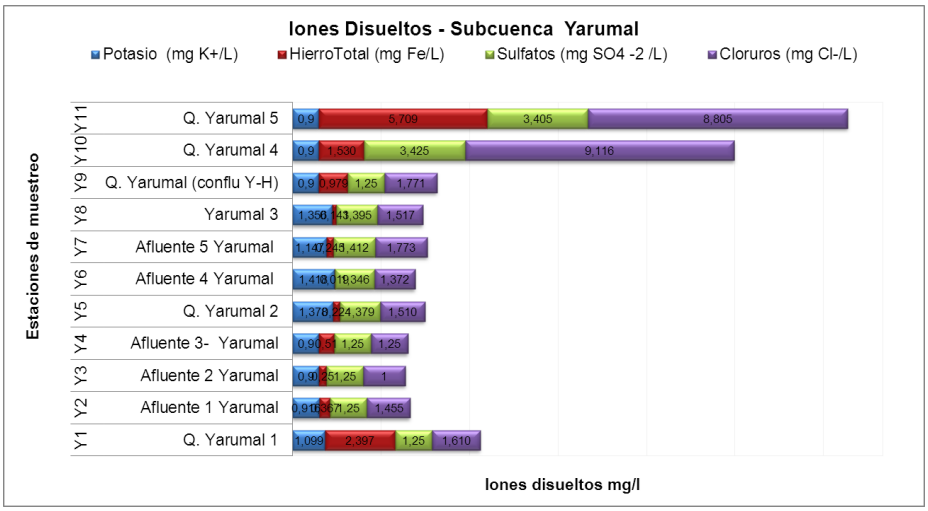



Figura 3-239 - Iones disueltos en el agua Potasio (mg K+/L) Hierro Total (mg Fe/L) Sulfatos (mg SO4 -2 /L) Cloruros (mg Cl-/L) en las estaciones de la Q. Yarumal y sus afluentes.

También se analizaron otras sustancias disueltas en el agua y metales pesados, pero ninguna superó el límite de detección del método de análisis: Fenoles 0,001mg C6H6/L, Cobre 0,02mg Cu/L, Cadmio 0,003mg Cd/L, Plomo mg 0,01Pb/L, Zinc, 0,02mg Zn/L, Cromo Total 0,05mg Cr/L y Cromo Hexavalente 0,05mg Cr (VI)/L, lo cual significa que no hay contaminantes provenientes de la industria y de las actividades agropecuarias y Cromo Hexavalente 0,05mg Cr(VI)/L, lo cual significa que no hay contaminantes provenientes de la industria y de las actividades agropecuarias. En esta quebrada, las grasas y/o aceites no sobrepasan el nivel de detección mínimo del método de análisis utilizado, <9,32 mg Grasas y Aceites/L, por lo tanto no se sabe si superan la concentración de 0,01 mg/L para la conservación de la fauna o están ausentes para su consumo y uso recreativo directo.

La demanda química de oxígeno, DQO, presenta valores entre 2,46 - 40 mg O2/L; excepto Y8, las demás sobrepasan el rango para aguas superficiales no contaminadas, 1,0 -5,0 mg/L; las más altas demandas de oxígeno se presentan en Y1 (34 mg/L), Y2 (33 mg/L), Y3 (34 mg/L), Y9 (40 mg/L) y Y11 (37 mg/L). La DBO5 presentó demandas de oxígeno por debajo del límite de detección del método de análisis, <1,89 mgO2/L que son inferiores a cualquier tipo de restricción. La relación DBO/DQO<0,2, lo que hace suponer que estas estaciones reciben escorrentías y/o vertidos inorgánicos, imposible de depurar de forma biológica.

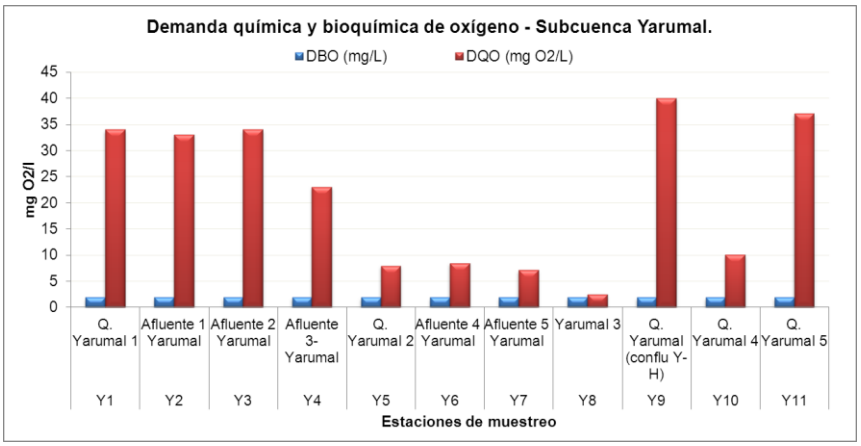



Figura 3-240 - Contaminación orgánica, DBO (mg/L) y DQO (mg O2/L) en las estaciones de la Q. Yarumal y sus afluentes.

Todas las estaciones de la quebrada tienen presencia de coliformes totales y fecales. Los coliformes fecales son una fracción de los coliformes totales e indican la presencia de heces animales y humanas en el agua por vertido de aguas residuales, uso de fertilizantes orgánicos (gallinaza y porquinaza) o por escorrentía de explotaciones pecuarias y por lo tanto evidencian la posibilidad de microorganismos patógenos para humanos y animales, bien sea por contacto o por vía digestiva. Excepto las estaciones Y4, Y5, Y6 y Y8, las demás presentan contaminación fecal igual o por encima de 200 NMP/100 ml que restringe estas aguas para su uso pecuario, recreación primaria (contacto directo) y preservación de la flora y la fauna. Se presentan contaminaciones fecales muy altas en donde todos los coliformes presentes son de origen fecal en Y2 (780.000 NMP/100ml) y Y10 (330.000 NMP/100ml); en la estación más contaminada, Y11, los coliformes fecales, 63.000.000 NMP/100ml son la mayor fracción de los coliformes totales 84.000.000 NMP/100ml, concentraciones propias de vertimientos de aguas residuales domésticas. En estas tres estaciones además de las restricciones antes nombradas, también se presentan limitaciones para su uso agrícola, contacto secundario y para tratamiento convencional.

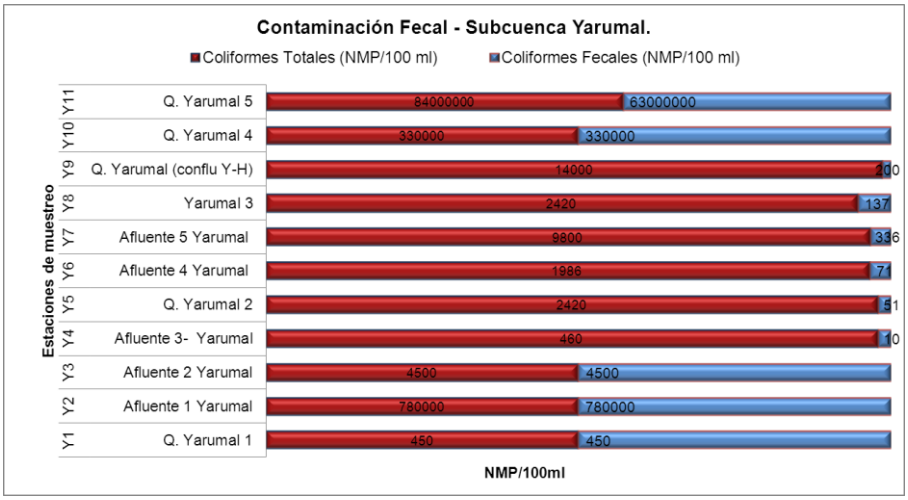


Figura 3-241 - Contaminación fecal en las estaciones de la Q. Yarumal y sus afluentes.

#### *3.2.5.3.6.4 Índice de la calidad de agua de la Subcuenca La Yarumal*

La mayoría de las estaciones de la Q. La Yarumal tienen ICAfa que indican calidad de agua buena con excepción de Y6, Afluente 4 de la Q. Yarumal que indica calidad excelente, de Y10, Q. 4 Yarumal, que presenta aguas de calidad Media, por sus sólidos suspendidos de 182 mg/L, saturación de oxígeno de 70% y coliformes fecales 330.000 UFC/100ml y la estación Y11, cuya calidad de agua de acuerdo al ICAfa es Mala por presentar una alta contaminación fecal, 63.000.000 UFC/100ml, sólidos suspendidos de 529 mg/l y fósforo total de 0,108 mg L. En general, está quebrada tiene concentraciones de fósforo por encima de 0,02 mg/l que son indicadoras de eutrofia.

El Afluente 4 Yarumal Y6 presenta excelente calidad del agua, aunque tiene concentración de fósforo tendiente a la eutrofia, tiene una muy alta saturación de oxígeno.

Entre las quebradas de calidad Buena según el ICAfa, está la Q. Yarumal 1, Y1, que tiene concentración de fósforo tendiente a la eutrofia, alta concentración de hierro, alta DQO y alta contaminación fecal. Afluente 2 Yarumal Y3, tiene concentración de fósforo tendiente a la eutrofia, alta DQO y alta contaminación fecal. Afluente 3- Yarumal Y4 alta contaminación fecal, concentración de fósforo tendiente a la hipereutrofia. Q. Yarumal 2 Y5, tiene, alta concentración de hierro, contaminación fecal y pH ligeramente ácido. Afluente 5 Yarumal Y7 alta contaminación fecal, concentración de fósforo tendiente a la hipereutrofia. Q- Yarumal 3 Y8, tiene concentración de fósforo tendiente a la eutrofia Confluencia Yarumal-Hondina Y9, tiene concentración de fósforo tendiente a la eutrofia, alta DQO y alta contaminación fecal.

Entre las quebradas de calidad media de acuerdo al ICAfa obtenido están los afluentes Y1 y Y2, fuentes estas que registran una alta DQO, alta contaminación fecal, baja saturación de oxígeno, concentración de fósforo tendiente a la hipereutrofia. Para las estaciones Y4 y Y10, se registra una concentración de fósforo tendiente a la eutrofia, alta concentración de hierro, alta contaminación fecal, saturación de oxígeno baja y sólidos suspendidos altos que conducen a la obtención de altas turbiedades.

La quebrada que presenta calidad Mala, Q. Yarumal 5, Y11, tiene concentración de fósforo tendiente a la eutrofia, alta DQO y alta contaminación fecal, saturación de oxígeno baja, muy altos sólidos totales, en su mayoría sólidos suspendidos que también son altos y alta turbiedad.

.

Tabla 3-100 - Calidad del agua en las estaciones de la Q. Yarumal

| Nombre | No. Estación | pH (unidades pH) | DQO ( mg/L O2) | DBO5 (mg/L) | Sólidos suspendidos Totales(SST) | FOSFORO TOT (mg/L-P) | CONDUCTIVIDAD ((usiemens/cm) | % SATURACION OXIGENO | E Coli (UFC/100 mL) | IPH | IDQO | IDBO5 | Isst | Icond | I%sat | I Ecoli | I FOSFORO TOTAL (PO4) | ICA fa | DESCRIPTOR / COLOR |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Q. Yarumal 1 | Y1 | 6,4 | 34 | 1,89 | 4,23 | 3,033 | 31 | 86,8 | 450 | 0,733 | 0,000 | 1 | 1 | 0,945 | 0,868 | 1,000 | 0,25 | 0,85 | Buena |
| Afluente 1 Yarumal | Y2 | 7,36 | 33 | 1,89 | 9 | 0,63 | 13 | 71,4 | 7800000 | 1 | 0,000 | 1 | 0,993 | 0,983 | 0,714 | 0,000 | 0,50 | 0,69 | Media |
| Afluente 2 Yarumal | Y3 | 7,38 | 34 | 1,89 | 4,9 | 1 | 8 | 85,5 | 450 | 1 | 0,000 | 1 | 1,01 | 0,991 | 0,855 | 1,000 | 0,25 | 0,88 | Buena |
| Afluente 3- Yarumal | Y4 | 8,8 | 23 | 1,89 | 48 | 2,282 | 0,01 | 83,8 | 10 | 0,660 | 0,001 | 1 | 0,876 | 1,000 | 0,838 | 1,00 | 0,25 | 0,83 | Buena |
| Q. Yarumal 2 | Y5 | 7,25 | 7,9 | 1,89 | 4,23 | 1,62 | 23 | 89,7 | 51 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0,963 | 0,897 | 1 | 0,25 | 0,88 | Buena |
| Afluente 4 Yarumal | Y6 | 7,68 | 8,4 | 1,89 | 4,23 | 0,532 | 13 | 92,5 | 71 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0,983 | 0,925 | 1,00 | 0,50 | 0,92 | Excelente |
| Afluente 5 Yarumal | Y7 | 7,1 | 7,1 | 1,89 | 4,23 | 2,159 | 47 | 91,7 | 336 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0,904 | 0,917 | 1,000 | 0,25 | 0,88 | Buena |
| Q- Yarumal 3 | Y8 | 5,83 | 2,46 | 1,89 | 4,23 | 0,358 | 9,39 | 95,1 | 137 | 0,545 | 1 | 1 | 1 | 0,989 | 0,951 | 1,000 | 0,50 | 0,89 | Buena |
| Confluencia Yarumal-Hondina | Y9 | 6,92 | 40 | 1,89 | 12 | 3,261 | 31 | 92,8 | 200 | 0,961 | 0,000 | 1 | 0,984 | 0,945 | 0,928 | 1,000 | 0,25 | 0,88 | Buena |
| Q. Yarumal 4 | Y10 | 8,8 | 10 | 1,89 | 182 | 0,085 | 83,9 | 70 | 330000 | 0,660 | 1 | 1 | 0,474 | 0,792 | 0,700 | 0,00 | 0,50 | 0,57 | Media |
| Q. Yarumal 5 | Y11 | 6,5 | 37 | 1,89 | 529 | 0,108 | 80 | 69 | 63000000 | 0,772 | 0,000 | 1 | 0 | 0,805 | 0,690 | 0,000 | 0,50 | 0,50 | Mala |

Fuente: Consorcio Siga-Plyma

### *3.2.5.3.6.5 Subcuenca La Salazar*

Los resultados de las variables fisicoquímicas de las estaciones de la Q. La Salazar se presenta en la siguiente tabla.

Tabla 3-101 - Variables fisicoquímicas de las estaciones de la Q. La Salazar.

| Estación | S1 | S2 | S3 | S4 | S5 | S6 | S7 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Variable | Q. Betania1 | Q. Betania 2 | Afluente Salazar | Afluente a la salazar | "Q. Escondida" | Q. La Salazar | Q. "Las Faldas" |
| Coordenada X | 846713 | 846794 | 847429 | 847499 | 847382 | 847663 | 847380 |
| Coordenada Y | 1176321 | 1176330 | 1176365 | 1175791 | 1173686 | 1175692 | 1175674 |
| Coordenada Z | 2378 | 2351 | 2280 | 2255 | 2286 | 2239 | 2299 |
| T agua(°C) | 17,1 | 17,2 | 18,3 | 17,1 | 16,8 | 17,2 | 16,8 |
| Oxigeno Disuelto (mg/l) | 7,5 | 7,62 | 6,94 | 6,81 | 7,02 | 7,25 | 7,02 |
| Saturación de Oxigeno (%) | 94,3 | 95,3 | 96,8 | 89,2 | 91,5 | 95,2 | 94,8 |
| Conductividad (µS/cm) | 56,5 | 24 | 0 | 54 | 46 | 45 | 44 |
| pH | 7,3 | 7,35 | 6,67 | 7,35 | 7,25 | 7,07 | 7,2 |
| Oxiqeno Disuelto (mg $O_2$/L) | 7,32 | 7,62 | 7,86 | 7,41 | 7,28 | 7,18 | 6,82 |
| DBO (mg/L) | 1,89 | 1,89 | 1,89 | 1,89 | 1,89 | 1,89 | 1,89 |
| DQO (mg $O_2$/L) | 5 | 11 | 2,46 | 28 | 42 | 31 | 36 |
| Turbiedad (N.T.U) | 2,36 | 5,68 | 3,04 | 2,08 | 11,4 | 2,38 | 1,48 |
| Alcalinidad Total (mg $CaCO_3$/L) | 23 | 10 | 11,5 | 24 | 20 | 18 | 16,5 |
| Acidez Total (mg $CaCO_3$/L) | 4 | 2 | 2 | 4 | 3 | 2 | 3 |
| Amonio (mg $NH^{4+}$/l) | 0,21 | 0,077 | 0,06 | 0,079 | 0,06 | 0,07 | 0,06 |
| Nitritos (mg $NO^{2-}$/L) | 0,073 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 |
| Nitratos (mg $NO^{3-}$/L) | 3,045 | 0,319 | 0,25 | 0,393 | 0,277 | 0,386 | 0,25 |
| Fósforo Total (mg P/L) | 3,087 | 0,065 | 0,942 | 0,073 | 0,884 | 0,065 | 0,065 |
| Potasio (mg $K^+$/L) | 1,248 | 1,005 | 1,186 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 |
| HierroTotal (mg Fe/L) | 0,173 | 0,76 | 0,331 | 0,163 | 5,301 | 0,882 | 0,459 |
| Sólidos Totales (mg ST/L) | 100 | 87 | 65 | 48 | 94 | 46 | 54 |
| Sólidos DisueltosTotales (mg SDT/L) | 98 | 52 | 60 | 48 | 28 | 43 | 53 |
| Sólidos Suspendidos Tótales (mg SST/L) | 4,23 | 36 | 4,9 | 4,23 | 67 | 4,23 | 4,23 |
| Sólidos Sedimentables (mg/L) | 0 | 0,2 | 0 | 0 | 0,6 | 0 | 0 |
| Sulfatos (mg $SO4^{-2}$ /L) | 2,035 | 1,727 | 1,796 | 1,25 | 1,25 | 1,380 | 1,25 |
| Cloruros (mg $Cl^-$/L) | 2,42 | 1,388 | 1,335 | 1,499 | 1,444 | 1,946 | 1,436 |
| Grasasv/o Aceites(mg Grasas y Aceites/L) | 9,32 | 9,32 | 9,32 | 9,32 | 9,32 | 9,32 | 9,32 |
| Fenoles (mg $C_6H_6$/L) | 0,001 | 0,001 | 0,001 | 0,001 | 0,001 | 0,001 | 0,001 |
| Detergentes (mg SAAM/L) | 0,197 | 0,05 | 0,05 | 0,079 | 0,05 | 0,065 | 0,053 |
| Dureza Calcica (mg $CaCO_3$/L) | 11,564 | 5,429 | 5,575 | 5,688 | 7,608 | 6,292 | 5,735 |
| Dureza Magnésica (mg $CaCO_3$//L) | 13,720 | 6,659 | 5,909 | 15,372 | 9,762 | 7,238 | 6,946 |
| Cobre (mg Cu/L) | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,02 |
| Cadmio (mg Cd/L) | 0,003 | 0,003 | 0,003 | 0,003 | 0,003 | 0,003 | 0,003 |
| Plomo (mg Pb/L) | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 |

| Estación | S1 | S2 | S3 | S4 | S5 | S6 | S7 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Variable | Q. Betania1 | Q. Betania 2 | Afluente Salazar | Afluente a la salazar | "Q. Escondida" | Q. La Salazar | Q. "Las Faldas" |
| Zinc (mg Zn/L) | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,02 |
| Cromo Total (mg Cr/L) | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 |
| Cromo Hexavalente (mg Cr(VI)/L) | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 |
| Coliformes Totales (NMP/100 ml) | 2420 | 2420 | 2420 | 11000 | 13000 | 5400000 | 260000 |
| Coliformes Fecales (NMP/100 ml) | 2420 | 1046 | 18 | 6800 | 11000 | 1700000 | 11000 |

Fuente: Consorcio Siga-Plyma

La temperatura del agua de esta quebrada está dentro del rango para quebradas con esta altura sobre el nivel del mar, entre 18,3ºC en S3, Afluente La Salazar, y la más baja 16,1ºC en S9 Afluente 1 Yarumal, la más fría. El oxígeno disuelto en todas las quebradas sobrepasa los 6,7 mg/L que es una buena concentración para sostener la vida silvestre, la estación con mayor concentración de oxígeno disuelto es S2, Q. Betania, 7,62 mg/l. La saturación de oxígeno, en todas las estaciones está por encima del 70%, entre 89,2 y 96,8%. El pH de todas las estaciones está dentro del rango 6,2 - 8,6 unid que es el rango para sostener vida silvestre, potabilizar el agua y para uso agrícola y pecuario. La estación con pH más bajo fue S3, Afluente La Salazar con 6,7 unid.

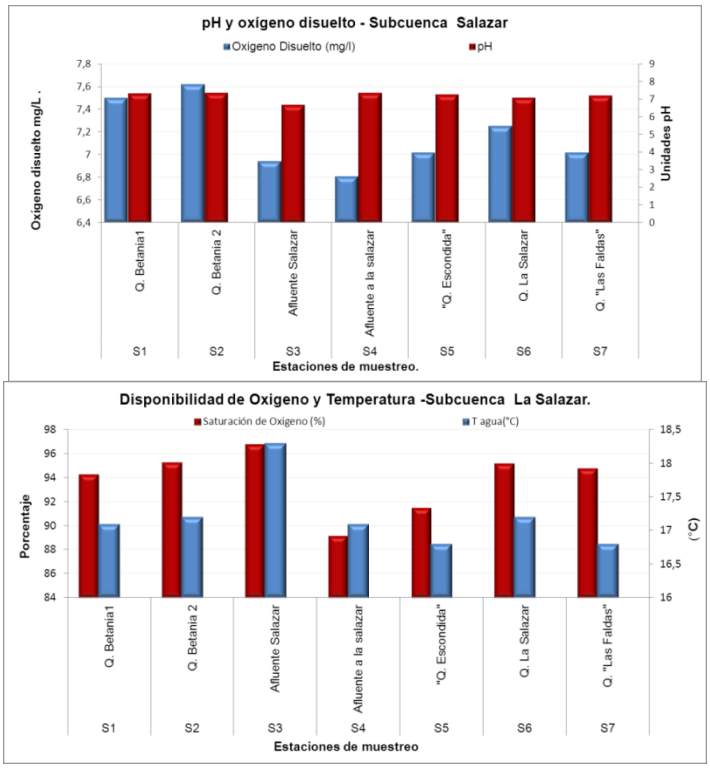



Figura 3-242 - Temperatura, pH, oxígeno y saturación de oxígeno en las estaciones de la Q. La Salazar y sus afluentes.

Los sólidos totales están por debajo del rango promedio de los ríos neotropicales (<120 mg/L) y del límite para peces de 100 mg/L. Los sólidos totales están representados en su mayoría por

sólidos suspendidos totales en S5, mientras que en las demás estaciones los sólidos disueltos son la fracción mayor. Los sólidos suspendidos son bajos en todas las estaciones. Los sólidos sedimentables son muy bajos, por debajo del límite de 5 mg/L permitido para peces. Los sólidos disueltos en todas las estaciones están por debajo de 200 mg/L que es el parámetro de agua potable.

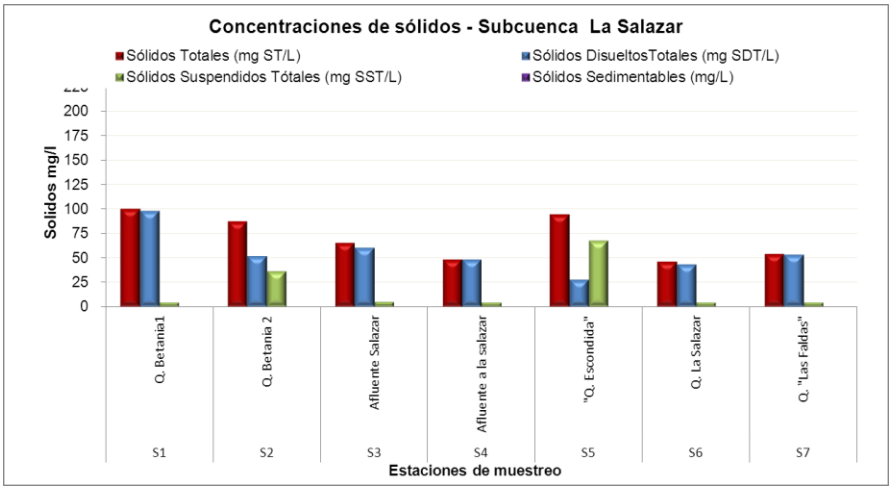
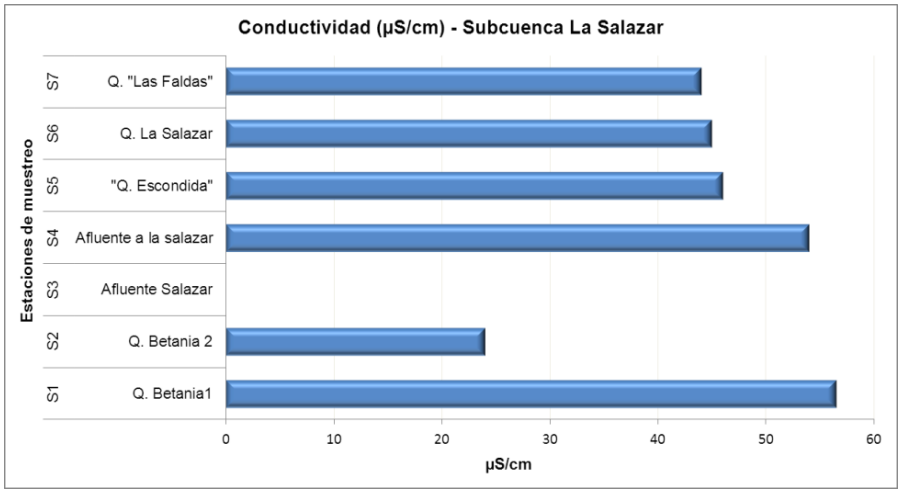



Figura 3-243 - Sólidos de la Q. La Salazar y sus afluentes.

La conductividad eléctrica es baja en todas las estaciones, en ninguna estación supera 56,2 µS/cm, valores que están dentro del rango de ríos neotropicales, entre 10 y 200 µS/cm La turbiedad en todas las estaciones está por debajo de 10 NTU excepto en S5 y S8 Quebrada Salazar que tienen concentraciones alrededor de 11 NTU y de S10 Confluencia Salazar Yarumal que sube hasta 30,5 NTU, coincidiendo en esta estación con las concentraciones más altas de sólidos suspendidos.



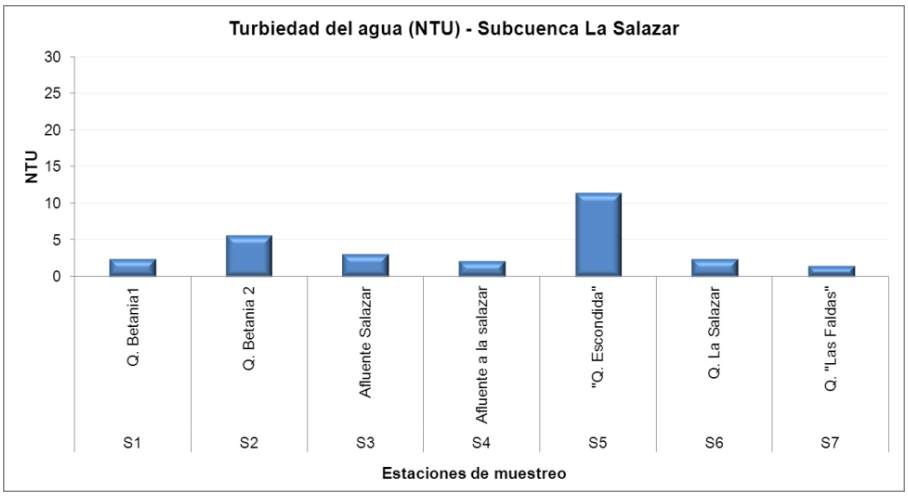
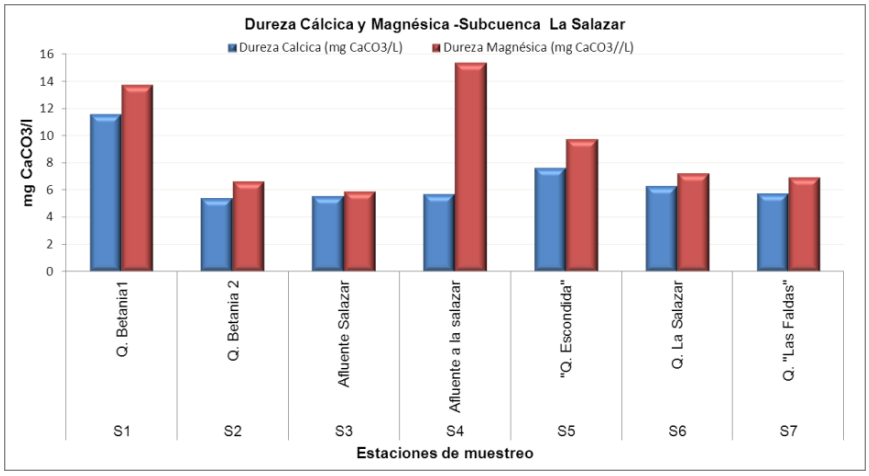



Figura 3-244 - Conductividad y turbiedad en las estaciones de la Q. La Salazar y sus afluentes..

Las concentraciones Dureza Cálcica (mg CaCO3/L) en todas las estaciones de la Q. Salazar, cuyo rango está entre 11,5 y 4,29 mg/L, indican que son aguas muy blandas, poco productivas. En cuanto a la Dureza Magnésica (mg CaCO3//L) todas las estaciones están por debajo de 30 mg/L que es óptimo para una corriente de cuenca alta, el rango está entre 3,7 – 15,3 mg/L. La mayor dureza total se presenta en S1 25,3 mg/L correspondiente a aguas blandas. La Alcalinidad Total (mg CaCO3/L) de todas las estaciones de la Q. La Salazar es menor de 25 mg/L que es límite superior para corrientes de alta montaña, el rango va desde 10,0 - 24,0 mg/L que para los valores de pH de esta quebrada corresponde a carbonatos y bicarbonatos. La acidez total en estas quebradas es baja, entre 2,0 – 4,0 mg/L, que por ser sistema de aguas naturales con el rango de pH de estas quebradas puede asumirse que la acidez se debe casi exclusivamente al $CO_2$, es decir, que la acidez es carbonácea y no mineral.



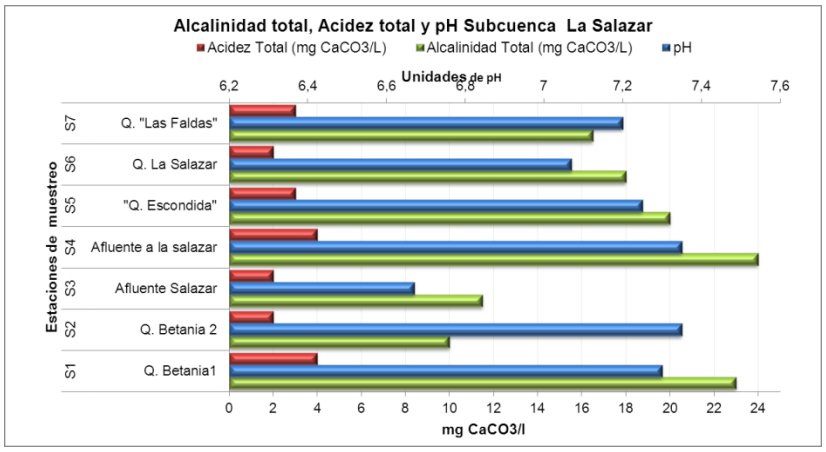



Figura 3-245 - Dureza Cálcica y Magnésica y Alcalinidad de la Q. La Salazar y sus afluentes.

En relación a los nutrientes, el Fósforo Total (mg P/L), en las estaciones S2, y S6 no es posible saber si está por encima de 0,03mg/L que es el límite superior para los diferentes usos del agua porque el análisis está en el límite de detección del método que es de <0,065mg/L. Por otra parte, las demás estaciones en esta quebrada presentan concentraciones muy altas, por encima de la concentración límite, todas están en el rango de la eutrofia, entre 0,073 - 3,298 mg/L; se destaca S1 (3,1 mg/L) porque sus concentraciones de fósforo total por encima de 1,0 mg/L se consideran hipereutróficas. Todas las estaciones presentan contaminación fecal por lo que sus aguas deben recibir aguas de escorrentía de potreros o explotaciones pecuarias o aguas residuales domésticas y en la región se utilizan fertilizantes y abonos en cultivos y potreros. Los Detergentes (mg SAAM/L), que además de ser tensoactivos se relacionan con las concentraciones de fósforo, presentan en todas las estaciones concentraciones por debajo de 0,5 mg/l que es el límite para diferentes usos del agua y por debajo de 0,143 mg/L que es el límite para la conservación de la vida acuática, excepto en S1 donde presenta una concentración de 0,197 mg/L.

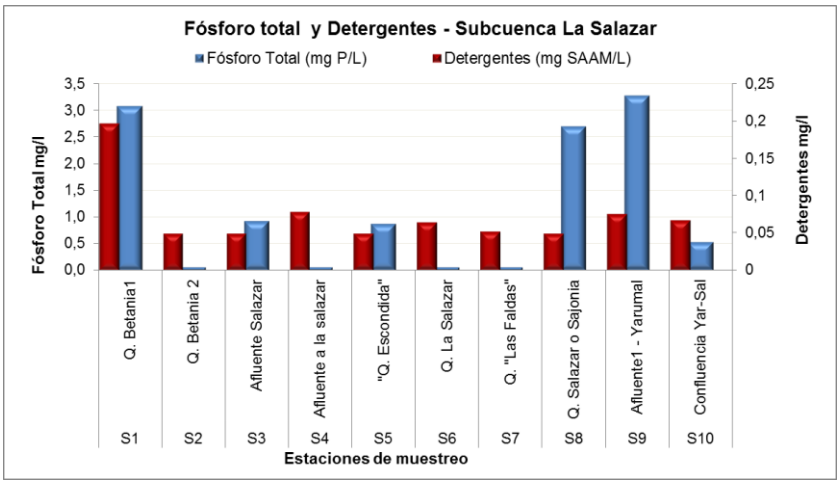



Figura 3-246 - Detergentes y fósforo total en las estaciones de la Q. La Salazar y sus afluentes.

En relación a los nitratos (mg NO3-/L), la forma biodisponible del nitrógeno, están dentro de un rango de 0,25 - 3,04 mg/L, inferior al límite de uso de 10mg/L para diferentes usos del agua. Los nitritos, la forma que rápidamente se convierte a nitratos en estas corrientes bien oxigenadas, con

excepción de la estación S1 (0,07 mg/L), no supera en ninguna estación el límite de detección del método de análisis utilizado de 0,05 mg/L, que están por debajo de las concentraciones recomendadas para diferentes usos de 1,0mg/L. El nitrógeno amoniacal (mg NH4+ /l) también es muy bajo, con excepción de S1 (0,21 mg/L), no supera en ninguna estación las concentraciones límite para diferentes usos y para la conservación de la vida silvestre, 1,0mg/L y 0,1mg/L respectivamente. Aunque las concentraciones no son altas, la estación S1, Q, Betania 1, es la que mayores concentraciones de las diferentes formas de nitrógeno presenta.

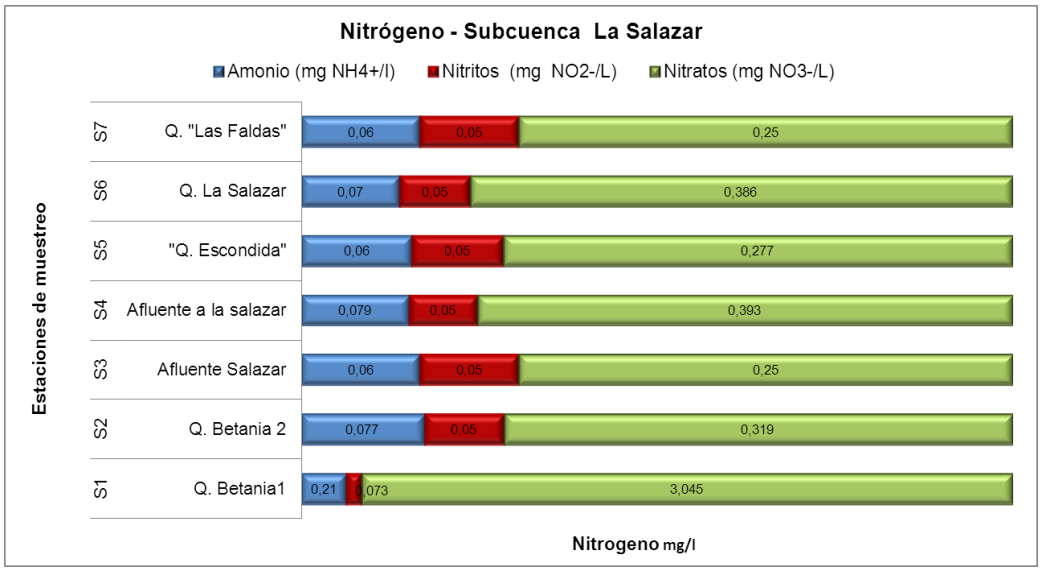



Figura 3-247 - Nitrógeno (Nitratos, nitritos y N-amoniacal) en las estaciones de la Q. La Salazar y sus afluentes.

En relación con los iones disueltos en el agua, se observa que el potasio (mgK+/L) en todas las estaciones tiene concentraciones menores de 10 mg/L que es lo esperado para aguas naturales superficiales. La presencia de hierro es un problema de calidad del agua muy común en esta región donde los suelos son ricos en este elemento. El agua aún con una pequeña cantidad de hierro puede tornarse rojiza por su exposición al aire y especialmente cuando su pH está por encima de 7,5 unid. Aunque no es tóxico, la coloración y el sabor se transforman en problema cuando la concentración es mayor que 0,3 mg/L. Exceptuando las estaciones S1 y S4, en las demás estaciones se supera el límite de 0,3 mg/L que es el límite para recreación, contacto y consumo, sólo en S5 (5,03 mg/L) y S10 Confluencia Salazar Yarumal (2,18 mg/L) se supera la concentración de 1,0 mg/L que es ideal para la conservación de la vida acuática y en S5 se supera el límite de 5,0 mg/L que es el límite para su uso agrícola. Los sulfatos (mg SO4-/L) tienen concentraciones muy bajas en todas las estaciones, entre 1,25 - 2,72 mg/L, cuando el límite para aguas naturales, recreación y para potabilizar está en 250 mg/L. Los cloruros (mg Cl-/L) son bajos, entre 1,3 - 5,3 mg/L en todas las estaciones, pues la concentración en aguas dulces no debe superar el rango 10-250mg/L. En esta quebrada, las grasas y/o aceites no sobrepasan el nivel de detección mínimo del método de análisis utilizado, <9,32 mg Grasas y Aceites/L, por lo tanto no se sabe si superan la concentración de 0,01 mg/L para la conservación de la fauna o están ausentes para su consumo y uso recreativo directo. También se analizaron otras sustancias disueltas en el agua y metales pesados, pero ninguna superó el límite de detección del método de análisis: Fenoles 0,001mg C6H6/L, Cobre 0,02mg Cu/L, Cadmio 0,003mg Cd/L, Plomo mg 0,01Pb/L, Zinc, 0,02mg Zn/L, Cromo Total 0,05mg Cr/L y Cromo Hexavalente 0,05mg Cr (VI)/L, lo cual significa que no hay

contaminantes provenientes de la industria y de las actividades agropecuarias y Cromo Hexavalente 0,05mg Cr(VI)/L, lo cual significa que no hay contaminantes provenientes de la industria y de las actividades agropecuarias.

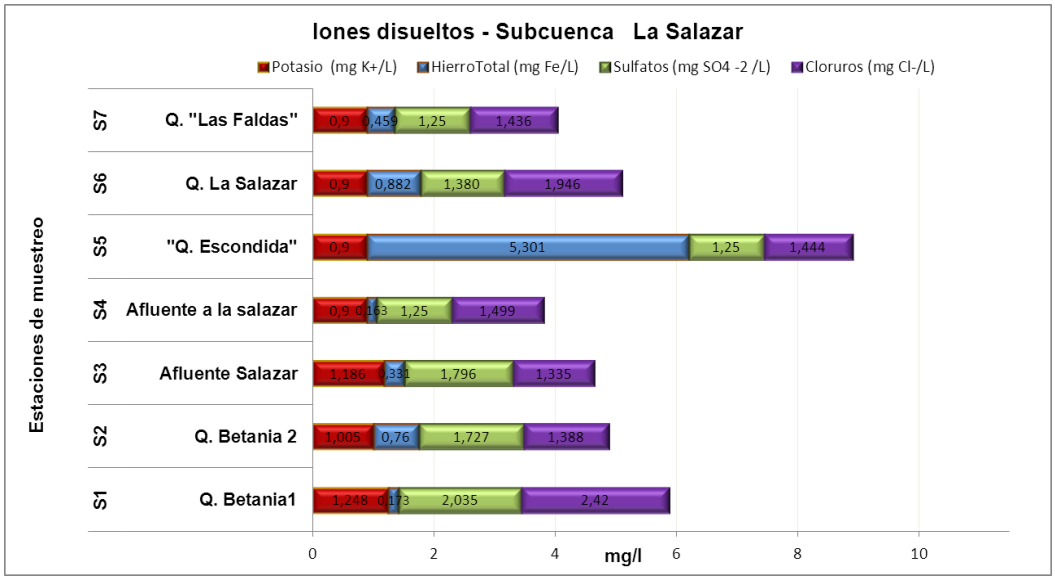



Figura 3-248 - Iones disueltos en el agua Q. La Salazar y sus afluentes.

La demanda química de oxígeno, DQO, presenta valores entre 2,46 - 42 mg O2/L; todas las estaciones sobrepasan el rango para aguas superficiales no contaminadas, 1,0 -5,0 mg/L; las más altas demandas de oxígeno se presentan en S4 (28 mg/L), S5 (42 mg/L), y S6 (31 mg/L). La DBO5 presentó demandas de oxígeno por debajo del límite de detección del método de análisis, <1,89 mgO2/L que son inferiores a cualquier tipo de restricción. La relación DBO/DQO<0,2, lo que hace suponer que estas estaciones reciben escorrentías y/o vertidos inorgánicos, imposible de depurar de forma biológica.

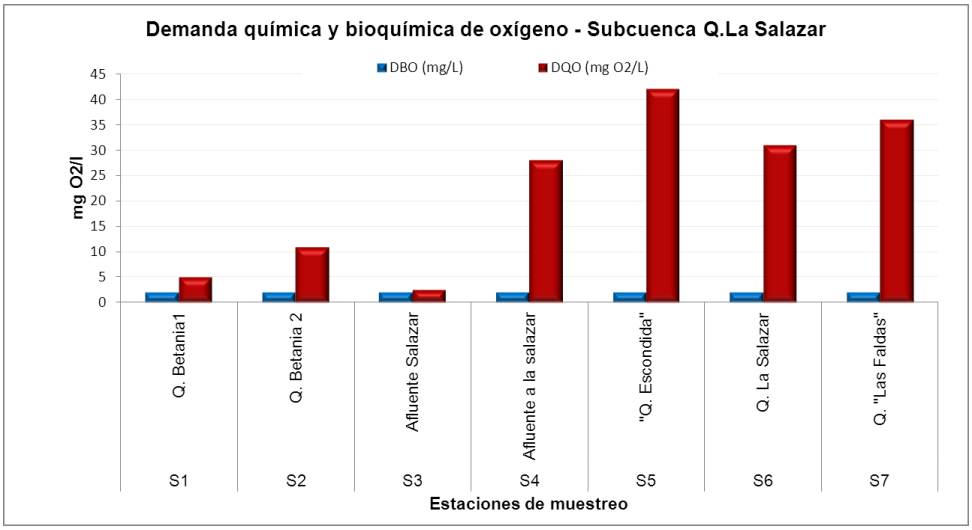


Figura 3-249 - Contaminación orgánica, medida como demanda de oxígeno, DBO (mg/L) y DQO (mg O2/L) en las estaciones de la Q. La Salazar y sus.

Todas las estaciones de la quebrada tienen presencia de coliformes totales y fecales. Los coliformes fecales son una fracción de los coliformes totales e indican la presencia de heces animales y humanas en el agua por vertido de aguas residuales, uso de fertilizantes orgánicos (gallinaza y porquinaza) o por escorrentía de explotaciones pecuarias y por lo tanto evidencian la posibilidad de microorganismos patógenos para humanos y animales, bien sea por contacto o por vía digestiva. Excepto la estación S3, las demás presentan contaminación fecal igual o por encima de 200 NMP/100 ml que restringe estas aguas para su uso pecuario, recreación primaria (contacto directo) y preservación de la flora y la fauna. Se presenta contaminaciones fecal alta en donde todos los coliformes presentes son de origen fecal en S1 (2.420 NMP/100ml). Por presentar más de 5000 NMP/100 ml de coliformes totales, todas las quebradas, con excepción de S1, S2 y S3, las otras, además de las restricciones antes nombradas también tienen restricciones para uso agrícola y pecuario. Las estaciones con mayor contaminación fecal (coliformes fecales) son SE5 Quebrada Santa Elena (11.000 NMP/100ml), y SE6 Quebrada La Escorrentía (1.700.000 NMP/100ml).

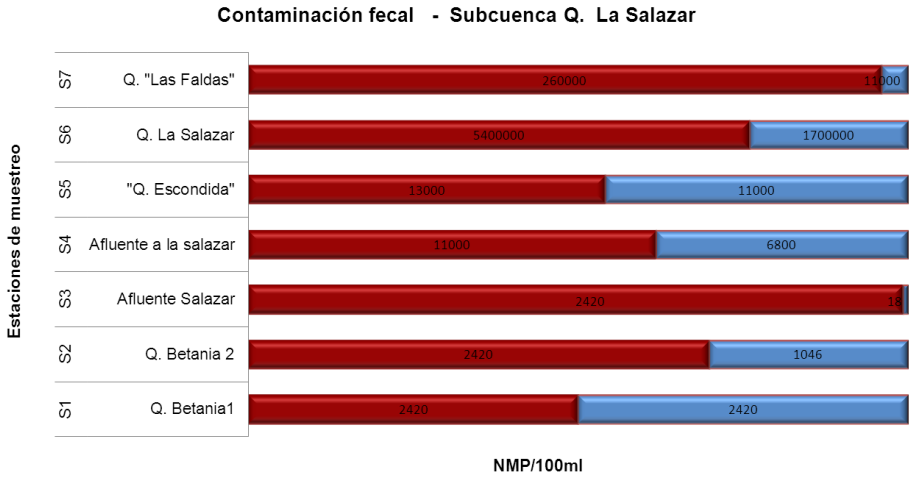



Figura 3-250 - Contaminación fecal en las estaciones de la Q. La Salazar y sus afluentes.

## Índice de calidad de agua de la Subcuenca de la Quebrada Salazar o Sajonia

Las estaciones de la quebrada La Salazar presentan ICAfa que corresponden a calidad de agua buena, con excepción de las estaciones S2, S3 y S4, cuya calidad es excelente y las estaciones S9 Afluente 1 Yarumal, cuya calidad es media porque presenta saturación de oxígeno por debajo del 70% y contaminación fecal de 180.000 UFC/100 ml y la estación S10 Confluencia Yarumal Salazar, que también muestra un ICAfa que corresponde a calidad media por sus sólidos suspendidos (189 mg/L), saturación de oxígeno que apenas alcanza al 72% y contaminación fecal de 48.000 UFC/100 ml, es decir, que exceptuando las estaciones S9 Afluente 1 Yarumal y S10 Confluencia Salazar Yarumal, las demás estaciones de la Q. La Salazar son aptas para el contacto humano directo y la vida acuática.

Las estaciones de la parte alta de la Q. La Salazar son de mejor calidad que las de la parte baja. Las quebradas Betania1, S2, Afluente 1 de la Salazar, S3 y Afluente 2 de la Salazar, aunque tienen contaminación por coliformes, tienen excelente calidad de acuerdo con el ICAfa.

Las quebradas de calidad buena, ya presentan algunos problemas de calidad de agua, especialmente aquellas en que el índice ICAfa está más cerca del límite inferior de la categoría. La quebrada Betania1, S1, tiene concentraciones de fósforo propias de eutrofia, presencia de detergentes y alta contaminación fecal. La quebrada La Escondida, S5, es turbia por la presencia de sólidos suspendidos, concentraciones altas de hierro, DQO alta y contaminación fecal. La quebrada La Salazar (Sajonia). Las estaciones que según el ICAfa presentan calidad media, presentan condiciones más severas. Afluente 1 La Yarumal, S9 Afluente 1 Yarumal, tiene concentraciones de fósforo tendientes a la eutrofia, saturación de oxígeno bajo, hierro muy alto y muy alta contaminación fecal. La quebrada Confluencia Yarumal Salazar S10, tiene iguales condiciones que la anterior, pero además, es turbia, tiene sólidos totales muy altos casi todos en suspensión.

Tabla 3-102 -Calidad del agua en las estaciones de la Q. La Salazar, afluente de la Q. Yarumal..

| Nombre | No. Estación nuevo | pH (unidades pH) | DQO ( mg/L O2) | DBO5 (mg/L) | Sólidos suspendidos Totales(SST) | FOSFORO TOT (mg/L-P) | CONDUCTIVIDAD ((usiemens/cm) | % SATURACION OXIGENO | E Coli (UFC/100 mL) | IPH | IDQO | IDBO5 | Isst | Icond | I%sat | I Ecoli | I FOSFORO TOTAL (PO4) | ICA fa | DESCRIPTOR / COLOR |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Q. Betania1 | S1 | 7,30 | 5,00 | 1,89 | 4,23 | 3,087 | 56,5 | 94,3 | 2420 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0,878 | 0,943 | 1,00 | 0,25 | 0,89 | Buena |
| Q. Betania 2 | S2 | 7,35 | 11,00 | 1,89 | 36,00 | 0,065 | 19,0 | 95,3 | 2420 | 1 | 0,032 | 1 | 0,912 | 0,972 | 0,953 | 1,000 | 0,50 | 0,91 | Excelente |
| Afluente 1 Salazar | S3 | 6,67 | 2,46 | 1,89 | 4,90 | 0,942 | 22,0 | 96,8 | 2420 | 0,843 | 1 | 1 | 1,005 | 0,965 | 0,968 | 1,000 | 0,50 | 0,92 | Excelente |
| Afluente 2 a la Salazar | S4 | 7,35 | 28,00 | 1,89 | 4,23 | 0,073 | 42,8 | 89,2 | 6800 | 1 | 0,000 | 1 | 1 | 0,916 | 0,892 | 1,000 | 0,50 | 0,91 | Excelente |
| "Q. Escondida" | S5 | 7,25 | 42,00 | 1,89 | 67,00 | 0,884 | 37,6 | 91,5 | 11000 | 1 | 0,000 | 1 | 0,819 | 0,929 | 0,915 | 0 | 0,50 | 0,78 | Buena |
| Q. La Salazar | S6 | 7,07 | 31,00 | 1,89 | 4,23 | 0,065 | 36,2 | 95,2 | 1700000 | 1 | 0,000 | 1 | 1 | 0,933 | 0,952 | 0,000 | 0,50 | 0,74 | Buena |
| Q. "Las Faldas" | S7 | 7,20 | 36,00 | 1,89 | 4,23 | 0,065 | 29,9 | 94,8 | 11000 | 1 | 0,000 | 1 | 1 | 0,948 | 0,948 | 0,414 | 0,50 | 0,82 | Buena |

Fuente: Consorcio Siga-Plyma

### 3.2.6 Usos del agua

A continuación se hace una identificación de las fuentes hídricas de las cuales se abastece la población existente en el área de influencia directa del proyecto Conexión Vial Aburrá-Oriente y sus vías complementarias. Se identifican y caracterizan los acueductos veredales y los grupos de personas organizadas en torno al recurso hídrico, entre los que se relacionan aquellos que cuentan con concesiones de agua otorgadas por las corporaciones ambientales y los no concesionados, los cuales serán analizados y proyectados en función de las demandas del recurso agua a 20 años.

#### 3.2.6.1 Área de Influencia Directa

Para el área de influencia directa (puntual, local) se identifican las cuencas La Cascada, La Yarumal, La Yerbabuena y Santa Elena, las cuales a través de sus afluentes permiten suplir la demanda del recurso agua a tres (3) grupos de usuarios que se clasifican en aquellos que su abastecimiento es a partir de sistemas de acueducto; aquellos que su abastecimiento es a partir de cuerpos de agua natural, que a su vez, disponen de concesión de agua, y aquellos que su abastecimiento se hace sin permiso ambiental. (Véase Anexo 3-24, la relación de los grupos de usuarios identificados en el área de influencia directa del proyecto Conexión Vial Aburrá-Oriente).

#### 3.2.6.2 Demanda actual del agua versus oferta hídrica

El estado actual de la demanda del agua para cada uno de los grupos de usuarios del recurso, identificados en el AID (puntual y local), se determina conforme a las disposiciones establecidas en los Títulos A y B de la Resolución No.1096/2000 de Noviembre de 2000, por la cual se adopta el Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico, y lo dispuesto en la Resolución 2320 de 2009 por la cual se modifica parcialmente la Resolución No.1096 de 2000.

Este análisis se fundamenta en la cantidad de caudal requerido por la población para satisfacer la demanda del agua en relación con el caudal medio de la fuente (datos hidrológicos suministrados por la CAR sobre algunas de las fuentes identificadas para la zona de estudio) y el caudal concesionado por la CAR sobre la fuente. Del análisis de estos datos se obtiene la disponibilidad hídrica de la fuente (oferta) con respecto a la demanda actual, para posteriormente proyectar la demanda a 20 años. El análisis del grupo de usuarios concesionados y no concesionados, se hace teniendo como criterio la ubicación del usuario con respecto a la cuenca a la que pertenece la fuente abastecedora y se presentarán para el área de influencia directa total.

#### 3.2.6.3 Usos del Agua en el AID Puntual

Como área de influencia directa puntual se toman las fuentes hídricas susceptibles de sufrir afectación por el desarrollo del proyecto. En la siguiente se relacionan los cuerpos de agua identificados en la zona de estudio y con posibilidad de afectarse.

Tabla 3-103 - Fuentes susceptibles de afectación.

| Fuentes | Obra y/o actividad |
|---|---|
| Quebrada Sajonia | Concesión de agua y vertimiento |
| Afluente de la quebrada Sajonia | Concesión de agua y vertimiento |
| Quebrada La Pastora | Concesión de agua y vertimiento |
| Quebrada La Aguadita | Concesión de agua y vertimiento |

| Fuentes | Obra y/o actividad |
|---|---|
| Quebrada Yarumal | Techo del túnel Santa Elena |
| Quebrada La Pulgarina | Vía a Cielo Abierto |
| Quebrada Chupadero 1 | Vía a Cielo Abierto |
| Quebrada Chupadero 2 | Vía a Cielo Abierto |
| Quebrada La India | Vía a Cielo Abierto |
| Quebrada La Pastora | Vía a Cielo Abierto |
| Quebrada Mediagua | Vía a Cielo Abierto |
| Quebrada La Espadera | Vía a Cielo Abierto, concesión de agua y vertimiento |
| Quebrada La Bocaná | Vía a Cielo Abierto |
| Quebrada La Cangreja | Vía a Cielo Abierto |
| Quebrada Caunces | Vía a Cielo Abierto |
| Quebrada Yerbabuena | Vía a Cielo Abierto |
| Quebrada La Salada | Vía a Cielo Abierto |

Fuente: Consorcio Siga-Plyma

En el AID puntual además de las fuentes de agua, se consideran los predios ubicados donde se proyectan los portales norte y sur del túnel Seminario, la vía a cielo abierto (oriental y occidental), los portales occidentales y oriental del túnel Santa Elena y el depósito Seminario.

A continuación se relaciona la lista de usuarios localizados en el AID puntual.

Tabla 3-104 - Grupo de usuarios del AID puntual.

| Grupo de usuario | Nombre de usuario | Uso del agua | Caudal concesionado (L/s) | Fuente | Vereda |
|---|---|---|---|---|---|
| Acueducto | La Palma | Domestico | 0,7292 | La Espadera | La Palma |
| Acueducto | 8 de Marzo | Agrícola y pecuaria | En proceso | La Espadera | La Palma |
| Acueducto | Barrios de Jesús | Domestico | 1,0127 | La Espadera | El Plan |
| Acueducto | Juan Pablo II | Domestico | Sin concesión | La Espadera | La Palma |
| Concesionado | Concesión Túnel Aburra Oriente S.A. | Domestico | 0,04 | Sajonia (margen derecha portal oriental) | Sajonia (Yarumal) |
| Concesionado | Concesión Túnel Aburra Oriente S.A. | Industrial | 9,96 | Sajonia | Sajonia (Yarumal) |
| Concesionado | Concesión Túnel Aburra Oriente S.A. | Domestico | 0,04 | La bocana (quebrada Aguadita), La poblada (la Yerbabuena) | Sajonia (Yarumal) |
| Concesionado | Concesión Túnel Aburra Oriente S.A. | Industrial | 9,96 | La aguadita | Sajonia (Yarumal) |
| Concesionado | Concesión Túnel Aburra Oriente S.A. | Domestico | 0,04 | Sajonia (margen derecha portal oriental) | Sajonia (Yarumal) |
| Concesionado | Concesión Túnel Aburra Oriente S.A. | Industrial | 9,96 | Sajonia | Sajonia (Yarumal) |
| Concesionado | Concesión Túnel Aburra Oriente S.A. | Domestico | 0,04 | La bocana (quebrada Aguadita), la | Sajonia (Yarumal) |

| Grupo de usuario | Nombre de usuario | Uso del agua | Caudal concesionado (L/s) | Fuente | Vereda |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | | poblada (la yerbabuena) | |
| Concesionado | Concesión Túnel Aburra Oriente S.A. | Industrial | 9,96 | La aguadita | Sajonia (Yarumal) |
| Concesionado | Sociedad Finca Río Pinar Del Sur Ltda. | Doméstico | 0,081018 | Sin Nombre (Nace Predio Seminario Conciliar) | S.I |
| Concesionado | Sociedad Finca Río Pinar Del Sur Ltda. | Agrícola | 0,061 | Sin Nombre (Nace Predio Seminario Conciliar) | S.I |
| Concesionado | Claudia Elena del Carmen Rojas Arias | Doméstico | 0,030381 | Aguas Frías | Media Luna |
| Concesionado | Claudia Elena del Carmen Rojas Arias | Agrícola | 0,66 | Aguas Frías | Media Luna |
| Concesionado | Claudia Elena del Carmen Rojas Arias | Acuicultura | 0,033333 | Aguas Frías | Media Luna |
| Concesionado | Alfredo de Jesús Gallego Grajales | Doméstico | 0,020254 | La Bonanza | Media Luna |
| Concesionado | Alfredo de Jesús Gallego Grajales | Pecuario | 0,001689 | La Bonanza | Media Luna |
| Concesionado | Alfredo de Jesús Gallego Grajales | Acuicultura | 5,600 | La Bonanza | Media Luna |

Fuente: Consorcio Siga-Plyma

#### 3.2.6.3.1 Análisis de resultados

En el área de influencia directa puntual (AIDP), se identifica el uso de agua para fines domésticos como el uso principal, seguido del acuícola, agrícola y pecuario para finalmente, encontrarse el uso de recreación como el último en orden de importancia.

De los usos del agua anteriormente referidos, se tiene que del 100% de los predios existentes en esta área, el 75,15% destina el agua obtenida por medio del sistema de acueducto legalmente constituido (según Ley 142 de 1994) o de captaciones en fuentes naturales (quebrada o nacimiento) para uso doméstico, sin embargo, al tratarse de una zona rural, el uso del agua adquiere múltiples usos, entre éstos: actividades productivas a pequeña escala que se realizan generalmente en el propio predio de vivienda familiar, los cuales se aprovechan para la crianza de animales, huertas, pequeños cultivos y actividades micro-empresariales, situación que a pesar de ser prohibida por la normativa técnica RAS 2000 y la ley de servicios públicos domiciliarios 142 de 1994,que prohíbe el uso del agua para actividades de subsistencia, dado que los sistemas están diseñados para cierta cantidad de agua y podrían colapsar, está permitido para el uso comercial; esta situación fue posible identificarla como algo habitual en la zona de estudio.

Del porcentaje restante, el 24,85% de los predios, requieren el consumo de agua para el desarrollo de las actividades productivas, principalmente las agrícolas, acuícolas y pecuarias, las cuales son consideradas como producción a gran escala. Se estableció que es importante determinar, qué porción de estas aguas consumidas en este tipo de actividades, son provenientes de sistemas de acueducto con tratamiento, puesto que la Ley 373 de 1997 programa para el uso eficiente y

ahorro del agua, establece en su artículo 7 "*Es deber de la Comisión Reguladora de Agua Potable y Saneamiento Básico de las Corporaciones Autónomas Regionales y demás autoridades ambientales, de acuerdo con sus competencias, establecer consumos básicos en función de los usos del agua, desincentivar los consumos máximos de cada usuario y establecer los procedimientos, las tarifas y las medidas a tomar para aquellos consumidores que sobrepasen el consumo máximo fijado*", todo ello en busca de un control y manejo racional para el uso de agua sobre todo en actividades diferentes a las domésticas, es decir, la satisfacción de las necesidades básicas de cualquier persona.

Ahora bien, según los cálculos generados en cuanto a la dotación neta se refiere, se ha encontrado que el consumo de agua proveniente de los sistemas de acueducto en el área de influencia directa puntual están incluso por encima del máximo establecido por la Resolución 2320 de 2009 para niveles de complejidad bajo igual a 90 L/hab-día, indicando esto que gran parte de la demanda es para labores domésticas que implican consumo humano y seguramente actividades de tipo agrícola y pecuario a pequeña escala.

#### 3.2.6.3.2 Usuarios del agua en el AID puntual diagnóstico actual

A continuación se registra el estado actual de los sistemas de acueductos: La Palma-Media Luna, 8 de Marzo, Juan Pablo II y Barrios de Jesús, localizados en el AID puntual. Estos análisis se realizaron a partir de los cálculos y proyecciones de dotaciones, demandas y caudales contenidos en el Anexo 3-24.

##### *3.2.6.3.2.1 Sistema de acueducto JAC Vereda La Palma – Media Luna:*

Según los cálculos y proyecciones del Anexo 3-24, el sistema de acueducto La Palma es un sistema legalmente constituido, cuenta con estructuras de captación, tanque de almacenamiento y redes de distribución. En términos generales y desde el punto de vista técnico como se detalla a continuación, este sistema se encuentra por fuera de los lineamientos que establece la norma RAS 2000.

Como no se cuenta con información secundaria que permita determinar dotaciones y porcentaje de pérdidas que reflejen las condiciones actuales, debido a la ausencia de medidores macro y micro, se determinó que las condiciones actuales serían modeladas con los valores establecidos por la Resolución 2320 de 2009 para un nivel de complejidad bajo siendo la dotación neta equivalente a 90 L/hab-día y el porcentaje de pérdidas igual al 25%.

En términos de demanda del recurso agua para las condiciones actuales, la cantidad de caudal demandado por la población (QMD+15%) es mayor a la cantidad de caudal concesionado por la Corporación Autónoma Regional CORANTIOQUIA para la quebrada La Espadera ($Q_{requerido}$ 1,18 L/s $Q_{concesionado}$ 0,7292 L/s), por lo tanto se puede determinar que el sistema de acueducto está captando una cantidad mayor a la concesionada, evidenciando la obligación de la JAC que tiene a su cargo este sistema de acueducto, solicitar un aumento respecto al caudal concesionado o en su defecto, buscar una fuente alterna para solicitar concesión sobre la misma.

Para las condiciones actuales de abastecimiento, este sistema de acueducto, registra racionamientos en cuanto al suministro de agua a la población beneficiaria especialmente en épocas de estiaje. Debido a que la cantidad de agua que se registra en el punto de captación es mínima y corresponde al caudal remanente de las estructuras de captación de los sistemas de acueducto que se localizan aguas arriba. Se podría decir, que existe una demanda del recurso agua

mayor al caudal medio ofrecido por la fuente, por lo que se hace necesario buscar una fuente alterna que permita un abastecimiento continuo y minimice la presión sobre la quebrada La Espadera.

No se realiza un diagnóstico más detallado de los componentes del sistema de acueducto (captación, tanque de almacenamiento y redes de distribución) como implementación de modelaciones hidráulicas y de capacidad, debido a que este análisis se relaciona directamente con la oferta hídrica de las fuentes de abastecimiento respecto al caudal demandado y concesionado, y no con el funcionamiento técnico e hidráulico del sistema de acueducto.

#### *3.2.6.3.2.2 Sistema de acueducto Junta de Acción Comunal Barrio 8 de Marzo*

Según los cálculos y proyecciones del Anexo 3-24, el sistema de acueducto 8 de marzo es un sistema legalmente constituido, cuenta con estructuras de captación, desarenador, tanque de almacenamiento y redes de distribución; es de suma importancia resaltar que no se cuenta con ningún tipo de tratamiento que permita mejorar las condiciones del agua cruda. En términos generales y desde un punto de vista técnico, se puede determinar que este sistema de acueducto presenta serias falencias en cuanto a su infraestructura técnica, encontrando el sistema por fuera de los lineamientos que establece la norma RAS 2000.

Como no se cuenta con información secundaria que permita determinar dotaciones y porcentaje de pérdidas que reflejen las condiciones actuales, debido a la ausencia de medidores macro y micro, se determinó que las condiciones actuales serían modeladas con los valores establecidos por la Resolución 2320 de 2009 para un nivel de complejidad bajo, siendo la dotación neta equivalente a 90 L/hab-día y el porcentaje de pérdidas igual al 25%.

En términos de demanda del recurso agua para las condiciones actuales, la cantidad de caudal demandado por la población (QMD+15%) sobre la quebrada La Espadera, no ha sido posible evaluarlo de manera exacta, dado que a la fecha no se cuenta con concesión de agua, ni permiso otorgado por CORANTIOQUIA, pues el trámite de concesión se encuentra en proceso desde el 13 de julio de 2010, por lo cual no es posible identificar si se está realizando la captación de un volumen de agua por encima del máximo permitido. Sin embargo, al analizar las condiciones actuales de funcionamiento, se podría inferir que se está realizando una captación mayor a la posiblemente concesionada, ya que al no tenerse control de medida, es más difícil crear conciencia de ahorro y uso eficiente del agua en cada uno de los usuarios del sistema.

Actualmente se está captando sobre la fuente La Espadera, aproximadamente a 1,20 m aguas abajo de la captación para el sistema de acueducto Juan Pablo II, aumentándose la presión ejercida sobre el recurso agua y propiciando que en época de estiaje, el caudal sobrante sea mínimo, afectando de manera drástica las actividades de captación del sistema de acueducto La Palma, el cual se ubica aproximadamente 1,50 m aguas abajo de la estructura de captación del sistema de acueducto 8 de marzo.

No se realiza un diagnóstico más detallado de los componentes del sistema de acueducto (captación, tanque de almacenamiento y redes de distribución) como implementación de modelaciones hidráulicas y de capacidad, debido a que este informe de diagnóstico se relaciona directamente con la oferta hídrica de las fuentes de abastecimiento respecto al caudal demandado y concesionado, y no con el funcionamiento técnico e hidráulico del sistema de acueducto.

#### *3.2.6.3.2.3 Sistema de acueducto Junta de Acción Comunal Barrio Juan Pablo II*

Según los cálculos y proyecciones del Anexo 3-24, el sistema de acueducto Juan Pablo II es un sistema manejado por la Junta de Acción Comunal del barrio con el mismo nombre, legalmente constituida. Este sistema cuenta con dos estructuras de captación, tanque de aquietamiento o desarenador, tanque de almacenamiento y redes de distribución; Cabe resaltar, que no se cuenta con ningún tipo de tratamiento que permita mejorar las condiciones del agua cruda y que la cloración que a veces se realiza no está fundamentada en ningún criterio analítico que permita determinar su dosis óptima.

En términos generales y desde un punto de vista técnico, se puede determinar que este sistema de acueducto presenta serias falencias en cuanto a su infraestructura técnica, encontrándose por fuera de los lineamientos que establece la norma RAS 2000.

Como no se cuenta con información secundaria que permita determinar dotaciones y porcentaje de pérdidas que reflejen las condiciones actuales, debido a la ausencia de medidores macro y micro, se determinó que las condiciones actuales serían modeladas con los valores establecidos por la Resolución 2320 de 2009 para un nivel de complejidad bajo siendo la dotación neta equivalente a 90 L/hab-día y el porcentaje de pérdidas igual al 25%.

En términos de demanda del recurso agua para las condiciones actuales, la cantidad de caudal demandado por la población (QMD+15%) sobre la quebrada La Espadera, no es factible determinarlo, dado que no se cuenta con concesión de aguas ni permiso en trámite ante la CAR correspondiente (CORANTIOQUIA), por lo tanto no se hace posible evaluar de manera precisa si este sistema está realizando la captación de un volumen de agua por encima del máximo otorgado. Sin embargo, al analizar las condiciones actuales de funcionamiento se podría inferir que se está realizando una captación mayor a la posiblemente concesionada, ya que al no tenerse control de medida es más difícil crear conciencia de ahorro y uso eficiente del agua en cada uno de los usuarios del sistema.

El punto de captación actual del sistema de acueducto Juan Pablo II, se ubica aguas abajo de la toma para el sistema de acueducto Barrios de Jesús y aguas arriba de las tomas de los sistema de acueducto 8 de Marzo y La Palma, lo que aumenta en gran medida la posibilidad de obtener caudales insuficientes para abastecimiento al 100% en estos dos últimos sistemas, especialmente en época de estiaje. Es de suma importancia para la CAR (CORANTIOQUIA) evaluar los puntos de captación de cada uno de los sistemas de acueducto sobre la fuente La Espadera, en especial para los sistemas Juan Pablo II, 8 de Marzo y La Palma, que se ubican en una distancia menor a cuatro metros y ejercen una presión extrema sobre la fuente respecto al caudal demandado.

No se realiza un diagnóstico más detallado de los componentes del sistema de acueducto (captación, tanque de almacenamiento y redes de distribución) como implementación de modelaciones hidráulicas y de capacidad, debido a que este informe de diagnóstico se relaciona directamente con la oferta hídrica de las fuentes de abastecimiento respecto al caudal demandado y concesionado, y no con el funcionamiento técnico e hidráulico del sistema de acueducto.

#### *3.2.6.3.2.4 Sistema de acueducto Barrios de Jesús*

Según los cálculos y proyecciones del Anexo 3-24, el sistema de acueducto Barrios de Jesús es un sistema manejado por la Junta de Acción Comunal del barrio con el mismo nombre, legalmente constituida. Este sistema cuenta con una estructura de captación, tanque de aquietamiento o

desarenador, tanque de almacenamiento y redes de distribución. Cabe resaltar, que no se cuenta con ningún tipo de tratamiento que permita mejorar las condiciones del agua cruda y que la cloración que a veces se realiza no está fundamentada en ningún criterio analítico que permita determinar su dosis óptima. En términos generales y desde un punto de vista técnico, se puede determinar que este sistema de acueducto presenta serias falencias en cuanto a su infraestructura técnica, encontrando el sistema por fuera de los lineamientos que establece la norma RAS 2000.

Como no se cuenta con información secundaria que permita determinar dotaciones y porcentaje de pérdidas que reflejen las condiciones actuales, debido a la ausencia de medidores macro y micro, se determinó que las condiciones actuales serían modeladas con los valores establecidos por la Resolución 2320 de 2009 para un nivel de complejidad bajo, siendo la dotación neta equivalente a 90 L/hab-día y el porcentaje de pérdidas igual al 25%.

En términos de demanda del recurso agua para las condiciones actuales, la cantidad de caudal demandado por la población (QMD+15%) es mayor a la cantidad de caudal concesionado por la Corporación Autónoma Regional CORANTIOQUIA para la quebrada La Espadera ($Q_{requerido}$ 2,0 L/s $Q_{concesionado}$ 1,0127 L/s), por lo tanto se puede determinar que el sistema de acueducto está captando más de lo concesionado, indicando la necesidad de que la JAC de Barrios de Jesús, solicite un aumento respecto al caudal concesionado, o en su defecto busque una fuente alterna, para poder suplir la demanda actual y la proyectada.

Es importante tener en cuenta, que actualmente sobre la quebrada La Espadera, aguas arriba del punto de captación del sistema de acueducto Barrios de Jesús, se tienen captaciones de tipo privado que afectan la continuidad en el abastecimiento en épocas de estiaje, sumado al hecho de que aguas abajo se tienen otras tres captaciones de los sistemas de acueducto: Juan Pablo II, 8 de Marzo y La Palma respectivamente.

No se realiza un diagnóstico más detallado de los componentes del sistema de acueducto (captación, tanque de almacenamiento y redes de distribución) como implementación de modelaciones hidráulicas y de capacidad, debido a que este informe de diagnóstico se relaciona directamente con la oferta hídrica de las fuentes de abastecimiento respecto al caudal demandado y concesionado, y no con el funcionamiento técnico e hidráulico del sistema de acueducto.

Comparando la cantidad de agua demanda por la población con la concesionada por la CAR en el AID puntual, se tiene para los sistemas de acueducto La Palma y Barrios de Jesús, que la cantidad de caudal demandado por los usuarios es mayor a la cantidad de caudal otorgado por concesión, restando de manera considerable el caudal ecológico que toda fuente debe preservar, evidenciándose una presión sobre el recurso agua mayor a la que la corporación determino según estudios para otorgamiento de concesiones. Sumado a lo anterior, se tiene que tanto el sistema de acueducto 8 de Marzo como Juan Pablo II, captan de la fuente La Espadera sin concesión vigente: estado en proceso de aprobación para el primero de los sistemas y no registrando permiso alguno, para el segundo.

Se tiene que para las condiciones actuales de estudio, los sistemas de acueducto Barrios de Jesús, Juan Pablo II, 8 de Marzo y La Palma, captan de la fuente La Espadera, encontrándose las tres últimas captaciones en un tramo no mayor a 4 m, situación que en épocas de estiaje e incluso de veranos relativamente cortos, se presenten desabastecimientos que conducen a cortes del servicio en busca de equilibrar los sistemas, que a su vez, por la necesidad de abastecer de manera continua a la población, no respetan el caudal ecológico propio de la fuente, la cual presenta su

estado más crítico en el punto de captación del acueducto La Palma donde prácticamente en todas las épocas del año queda completamente seca.

#### 3.2.6.3.3 Usuarios del agua del AID puntual proyecciones al período de análisis (20 años)

A continuación se registra el estado en función de la demanda de agua al período de análisis (20 años) de los sistemas de acueducto localizados en el AID puntual (La Palma-Media Luna, 8 de Marzo, Juan Pablo II y Barrios de Jesús), análisis realizados a partir de los cálculos y proyecciones de dotaciones, demandas y caudales contenidos en el Anexo 3-24.

##### *3.2.6.3.3.1 Sistema de acueducto JAC Vereda La Palma – Media Luna*

Según los cálculos y proyecciones del Anexo 3-24, las proyecciones de demanda para un período de análisis igual a 20 años, fueron estimadas tomando la dotación neta y el porcentaje de pérdidas máximos establecidos por la Resolución 2320 de 2009, de modo que tanto los consumos como las demandas de caudal estén acorde con los criterios estimados según el nivel de complejidad. Las proyecciones del acueducto La Palma al año 2033 se realizaron bajo la premisa de una dotación neta igual a 90 L/hab-día y un porcentaje de pérdidas (comerciales + técnicas) del 25%.

Respecto al permiso de concesión de agua otorgado por CORANTIOQUIA para la fuente de abastecimiento La Espadera, requiere renovarse en el año 2020 (vigencia de la concesión 10 años). A la fecha del diagnóstico se requiere aumentar la cantidad de caudal concesionado, ya que para el año base 2013 se tiene un déficit actual igual a 0,45 L/s.

El caudal medio de la fuente equivale a 4,47 L/s, según los registros entregados por la CAR, lo que permitiría determinar que si se conservan como mínimo las condiciones actuales, la fuente de agua estaría en la capacidad de suministrar el caudal mínimo demandado por la población, haciendo uso de un 29,98% del total de caudal existente en la quebrada La Espadera. Sin embargo, esta situación no se presenta actualmente, dado que sobre la quebrada La Espadera, se ubican cuatro (4) estructuras de captación (Barrios de Jesús, Juan Pablo II, 8 de Marzo y La Palma) que demandan recurso agua de manera constante, siendo la bocatoma del acueducto La Palma la última de las estructuras y la que capta el caudal remanente que sobra de los demás sistemas, dejando así en este punto prácticamente seco el cuerpo de agua e incluso en algunos momentos totalmente seco, y presentando según registros suministrados por el área administrativa y técnica de este sistema de acueducto, racionamiento principalmente en épocas de estiaje.

Las proyecciones están en función de las demandas y pérdidas establecidas por la norma RAS 2000, es decir, la conservación de las condiciones descritas, están sujetas al manejo integral del sistema de acueducto, en cuanto a un adecuado funcionamiento técnico.

Figura 3-251 - Ubicación de estructuras de captación de los sistemas de acueducto Juan Pablo II, 8 de Marzo y La Palma sobre la quebrada La Espadera.

Se resalta, que el acueducto La Palma debido a la ausencia de lineamientos técnicos constructivos y de operación, se hizo necesario basar la evaluación actual conforme a las disposiciones dadas por el RAS 2000, por lo tanto ésta no es una descripción exacta de la situación actual en cuanto a condiciones de demanda del recurso agua por parte de la población.

#### *3.2.6.3.3.2 Sistema de acueducto Junta de Acción Comunal Barrio 8 de Marzo*

Según los cálculos y proyecciones del Anexo 3-24, las proyecciones de demanda para un período de análisis igual a 20 años, fueron estimadas tomando la dotación neta y el porcentaje de pérdidas máximos establecidos por la Resolución 2320 de 2009, de modo que tanto los consumos como las demandas de caudal estén acorde con los criterios estimados según su nivel de complejidad. Por lo antes mencionado, para el caso específico del sistema de acueducto 8 de marzo las proyecciones al año base de proyección 2033 se realizaron bajo la premisa de una dotación neta igual a 90 L/hab-día y un porcentaje de pérdidas (comerciales + técnicas) del 25%.

Respecto al permiso de concesión de agua que debe ser otorgado por CORANTIOQUIA para la fuente de abastecimiento quebrada La Espadera, éste debe ser agilizado por la Junta de Acción Comunal 8 de Marzo con el objeto de conocer según sus necesidades de abastecimiento si se hace necesario buscar una fuente alterna que permita suplir algún tipo de déficit.

El caudal medio ofrecido por la fuente según registros entregados por la CAR equivale a 4,47 L/s, lo que permite determinar que esta fuente no está en la capacidad de otorgar el caudal mínimo demandado por la población, ya que al año 2030 ($Q_{demandado}$ 4,62 L/s) y partiendo de la premisa que solo para el sistema de acueducto 8 de marzo se genere demanda del recurso agua sobre la quebrada La Espadera, se haría necesario captar más del caudal medio que ofrece el afluente, es decir, sin conservar caudal ecológico, ya no sería suficiente el caudal captado para cubrir el 100% de la población usuaria. Así, como lo antes mencionado, no corresponde a la realidad, ya que la demanda del recurso agua sobre la fuente está siendo ejercida por cuatro captaciones. Se tiene

que la cantidad de caudal disponible en el punto de toma de agua para el sistema de acueducto 8 de marzo es inferior a la demandada para suplir los requerimientos, situación que se hará más evidente a medida que se aumenten las demandas de cada uno de los sistemas de acueducto con captaciones sobre la fuente La Espadera.

Es de anotar también, que dichas proyecciones están en función de las demandas y pérdidas establecidas por la norma RAS 2000, por lo que la conservación de las condiciones descritas está sujeta al manejo integral del sistema de acueducto, es decir, un funcionamiento de tipo técnico en óptimas condiciones.

Figura 3-252 - Ubicación de estructuras de captación de los sistemas de acueducto 8 de Marzo y La Palma sobre la quebrada La Espadera.

Se hace importante resaltar que para el sistema de acueducto 8 de marzo debido a la ausencia de lineamientos técnicos constructivos y de operación, se hizo necesario basar su evaluación actual de acuerdo con las disposiciones dadas por el RAS 2000, por lo tanto ésta no es una descripción exacta de la situación real en cuanto a condiciones de demanda del recurso agua por parte de la población.

### *3.2.6.3.3.3 Sistema de Acueducto Junta de Acción Comunal Barrio Juan Pablo II*

Según los cálculos y proyecciones del Anexo 3-24, las proyecciones de demanda para un período de análisis igual a 20 años, fueron estimadas tomando la dotación neta y él porcentaje de pérdidas máximos establecidos por la Resolución 2320 de 2009, de modo que tanto los consumos como las demandas de caudal estén acorde con los criterios estimados según su nivel de complejidad. Por lo antes mencionado para el caso específico del sistema de acueducto Juan Pablo II las proyecciones al año base de proyección 2033 se realizaron bajo la premisa de una dotación neta igual a 115 L/hab-día y un porcentaje de pérdidas (comerciales + técnicas) del 25%.

Respecto al permiso de concesión de agua que debe ser otorgado por CORANTIOQUIA para la fuente de abastecimiento quebrada La Espadera, éste debe ser iniciado por la Junta de Acción Comunal del barrio Juan Pablo II en el menor tiempo posible, con el objeto de conocer según sus

necesidades de abastecimiento si se hace necesario buscar una fuente alterna que permita suplir algún tipo de déficit y para formalizar la actividad de toma de agua sobre la fuente de abastecimiento. Igualmente es de importancia resaltar la necesidad de legalizar la toma de agua, dado que como se mencionó, sobre la quebrada La Espadera se mantiene al día de hoy, una presión demasiado alta respecto a la demanda del recurso agua, la cual es ejercida por los sistemas de acueducto 8 de marzo, Juan Pablo II y Barrios de Jesús, siendo el sistema de acueducto Juan Pablo II el único sin concesión de aguas y sin inicio de trámite ante la CAR.

El caudal medio ofrecido por la fuente según registros entregados por la CAR equivale a 4,47 L/s, lo que permite determinar que esta fuente no está en la capacidad de otorgar el caudal mínimo demandado por la población, ya que al año base del presente estudio ya se registra un déficit igual a 0,61 L/s situación que se ve reflejada en los racionamientos que deben ser puestos en marcha principalmente en época de estiaje. Para lo antes mencionado se permite inferir, que en caso de que se efectuara demanda de caudal sobre la fuente La Espadera por el sistema de acueducto Juan Pablo II únicamente, no se contaría con el caudal suficiente para suplir el 100% de las demandas proyectadas, es decir, sin conservar caudal ecológico ya no es suficiente el caudal captado para cubrir el total de la población usuaria, sumado al hecho de que se cuenta con más sistemas de acueducto que realizan tomas sobre esta fuente en puntos muy cercanos a las del sistema de acueducto Juan Pablo II. Es de anotar también, que dichas proyecciones están en función de las demandas y pérdidas establecidas por la norma RAS 2000, por lo que la conservación de las condiciones descritas está sujeta al manejo integral del sistema de acueducto, es decir, un funcionamiento de tipo técnico en óptimas condiciones.

Se resalta, que debido a la ausencia de lineamientos técnicos constructivos y de operación del sistema de acueducto Juan Pablo II, se hizo necesario basar la evaluación actual del sistema de acuerdo con las disposiciones dadas por el RAS 2000, por lo tanto el análisis no es una descripción exacta de la situación real en cuanto a condiciones de demanda del recurso agua por parte de la población.

#### *3.2.6.3.3.4 Sistema de acueducto Barrios de Jesús*

Según los cálculos y proyecciones del Anexo 3- 24, las proyecciones de demanda para un período de análisis igual a 20 años, fueron estimadas tomando la dotación neta y él porcentaje de pérdidas máximos establecidos por la Resolución 2320 de 2009, de modo que tanto los consumos como las demandas de caudal estén acorde con los criterios estimados según su nivel de complejidad. Por lo antes mencionado para el caso específico del sistema de acueducto Barrios de Jesús, las proyecciones al año base de proyección 2033 se realizaron bajo la premisa de una dotación neta igual a 90 L/hab-día y un porcentaje de pérdidas (comerciales + técnicas) del 25%.

Respecto al permiso de concesión de agua otorgado por CORANTIOQUIA para la fuente de abastecimiento quebrada La Espadera, se requiere renovarlo en el año 2019 (vigencia de la concesión 10 años). A la fecha de diagnóstico se requiere aumentar la cantidad de caudal concesionado, ya que para el año base 2013 se tiene un déficit actual igual a 0,99 L/s.

El caudal medio ofrecido por la fuente según registros entregados por la CAR equivale a 4,47 L/s, lo que permitiría determinar que si se conservan como mínimo las condiciones actuales, la fuente de agua está en la capacidad de otorgar el caudal mínimo demandado por la población, haciendo uso de un 54,80% del total de caudal transportado por la quebrada La Espadera. Sin embargo, esta situación no es con la que se cuenta en las condiciones actuales, ya que sobre la fuente de

abastecimiento quebrada La Espadera se ubican cuatro estructuras de captación (Barrios de Jesús, Juan Pablo II, 8 de Marzo y La Palma) que demandan recurso agua de manera constante, siendo la bocatoma del acueducto Barrios de Jesús, la primera de las estructuras, pero con el atenuante que aguas arriba de esta estructura de toma, se realizan captaciones de tipo privado que alteran en gran medida el abastecimiento en épocas de estiaje.

Se resalta, que debido a la ausencia de lineamientos técnicos constructivos y de operación del sistema de acueducto Barrios de Jesús, la evaluación actual se hizo conforme a las disposiciones dadas por el RAS 2000, por lo tanto el análisis no es una descripción exacta de la situación actual en cuanto a condiciones de demanda del recurso agua por parte de la población.

#### 3.2.6.4 Usos del agua en el AID Local

El área de influencia directa local está definida por los techos de los túneles Seminario y Santa Elena considerando las fuentes hídricas localizadas sobre la superficie del alineamiento de los túneles. En esta área se encontraron 94 fuentes hídricas, de las cuales 57 son permanentes y 36 son intermitentes. A continuación se relaciona el grupo de usuarios localizados en el AID local:

Tabla 3-105 - Grupo de usuarios del AID local.

| Grupo de usuario | Nombre de usuario | Uso del agua | Caudal concesionado (L/s) | Fuente | Vereda |
|---|---|---|---|---|---|
| Acueducto | Yarumaguas | Domestico | 2,71 | La Floresta | Yarumal |
| | | | 0,88 | El Pasivo | |
| Acueducto | Multiveredal Santa Elena | Domestico | 11,14 | Santa Elena | El Placer |
| Acueducto | San Pedro | Domestico | 9,0451 | San Pedro | El Llano |
| Acueducto | Media Luna | Domestico | 1,0127 | Santa Bárbara | Media Luna |
| Acueducto | Las Flores | Doméstico y agropecuario | 2,02 | Los Chaquiros | El Placer |
| Acueducto | Conhydra | Domestico | 35 | Yarumal | Sajonia |
| Acueducto | ARSA | Domestico | 10,93 | Yarumal | Yarumal |
| | | Comercial | 8,98 | | |
| | | Industrial | 0,64 | | |
| Acueducto | Aguas del mirador | Domestico | 0,8 | Los Parra | La Quiebra |
| | | Domestico | 0,07 | Los Atehortúa | |
| Acueducto | ASUASI | Domestico | 1,9079 | La Mina | San Ignacio |
| | | Domestico | 1,0451 | La Negra 1 | |
| | | Domestico | 1,8617 | La Negra 2 | |
| Acueducto | El Progreso | Domestico | 0,238 | La Quiebra | La Quiebra |
| Acueducto | La Cascada | Domestico | 120 | Santa Elena | La Palma |
| Concesionado | Grajales Sepúlveda Clara Elena | Domestico | 0,012 | FSN | San Ignacio (La Quiebra) |
| Concesionado | Grajales Sepúlveda Clara Elena | Riego | 0,077 | FSN | San Ignacio (La Quiebra) |
| Concesionado | Grajales Sepúlveda Clara Elena | Pecuario | 0,002 | FSN | San Ignacio (La Quiebra) |
| Concesionado | Grajales Sepúlveda Clara Elena | Piscícola | 0,479 | FSN | San Ignacio (La Quiebra) |
| Concesionado | Sánchez Pissa Harold Alonso | Domestico | 0,008 | FSN | Salazar (La Quiebra) |
| Concesionado | Arango Botero Carlos | N.A | 0,00 | FSN | La Quiebra |

| Grupo de usuario | Nombre de usuario | Uso del agua | Caudal concesionado (L/s) | Fuente | Vereda |
|---|---|---|---|---|---|
| | Humberto | | | | |
| Concesionado | Corporación Refugio De Paz | Domestico | 0,19 | FSN | San Ignacio |
| Concesionado | Peláez Arroyave Lucas Antonio | Riego | 0,03 | FSN | San Ignacio |
| Concesionado | Peláez Arroyave Lucas Antonio | Piscícola | 0,02 | FSN | San Ignacio |
| Concesionado | Peláez Arroyave Lucas Antonio | Pecuario | 0,002 | FSN | San Ignacio |
| Concesionado | Vélez Arango Diego De J. | Riego | 0,003 | FSN | San Ignacio |
| Concesionado | Vélez Carmona Luz Victoria | Riego | 0,006 | FSN | San Ignacio |
| Concesionado | Díaz Vélez Ligia Del Socorro | Domestico | 0,01 | FSN | San Ignacio |
| Concesionado | Hincapié Guzmán Aníbal Antonio | Domestico | 0,007 | FSN | San Ignacio |
| Concesionado | Hincapié Guzmán Aníbal Antonio | Riego | 0,015 | FSN | San Ignacio |
| Concesionado | Ortega Sánchez Sandra Cristina | Domestico | 0,006 | FSN | San Ignacio |
| Concesionado | Ortega Sánchez Sandra Cristina | Riego | 0,008 | FSN | San Ignacio |
| Concesionado | Restrepo Parra Luis German | Domestico | 0,018 | FSN | San Ignacio |
| Concesionado | Restrepo Parra Luis German | Pecuario | 0,007 | FSN | San Ignacio |
| Concesionado | Restrepo Parra Luis German | Riego | 0,011 | FSN | San Ignacio |
| Concesionado | Hincapié Hincapié Fabio Alonso | Domestico | 0,008 | FSN | Cerro Verde (San Ignacio) |
| Concesionado | Hincapié Hincapié Fabio Alonso | Riego | 0,082 | FSN | Cerro Verde (San Ignacio) |
| Concesionado | Hincapié Hincapié Fabio Alonso | Domestico | 0,008 | FSN | Cerro Verde (San Ignacio) |
| Concesionado | Hernández Mejía Rafael Guillermo | Domestico | 0,012 | FSN | San Ignacio |
| Concesionado | Campuzano Echeverri Jesús Urbano | Domestico | 0,003 | FSN 1 | Yarumal (La Quiebra) |
| Concesionado | Campuzano Echeverri Jesús Urbano | Pecuario | 0,003 | FSN 1 | Yarumal (La Quiebra) |
| Concesionado | Echeverri Echeverri Lucas | Riego | 0,072 | Nacimiento 1 | Yarumal |
| Concesionado | Echeverri Echeverri Lucas | Pecuario | 0,004 | Nacimiento 1 | Yarumal |
| Concesionado | Moreno Marín Alba Lucia | Domestico | 0,008 | El Cerro | Yarumal |
| Concesionado | Moreno Marín Alba Lucia | Riego | 0,003 | El Cerro | Yarumal |
| Concesionado | Moreno Marín Alba Lucia | Piscícola | 0,095 | El Cerro | Yarumal |
| Concesionado | Areiza Vásquez Lucero | Domestico | 0,004 | La Floresta | Yarumal |

| Grupo de usuario | Nombre de usuario | Uso del agua | Caudal concesionado (L/s) | Fuente | Vereda |
|---|---|---|---|---|---|
| Concesionado | Areiza Vásquez Lucero | Pecuario | 0,012 | La Floresta | Yarumal |
| Concesionado | Orozco Echeverri Bayter Orlando y Castañeda Gómez María Judith | Domestico | 0,001 | El Cerro | Yarumal |
| Concesionado | Orozco Echeverri Bayter Orlando y Castañeda Gómez María Judith | Riego | 0,052 | El Cerro | Yarumal |
| Concesionado | Orozco Echeverri Bayter Orlando y Castañeda Gómez María Judith | Pecuario | 0,002 | El Cerro | Yarumal |
| Concesionado | Atehortúa Patiño John Jairo | Domestico | 0,016 | El Cerro | Yarumal |
| Concesionado | Atehortúa Patiño John Jairo | Riego | 0,06 | El Cerro | Yarumal |
| Concesionado | Cárdenas Betancur Hernán | Domestico | 0,012 | FSN 2 | Yarumal |
| Concesionado | Cárdenas Betancur Hernán | Riego | 0,07 | FSN 2 | Yarumal |
| Concesionado | Cárdenas Betancur Hernán | Riego | 0,07 | FSN 3 | Yarumal |
| Concesionado | Villegas López Jorge Alonso | Domestico | 0,008 | FSN | Yarumal |
| Concesionado | Villegas López Jorge Alonso | Riego | 0,022 | FSN | Yarumal |
| Concesionado | Ochoa Sánchez Guillermo León y Tenorio Patiño Eddy Elena | Domestico | 0,01 | FSN | Yarumal |
| Concesionado | Ríos Ríos Luis Fernando | Domestico | 0,008 | FSN | Yarumal |
| Concesionado | Ríos Ríos Luis Fernando | Riego | 0,069 | FSN | Yarumal |
| Concesionado | Ríos Ríos Luis Fernando | Pecuario | 0,006 | FSN | Yarumal |
| Concesionado | Ríos Ríos Julieth Estella | Domestico | 0,008 | FSN | Yarumal |
| Concesionado | Ríos Ríos Julieth Estella | Pecuario | 0,004 | FSN | Yarumal |
| Concesionado | Ríos Ríos Julieth Estella | Riego | 0,017 | FSN | Yarumal |
| Concesionado | Ríos Ríos Jhon Jairo | Domestico | 0,008 | FSN | Yarumal |
| Concesionado | Ríos Ríos Jhon Jairo | Pecuario | 0,004 | FSN | Yarumal |
| Concesionado | Ríos Ríos Jhon Jairo | Riego | 0,017 | FSN | Yarumal |
| Concesionado | Ríos Ríos María Elena | Domestico | 0,008 | FSN | Yarumal |
| Concesionado | Ríos Ríos María Elena | Riego | 0,017 | FSN | Yarumal |
| Concesionado | Sánchez Gaviria Pedro Luis | Domestico | 0,019 | FSN | La Quiebra |
| Concesionado | Sánchez Gaviria Pedro Luis | Pecuario | 0,006 | FSN | La Quiebra |
| Concesionado | Sánchez Gaviria Pedro Luis | Riego | 0,022 | FSN | La Quiebra |
| Concesionado | Sánchez José Diego | Domestico | 0,019 | El Consuelo | La Quiebra |
| Concesionado | Sánchez José Diego | Pecuario | 0,008 | El Consuelo | La Quiebra |
| Concesionado | Sánchez José Diego | Riego | 0,684 | El Bosque | La Quiebra |
| Concesionado | Castañeda Castañeda José Rodrigo | Domestico | 0,01 | FSN | La Quiebra |
| Concesionado | Soto Echeverri Gloria Cecilia | Riego | 0,007 | Acequia | La Quiebra |
| Concesionado | Echeverri Vásquez Tulio Mario, Durango Holguín María Cecilia | Domestico | 0,008 | Acequia | La Quiebra |
| Concesionado | Campuzano Echeverri Jesús Urbano | Domestico | 0,003 | FSN 1 | Yarumal (La Quiebra) |

| Grupo de usuario | Nombre de usuario | Uso del agua | Caudal concesionado (L/s) | Fuente | Vereda |
|---|---|---|---|---|---|
| Concesionado | Campuzano Echeverri Jesús Urbano | Pecuario | 0,003 | FSN 1 | Yarumal (La Quiebra) |
| Concesionado | Ruiz Valencia Silvia Estella | Domestico | 0,008 | FSN | La Quiebra |
| Concesionado | Ruiz Valencia Silvia Estella | Riego | 0,003 | FSN | La Quiebra |
| Concesionado | Echeverri Vásquez Oliverio De Jesús | Domestico | 0,008 | Acequia | La Quiebra |
| Concesionado | Correa Cardona Luz Maryori | Domestico | 0,016 | Aljibe | Salazar (La Quiebra) |
| Concesionado | Correa Cardona Luz Maryori | Pecuario | 0,056 | Aljibe | Salazar (La Quiebra) |
| Concesionado | Correa Cardona Luz Maryori | Riego | 0,001 | Aljibe | Salazar (La Quiebra) |
| Concesionado | Grajales Sepúlveda Clara Elena | Domestico | 0,012 | FSN | San Ignacio (La Quiebra) |
| Concesionado | Grajales Sepúlveda Clara Elena | Riego | 0,077 | FSN | San Ignacio (La Quiebra) |
| Concesionado | Grajales Sepúlveda Clara Elena | Pecuario | 0,002 | FSN | San Ignacio (La Quiebra) |
| Concesionado | Grajales Sepúlveda Clara Elena | Piscícola | 0,479 | FSN | San Ignacio (La Quiebra) |
| Concesionado | Arbeláez Zuluaga Rodrigo | Domestico | 0,01 | FSN | Quiebra |
| Concesionado | Arbeláez Zuluaga Rodrigo | Riego | 0,058 | FSN | Quiebra |
| Concesionado | Arbeláez Zuluaga Rodrigo | Pecuario | 0,007 | FSN | Quiebra |
| Concesionado | Zapata Hincapié María Nelly | Domestico | 0,008 | FSN | La Quiebra |
| Concesionado | Zapata Hincapié María Nelly | Pecuario | 0,002 | FSN | La Quiebra |
| Concesionado | Zapata Hincapié María Nelly | Riego | 0,007 | FSN | La Quiebra |
| Concesionado | Sánchez Pissa Harold Alonso | Domestico | 0,008 | FSN | Salazar (La Quiebra) |
| Concesionado | Callejas Mejía Ricardo de Las Mercedes | Domestico | 0,005 | FSN | La Quiebra |
| Concesionado | Callejas Mejía Ricardo de Las Mercedes | Ornamental | 0,054 | FSN | La Quiebra |
| Concesionado | Callejas Mejía Ricardo de Las Mercedes | Riego | 0,017 | FSN | La Quiebra |
| Concesionado | Rendón Tobón Carlos Alberto | Domestico | 0,032 | FSN | Salazar (La Quiebra) |
| Concesionado | Atehortúa Atehortúa Ana Judith, Omaira y Rosalba | Domestico | 0,012 | FSN | El Cerro (La Quiebra) |
| Concesionado | Duque Echeverry Jorge De Jesús | Domestico | 0,016 | FSN | La Quiebra |
| Concesionado | Gonima López Rafael | Domestico | 0,009 | FSN | La Quiebra |
| Concesionado | Vargas Tabares Rubén Darío | Riego | 0,069 | FSN | La Quiebra |
| Concesionado | Vargas Tabares Rubén Darío | Pecuario | 0,14 | FSN | La Quiebra |

| Grupo de usuario | Nombre de usuario | Uso del agua | Caudal concesionado (L/s) | Fuente | Vereda |
|---|---|---|---|---|---|
| Concesionado | Arango Botero Carlos Humberto | N.A | 0,00 | FSN | La Quiebra |
| Concesionado | Duque Echeverry Jorge De Jesús | Domestico | 0,016 | FSN | La Quiebra |
| Concesionado | Aristizabal Arroyabe Alejandra María | Domestico | 0,014 | FSN | Sajonia |
| Concesionado | Aristizabal Arroyabe Alejandra María | Riego | 0,003 | FSN | Sajonia |
| Concesionado | Aristizabal Arroyabe Alejandra María | Ornamental | 0,001 | FSN | Sajonia |
| Concesionado | Pérez Mejía Luz Estella | Domestico | 0,008 | FSN | Sajonia |
| Concesionado | Pérez Mejía Luz Estella | Riego | 0,003 | FSN | Sajonia |
| Concesionado | Corporación Refugio De Paz | Domestico | 0,19 | FSN | San Ignacio |
| Concesionado | Peláez Arroyave Lucas Antonio | Riego | 0,03 | FSN | San Ignacio |
| Concesionado | Peláez Arroyave Lucas Antonio | Piscícola | 0,02 | FSN | San Ignacio |
| Concesionado | Peláez Arroyave Lucas Antonio | Pecuario | 0,002 | FSN | San Ignacio |
| Concesionado | Vélez Arango Diego De J. | Riego | 0,003 | FSN | San Ignacio |
| Concesionado | Vélez Carmona Luz Victoria | Riego | 0,006 | FSN | San Ignacio |
| Concesionado | Díaz Vélez Ligia Del Socorro | Domestico | 0,01 | FSN | San Ignacio |
| Concesionado | Hincapié Guzmán Aníbal Antonio | Domestico | 0,007 | FSN | San Ignacio |
| Concesionado | Hincapié Guzmán Aníbal Antonio | Riego | 0,015 | FSN | San Ignacio |
| Concesionado | Ortega Sánchez Sandra Cristina | Domestico | 0,006 | Don Dieguito | San Ignacio |
| Concesionado | Ortega Sánchez Sandra Cristina | Riego | 0,008 | Don Dieguito | San Ignacio |
| Concesionado | Restrepo Parra Luis German | Domestico | 0,018 | FSN | San Ignacio |
| Concesionado | Restrepo Parra Luis German | Pecuario | 0,007 | FSN | San Ignacio |
| Concesionado | Restrepo Parra Luis German | Riego | 0,011 | FSN | San Ignacio |
| Concesionado | Hincapié Hincapié Fabio Alonso | Domestico | 0,008 | FSN 1 + FSN 2 | Cerro Verde (San Ignacio) |
| Concesionado | Hincapié Hincapié Fabio Alonso | Riego | 0,082 | FSN 1 + FSN 2 | Cerro Verde (San Ignacio) |
| Concesionado | Hincapié Hincapié Fabio Alonso | Domestico | 0,008 | FSN 3 | Cerro Verde (San Ignacio) |
| Concesionado | Hernández Mejía Rafael | Domestico | 0,012 | FSN | San Ignacio |

| Grupo de usuario | Nombre de usuario | Uso del agua | Caudal concesionado (L/s) | Fuente | Vereda |
|---|---|---|---|---|---|
| | Guillermo | | | | |
| Concesionado | Hernández Mejía Rafael Guillermo | Pecuario | 0,001 | FSN | San Ignacio |
| Concesionado | Gallego Castaño Hernando | Domestico | 0,008 | FSN | San Ignacio |
| Concesionado | Yepes P María Estella | Domestico | 0,0037 | FSN | San Ignacio |
| Concesionado | Echeverri Sánchez María Elena | Domestico | 0,008 | FSN | San Ignacio |
| Concesionado | Sánchez de Echeverri Rosa Elvira | Domestico | 0,003 | FSN | San Ignacio |
| Concesionado | Sánchez de Echeverri Rosa Elvira | Riego | 0,003 | FSN | San Ignacio |
| Concesionado | Palacio de Palacio Carolina | Domestico | 0,007 | FSN | San Ignacio |
| Concesionado | Palacio de Palacio Carolina | Riego | 0,003 | FSN | San Ignacio |
| Concesionado | Echeverri Marta Lucia, Campuzano Echeverri Heli y Campuzano Echeverri Cesar | Domestico | 0,008 | FSN | San Ignacio |
| Concesionado | Echeverri Marta Lucia, Campuzano Echeverri Heli y Campuzano Echeverri Cesar | Riego | 0,007 | FSN | San Ignacio |
| Concesionado | Echeverri Hincapié Jesús Alonso | Domestico | 0,007 | FSN | San Ignacio |
| Concesionado | Echeverri Hincapié Jesús Alonso | Riego | 0,003 | FSN | San Ignacio |
| Concesionado | Beatriz Elena Orozco Henao | Agrícola | 0,01 | Sin Nombre (Nace en predio de Diego Salazar) | El Cerro |
| Concesionado | Luz Amparo Saldarriaga Mesa | Doméstico | 0,206 | Sin Nombre (Nace en predio La Soltera) | Las Palmas |
| Concesionado | Aníbal de Jesús Londoño Atehortúa | Agrícola | 0,15 | El Cedro | El Cerro |
| Concesionado | Leonardo de Jesús Londoño Atehortúa | Agrícola | 0,3 | El Cedro | El Cerro |
| Concesionado | Martha Luz Londoño Atehortúa | Agrícola | 0,00 | El Cedro | El Cerro |
| Concesionado | Luz Estella Londoño Atehortúa | Agrícola | 0,15 | El Cedro | El Cerro |
| Concesionado | José Iván Londoño Atehortúa | Agrícola | 0,15 | El Cedro | El Cerro |
| Concesionado | Darío de Jesús Londoño Atehortúa | Agrícola | 0,3 | El Cedro | El Cerro |
| Concesionado | José Iván Londoño Atehortúa | Doméstico | 0,00405 | El Cedro | El Cerro |

| Grupo de usuario | Nombre de usuario | Uso del agua | Caudal concesionado (L/s) | Fuente | Vereda |
|---|---|---|---|---|---|
| Concesionado | Luz Gladys Correa de Mejía | Doméstico | 0,005555 | Sin Nombre (Nace en predio El Cerro) | El Cerro |
| Concesionado | Luz Gladys Correa de Mejía | Doméstico | 0,00405 | Sin Nombre (Nace en predio El Cerro) | El Cerro |
| Concesionado | Luz Gladys Correa de Mejía | Pecuario | 0,004224 | Sin Nombre (Nace en predio El Cerro) | El Cerro |
| Concesionado | Enrique Rojas Montoya | Doméstico | 0,001736 | Yerbabuena | S.I |
| Concesionado | Enrique Rojas Montoya | Agrícola | 0,0028 | Yerbabuena | S.I |
| Concesionado | Enrique Rojas Montoya | Doméstico | 0,006076 | Yerbabuena | S.I |
| Concesionado | Juan Álvaro Ríos Gallego | Doméstico | 0,012152 | San Pedro | El Llano |
| Concesionado | Mauricio Vargas Fernández | Pecuario | 0,008449 | Las Pecas | El Cerro |
| Concesionado | Clara Cecilia Vargas Fernández | Agrícola | 0,06 | Las Pecas | El Cerro |
| Concesionado | Héctor José Vargas Fernández | Agrícola | 0,1 | Las Pecas | El Cerro |
| Concesionado | Héctor José Vargas Fernández | Pecuario | 0,011574 | Las Pecas | El Cerro |
| Concesionado | Mauricio Vargas Fernández | Agrícola | 0,06 | Las Pecas | El Cerro |
| Concesionado | Mauricio Vargas Fernández | Pecuario | 0,000324 | Las Pecas | El Cerro |
| Concesionado | Fundación Hermanos Sayistas de San Francisco | Doméstico | 0,004 | Sin Nombre (Afluente de La Quebrada Santa Elena) | El Placer |
| Concesionado | Fundación Hermanos Sayistas de San Francisco | Agrícola | 0,002 | Sin Nombre (Afluente de La Quebrada Santa Elena) | El Placer |
| Concesionado | Luis Nicolás Ríos Zapata | Doméstico | 0,0121 | San Pedro | El Llano |
| Concesionado | Luis Nicolás Ríos Zapata | Agrícola | 0,00 | San Pedro | El Llano |
| Concesionado | María Albertina Ríos Zapata | Doméstico | 0,0121 | San Pedro | El Llano |
| Concesionado | Claudia Patricia Grajales Herrera | Doméstico | 0,0121 | San Pedro | El Llano |
| Concesionado | Carmen Cecilia Ríos Zapata | Doméstico | 0,0121 | San Pedro | El Llano |
| Concesionado | Luis Nicolás Ríos Zapata | Agrícola | 0,00 | San Pedro | El Llano |
| Concesionado | Luis Nicolás Ríos Zapata | Agrícola | 0,00 | San Pedro | El Llano |
| Concesionado | Esther Julia Ríos Zapata | Doméstico | 0,0121 | San Pedro | El Llano |
| Concesionado | Esther Julia Ríos Zapata | Agrícola | 0,02 | San Pedro | El Llano |
| Concesionado | Luciano Gallego Hincapié | Agrícola | 0,0198 | San Miguel | Paysandú |
| Concesionado | Yesid Alonso Gallego Hincapié | Agrícola | 0,0198 | San Miguel | Paysandú |
| Concesionado | José Miguel Hincapié Soto | Agrícola | 0,0198 | San Miguel | Paysandú |

| Grupo de usuario | Nombre de usuario | Uso del agua | Caudal concesionado (L/s) | Fuente | Vereda |
|---|---|---|---|---|---|
| Concesionado | Claudia María Hincapié Hernández | Agrícola | 0,0198 | San Miguel | Paysandú |
| Concesionado | Otoniel de Jesús Hincapié Soto | Agrícola | 0,0198 | San Miguel | Paysandú |
| Concesionado | Olga Rosa Gallego Hincapié | Agrícola | 0,0198 | San Miguel | Paysandú |
| Concesionado | Juan Diego Gallego Hincapié | Agrícola | 0,0198 | San Miguel | Paysandú |
| Concesionado | Sigifredo Antonio Hincapié Soto | Agrícola | 0,0198 | San Miguel | Paysandú |
| Concesionado | Ramiro Hincapié Soto | Agrícola | 0,0198 | San Miguel | Paysandú |
| Concesionado | Elvia Hincapié Soto | Agrícola | 0,0198 | San Miguel | Paysandú |
| Concesionado | Claudia Patricia Zapata Álzate | Pecuario | 0,0084 | FSN | Las Brisas |
| Concesionado | Claudia Patricia Zapata Álzate | Agrícola | 0,143 | FSN | Las Brisas |
| Concesionado | Argemiro Suárez Giraldo | Doméstico | 0,006944 | FSN | El Cerro |
| Concesionado | Alberto de Jesús Atehortúa Soto | Agrícola | 0,1056 | FSN | El Llano |
| Concesionado | Adriana Patricia Reyes Agudelo | Agrícola | 0,165 | El Placer | El Placer |
| Concesionado | Ramón Emilio Ríos Zapata | Doméstico | 0,003472 | FSN | El Llano |
| Concesionado | Ruth María Soto Ríos | Doméstico | 0,00 | FSN | El Llano |
| Concesionado | Ruth María Soto Ríos | Doméstico | 0,00 | FSN | El Llano |
| Concesionado | Ramón Emilio Ríos Zapata | Agrícola | 0,165 | FSN | El Llano |
| Concesionado | Ramón Emilio Ríos Zapata | Doméstico | 0,001851 | FSN | El Llano |
| Concesionado | Ruth María Soto Ríos | Agrícola | 0,00 | FSN | El Llano |
| Concesionado | María Alicia Soto de Álzate | Doméstico | 0,013888 | FSN | El Llano |
| Concesionado | Comercializadora de Champiñones S.A | Agrícola | 0,2 | Santa Elena | Santa Elena Parte Central |
| Concesionado | Julio César Atehortúa | Agrícola | 0,025 | FSN | El Cerro |
| Concesionado | José Miguel Ríos Zapata | Agrícola | 0,028 | FSN | S.I |
| Concesionado | José Miguel Ríos Zapata | Doméstico | 0,0162 | FSN | S.I |
| Concesionado | Ramón Emilio Ríos Zapata | Doméstico | 0,0162 | FSN | S.I |
| Concesionado | Ramón Emilio Ríos Zapata | Agrícola | 0,028 | FSN | S.I |
| Concesionado | Juan Fernando Orozco Patiño | Agrícola | 0,005 | FSN (Terrenos de Lucia Salazar) | El Cerro |
| Concesionado | Yudi Zulima Pérez Toro | Agrícola | 0,005 | FSN (Terrenos de Lucia Salazar) | El Cerro |
| Concesionado | Rosmery Arias Arteaga | Agrícola | 0,03 | San Juan | El Llano |
| Concesionado | Rosmery Arias Arteaga | Pecuario | 0,002534 | San Juan | El Llano |
| Concesionado | Julio Cesar Caballero Quintero | Agrícola | 0,03 | San Juan | El Llano |
| Concesionado | Julio Cesar Caballero Quintero | Pecuario | 0,002534 | San Juan | El Llano |
| Concesionado | Institución Educativa Santa Elena | Agrícola | 0,055 | FSN | S.I |

| Grupo de usuario | Nombre de usuario | Uso del agua | Caudal concesionado (L/s) | Fuente | Vereda |
|---|---|---|---|---|---|
| Concesionado | Claudia Patricia Grajales Herrera | Agrícola | 0,01 | FSN | El Llano |
| Concesionado | María Albertina Ríos Zapata | Doméstico | 0,0122 | FSN | El Llano |
| Concesionado | María Albertina Ríos Zapata | Agrícola | 0,01 | FSN | El Llano |
| Concesionado | Carmen Cecilia Ríos Zapata | Doméstico | 0,010127 | FSN | El Llano |
| Concesionado | Carmen Cecilia Ríos Zapata | Agrícola | 0,01 | FSN | El Llano |
| Concesionado | Luis Nicolás Ríos Zapata | Doméstico | 0,012152 | FSN | El Llano |
| Concesionado | Claudia Patricia Grajales Herrera | Doméstico | 0,008101 | FSN | El Llano |
| Concesionado | Esther Julia Ríos Zapata | Doméstico | 0,012152 | FSN | El Llano |
| Concesionado | Esther Julia Ríos Zapata | Agrícola | 0,0100 | FSN | El Llano |
| Concesionado | Luis Nicolás Ríos Zapata | Agrícola | 0,01 | FSN | El Llano |
| Concesionado | Juan Camilo Rúa Cano | Pecuario | 0,008101 | Las Pecas | El Cerro |
| Concesionado | Juan Camilo Rúa Cano | Acuicultura | 0,001666 | Las Pecas | El Cerro |
| Concesionado | Beatriz Elena Jiménez Valencia | Agrícola | 0,03 | FSN | El Cerro |
| Concesionado | Beatriz Elena Jiménez Valencia | Acuicultura | 0,133333 | FSN | El Cerro |
| Concesionado | Carlos Alberto Gómez Zuluaga | Doméstico | 0,004629 | FSN (Predio Carlos Gómez) | Santa Elena Parte Central |
| Concesionado | Shillan S.A. | Doméstico | 0,016203 | El Cedro | El Cerro |
| Concesionado | Shillan S.A. | Pecuario | 0,008449 | El Cedro | El Cerro |
| Concesionado | Seminario Conciliar de la Arquidiócesis de Medellín | Agrícola | 0,66 | Fuente 2 | Las Palmas |
| Concesionado | Seminario Conciliar de la Arquidiócesis de Medellín | Pecuario | 0,0002 | Fuente 2 | Las Palmas |
| Concesionado | Seminario Conciliar de la Arquidiócesis de Medellín | Doméstico | 0,5064 | Fuente 2 | Las Palmas |
| No Concesionado | Raúl De Jesús Salazar Soto | Doméstico | Sin concesión | FSN (nacimiento) | El Llano |
| No Concesionado | S.I. | Doméstico | Sin concesión | FSN | El Llano |
| No Concesionado | Ligia Beatriz Mesa Rendón | Doméstico | Sin concesión | FSN | El Llano |
| No Concesionado | Jaime Grajales | Doméstico | Sin concesión | FSN (nacimiento) | El Llano |
| No Concesionado | S.I. | Doméstico | Sin concesión | N.A. | El Llano |
| No Concesionado | Adriana María Ríos | Doméstico | Sin concesión | FSN (nacimiento) | El Llano |
| No Concesionado | María Patricia Zapata Grisales | Doméstico | Sin concesión | FSN (nacimiento) | El Placer |

| Grupo de usuario | Nombre de usuario | Uso del agua | Caudal concesionado (L/s) | Fuente | Vereda |
|---|---|---|---|---|---|
| No Concesionado | Berta Atehortúa Soto | Doméstico | Sin concesión | FSN (nacimiento) | El Cerro |
| No Concesionado | Berta Atehortúa Soto | Doméstico | Sin concesión | FSN (nacimiento) | El Cerro |
| No Concesionado | Paula Andrea Zuluaga Ríos | Doméstico | Sin concesión | FSN (nacimiento) | El Cerro |
| No Concesionado | Lilian Zapata | Doméstico | Sin concesión | FSN (nacimiento) | El Cerro |
| No Concesionado | Lilian Zapata | Doméstico | Sin concesión | FSN (nacimiento) | El Cerro |
| No Concesionado | S.I. | Doméstico | Sin concesión | FSN (nacimiento) | El Cerro |
| No Concesionado | María Mercedes Vargas Arbeláez | Doméstico | Sin concesión | FSN (nacimiento) | El Cerro |
| No Concesionado | S.I. | Doméstico | Sin concesión | FSN (nacimiento) | El Cerro |
| No Concesionado | José Ospina Rendón | Doméstico | Sin concesión | FSN (nacimiento) | Santa Elena - Sector Central |
| No Concesionado | Martin Meneses | Doméstico | Sin concesión | FSN | Santa Elena - Sector Central |
| No Concesionado | Ángela María Escobar Echeverry | Doméstico | Sin concesión | FSN (nacimiento) | La Yarumal |
| No Concesionado | Mary Luz Mejía Sepúlveda | Doméstico | Sin concesión | FSN (nacimiento) | La Yarumal |
| No Concesionado | Inés Elena Sepúlveda Martínez | Doméstico | Sin concesión | FSN (nacimiento) | La Yarumal |
| No Concesionado | Diana María Echeverri | Doméstico | Sin concesión | FSN (nacimiento) | La Yarumal |
| No Concesionado | Mirian Echeverri Echeverri | Recreacional | Sin concesión | FSN (nacimiento) | La Yarumal |
| No Concesionado | Juan Guillermo Calle Arango | Doméstico | Sin concesión | FSN (nacimiento) | La Quiebra |
| No Concesionado | S.I. | Doméstico | Sin concesión | FSN (nacimiento) | La Yarumal |
| No Concesionado | S.I. | Doméstico | Sin concesión | FSN | La Yarumal |
| No Concesionado | Gloria Patricia Echeverry Vallejo | Doméstico | Sin concesión | FSN (nacimiento) | San Ignacio |
| No Concesionado | Luz Elena Hincapié | Doméstico | Sin concesión | FSN (nacimiento) | San Ignacio |
| No Concesionado | Huber Hincapié Rodríguez | Doméstico | Sin concesión | FSN (nacimiento) | San Ignacio |
| No Concesionado | Juan Camilo Botero Hincapié | Doméstico | Sin concesión | FSN | San Ignacio |
| No | Dilia Atehortúa Hincapié | Doméstico | Sin concesión | FSN (nacimiento) | San Ignacio |

| Grupo de usuario | Nombre de usuario | Uso del agua | Caudal concesionado (L/s) | Fuente | Vereda |
|---|---|---|---|---|---|
| Concesionado | | | | | |
| No Concesionado | Luz Marina Jurado Echeverri | Doméstico | Sin concesión | FSN (nacimiento) | San Ignacio |
| No Concesionado | Luz Marina Jurado Echeverri | Doméstico | Sin concesión | FSN (nacimiento) | San Ignacio |
| No Concesionado | Claudia María Vargas Hincapié | Doméstico | Sin concesión | FSN | San Ignacio |
| No Concesionado | Juan Guillermo Sánchez Sánchez | Doméstico | Sin concesión | FSN | San Ignacio |
| No Concesionado | Salustriana Sánchez Henao | Doméstico | Sin concesión | FSN | San Ignacio |
| No Concesionado | Blanca Sánchez | Doméstico | Sin concesión | Nacimiento El Cerro | San Ignacio |
| No Concesionado | Francisco Eladio López Correa | Doméstico | Sin concesión | FSN | San Ignacio |
| No Concesionado | Alicia Palacio Palacio | Doméstico | Sin concesión | FSN | San Ignacio |
| No Concesionado | Pablo José Franco Piedrahita | Doméstico | Sin concesión | FSN (nacimiento) | San Ignacio |
| No Concesionado | Pablo José Franco Piedrahita | Doméstico | Sin concesión | FSN (nacimiento) | San Ignacio |
| No Concesionado | Pablo José Franco Piedrahita | Doméstico | Sin concesión | FSN (nacimiento) | San Ignacio |
| No Concesionado | Pablo José Franco Piedrahita | Doméstico | Sin concesión | FSN (nacimiento) | San Ignacio |
| No Concesionado | Natalia Salazar Franco | Doméstico | Sin concesión | FSN (nacimiento) | San Ignacio |
| No Concesionado | Alexander Cardona Cano | Recreacional | Sin concesión | FSN (nacimiento) | San Ignacio |
| No Concesionado | Lina Marcela Londoño Cuartas | Doméstico | Sin concesión | FSN | San Ignacio |
| No Concesionado | Luz Elena Torres Botero | Doméstico | Sin concesión | FSN (nacimiento) | San Ignacio |
| No Concesionado | Fabio Alonso Hincapié Hincapié | Doméstico | Sin concesión | FSN (nacimiento) | La Quiebra |
| No Concesionado | Rosa Elvia Hincapié Hincapié | Doméstico | Sin concesión | FSN (nacimiento) | La Quiebra |
| No Concesionado | Luz Marina Jurado Echeverri | Doméstico | Sin concesión | FSN (nacimiento) | San Ignacio |
| No Concesionado | S.I. | Doméstico | Sin concesión | FSN (nacimiento) | San Ignacio |
| No Concesionado | Tatiana Grajales Grajales | Doméstico | Sin concesión | FSN (nacimiento) | El Llano |
| No Concesionado | María Luz Mari Grajales Grajales | Doméstico | Sin concesión | FSN (nacimiento) | El Llano |
| No Concesionado | Mari Luz Mari Grajales Grajales | Doméstico | Sin concesión | FSN (nacimiento) | El Llano |
| No | Marta Lucia Ruiz | Doméstico | Sin concesión | FSN (nacimiento) | El Llano |

| Grupo de usuario | Nombre de usuario | Uso del agua | Caudal concesionado (L/s) | Fuente | Vereda |
|---|---|---|---|---|---|
| Concesionado | | | | | |
| No Concesionado | Tatiana Grajales | Doméstico | Sin concesión | FSN (nacimiento) | El Llano |
| No Concesionado | Catalina Vásquez | Doméstico | Sin concesión | FSN (nacimiento) | El Llano |
| No Concesionado | Tatiana Grajales Grajales | Doméstico | Sin concesión | FSN (nacimiento) | El Llano |
| No Concesionado | Tatiana Grajales Grajales | Doméstico | Sin concesión | FSN (nacimiento) | El Llano |
| No Concesionado | Blanca Nohelia Grajales Saldarriaga | Doméstico | Sin concesión | FSN (nacimiento) | El Llano |
| No Concesionado | Dora Alba Agudelo Zapata | Doméstico | Sin concesión | FSN (nacimiento) | El Llano |
| No Concesionado | Mauricio Botero Ciro | Doméstico | Sin concesión | FSN (nacimiento) | El Llano |
| No Concesionado | Elkin Cardona Posso | Doméstico | Sin concesión | FSN (nacimiento) | El Llano |
| No Concesionado | Iván de Jesús Zapata | Doméstico | Sin concesión | FSN (nacimiento) | El Llano |
| No Concesionado | Mauricio Botero Ciro | Doméstico | Sin concesión | FSN (nacimiento) | El Llano |
| No Concesionado | Diego Alvares Ortiz | Doméstico | Sin concesión | FSN (nacimiento) | El Llano |
| No Concesionado | Federico Gómez | Doméstico | Sin concesión | FSN (nacimiento) | El Llano |
| No Concesionado | Federico Gómez | Doméstico | Sin concesión | FSN (nacimiento) | El Llano |
| No Concesionado | Federico Gómez | Doméstico | Sin concesión | FSN (nacimiento) | El Llano |
| No Concesionado | Diego Alejandro Gómez | Doméstico | Sin concesión | FSN (nacimiento) | El Llano |
| No Concesionado | Tatiana Grajales Grajales | Doméstico | Sin concesión | FSN (nacimiento) | El Llano |
| No Concesionado | Tatiana Grajales Grajales | Doméstico | Sin concesión | FSN (nacimiento) | El Llano |
| No Concesionado | Elizabeth Díaz Cortes | Doméstico | Sin concesión | FSN (nacimiento) | El Llano |
| No Concesionado | Rosa Helena Zapata Ortiz | Doméstico | Sin concesión | FSN (nacimiento) | El Llano |
| No Concesionado | Laura Acevedo | Doméstico | Sin concesión | FSN (nacimiento) | El Llano |
| No Concesionado | Betty Edilma Grajales Atehortúa | Doméstico | Sin concesión | FSN (nacimiento) | El Llano |
| No Concesionado | Sandra Patricia Botero Ciro | Doméstico | Sin concesión | FSN (nacimiento) | El Llano |
| No Concesionado | Juan Fernando | Doméstico | Sin concesión | FSN (nacimiento) | El Llano |
| No | Lucelli Álzate Taborda | Doméstico | Sin concesión | FSN (nacimiento) | El Llano |

| Grupo de usuario | Nombre de usuario | Uso del agua | Caudal concesionado (L/s) | Fuente | Vereda |
|---|---|---|---|---|---|
| Concesionado | | | | | |
| No Concesionado | Héctor Grajales Saldarriaga | Doméstico | Sin concesión | FSN (nacimiento) | El Llano |
| No Concesionado | Luis Gonzalo Grajales Saldarriaga | Doméstico | Sin concesión | FSN (nacimiento) | El Llano |
| No Concesionado | Graciela Grajales | Doméstico | Sin concesión | FSN (nacimiento) | El Llano |
| No Concesionado | Luis Gonzalo Grajales Saldarriaga | Doméstico | Sin concesión | FSN (nacimiento) | El Llano |
| No Concesionado | Luis Gonzalo Grajales Saldarriaga | Doméstico | Sin concesión | FSN (nacimiento) | El Llano |
| No Concesionado | Mauricio Botero Ciro | Doméstico | Sin concesión | FSN (nacimiento) | El Llano |
| No Concesionado | Katherine Londoño Sánchez | Doméstico | Sin concesión | FSN (nacimiento) | El Llano |
| No Concesionado | Katherine Londoño Sánchez | Doméstico | Sin concesión | FSN (nacimiento) | El Llano |
| No Concesionado | Yuli Andrea Soto Atehortúa | Doméstico | Sin concesión | FSN (nacimiento) | El Llano |
| No Concesionado | Yuli Andrea Soto Atehortúa | Doméstico | Sin concesión | FSN (nacimiento) | El Llano |
| No Concesionado | Eliana Soto Atehortúa | Doméstico | Sin concesión | FSN (nacimiento) | El Llano |
| No Concesionado | Eliana Marcela Cortez Esquivel | Doméstico | Sin concesión | FSN (nacimiento) | El Llano |
| No Concesionado | Bibiana Patiño Atehortúa | Doméstico | Sin concesión | FSN (nacimiento) | El Llano |
| No Concesionado | Gloria Gómez Aristizabal | Doméstico | Sin concesión | FSN (nacimiento) | El Llano |
| No Concesionado | William Zapata Montoya | Doméstico | Sin concesión | FSN (nacimiento) | El Llano |
| No Concesionado | María Consuelo Londoño | Doméstico | Sin concesión | FSN (nacimiento) | El Llano |
| No Concesionado | Omar Cano Enríquez | Doméstico | Sin concesión | FSN (nacimiento) | El Llano |
| No Concesionado | Blanca Inés Soto Atehortúa | Doméstico | Sin concesión | FSN (nacimiento) | El Llano |
| No Concesionado | Blanca Inés Soto Atehortúa | Doméstico | Sin concesión | FSN (nacimiento) | El Llano |
| No Concesionado | Alba Mery Soto Atehortúa | Doméstico | Sin concesión | FSN (nacimiento) | El Llano |
| No Concesionado | María Cenovia Grajales | Doméstico | Sin concesión | FSN (nacimiento) | El Llano |
| No Concesionado | Olga Álvarez | Doméstico | Sin concesión | FSN (nacimiento) | El Llano |

| Grupo de usuario | Nombre de usuario | Uso del agua | Caudal concesionado (L/s) | Fuente | Vereda |
|---|---|---|---|---|---|
| No Concesionado | María Victoria Londoño | Doméstico | Sin concesión | FSN (nacimiento) | El Llano |
| No Concesionado | Mary Luz Marulanda Botero | Doméstico | Sin concesión | FSN (nacimiento) | El Llano |
| No Concesionado | Juan Carlos Ramírez Osorio | Doméstico | Sin concesión | FSN (nacimiento) | El Llano |
| No Concesionado | Luz Elena Moreno Velásquez | Doméstico | Sin concesión | FSN (nacimiento) | El Llano |
| No Concesionado | Alejandra Londoño | Doméstico | Sin concesión | FSN (nacimiento) | El Llano |
| No Concesionado | Diego Fernando Carbajal Ríos | Doméstico | Sin concesión | FSN (nacimiento) | El Llano |
| No Concesionado | Fabio Vallejo | Doméstico | Sin concesión | FSN (nacimiento) | El Llano |
| No Concesionado | Gladis Mercedes Hincapié Hernández | Doméstico | Sin concesión | FSN (nacimiento) | El Llano |
| No Concesionado | Luis Fernando Hincapié Hincapié | Doméstico | Sin concesión | FSN (nacimiento) | El Llano |
| No Concesionado | María Anatulia Marín Sánchez | Doméstico | Sin concesión | FSN | El Llano |
| No Concesionado | Juan David Cano Rico | Doméstico | Sin concesión | FSN | El Llano |
| No Concesionado | Ángela Sánchez Alarcón | Doméstico | Sin concesión | FSN | El Llano |
| No Concesionado | Silvia Gallego Hincapié | Doméstico | Sin concesión | FSN | El Llano |
| No Concesionado | Beatriz Elena Echeverry Echeverry | Doméstico | Sin concesión | FSN | El Llano |
| No Concesionado | María Socorro Vásquez David | Doméstico | Sin concesión | FSN (nacimiento) | El Llano |
| No Concesionado | Juan David Zapata Arroyabe | Doméstico | Sin concesión | FSN (nacimiento) | El Llano |
| No Concesionado | Ana Veiba Ríos Soto | Doméstico | Sin concesión | FSN | El Llano |
| No Concesionado | Miriam Carvajal Carvajal | Doméstico | Sin concesión | FSN | El Llano |
| No Concesionado | Gloria María Soto Atehortúa | Doméstico | Sin concesión | FSN | El Llano |
| No Concesionado | Alba Nelly Soto Atehortúa | Doméstico | Sin concesión | FSN | El Llano |
| No Concesionado | Fabián Soto Soto | Doméstico | Sin concesión | FSN | El Llano |
| No Concesionado | Ana Isabel Soto Atehortúa | Doméstico | Sin concesión | FSN | El Llano |

| Grupo de usuario | Nombre de usuario | Uso del agua | Caudal concesionado (L/s) | Fuente | Vereda |
|---|---|---|---|---|---|
| No Concesionado | Ángela María Zapata Atehortúa | Doméstico | Sin concesión | FSN (nacimiento) | El Llano |
| No Concesionado | María Consuelo Patiño | Doméstico | Sin concesión | FSN (nacimiento) | El Llano |
| No Concesionado | Ángela Álzate | Doméstico | Sin concesión | FSN (nacimiento) | El Llano |
| No Concesionado | Luz Mery Franco Puerta | Doméstico | Sin concesión | FSN (nacimiento) | El Llano |
| No Concesionado | María Consuelo Londoño | Doméstico | Sin concesión | FSN (nacimiento) | El Llano |
| No Concesionado | Olga Isabel Gómez Patiño | Doméstico | Sin concesión | FSN | El Llano |
| No Concesionado | Mercedes Villada | Doméstico | Sin concesión | FSN | El Llano |
| No Concesionado | Rosa Angélica Concha | Doméstico | Sin concesión | FSN | El Llano |
| No Concesionado | Nicolás Villada García | Doméstico | Sin concesión | FSN | El Llano |
| No Concesionado | Nicolás Villada García | Doméstico | Sin concesión | FSN | El Llano |
| No Concesionado | Mauricio Jaramillo Velásquez | Doméstico | Sin concesión | FSN | El Llano |

Fuente: Consorcio Siga-Plyma

#### 3.2.6.4.1 Análisis de resultados

En el área de influencia directa local del proyecto, se tiene que el 62,44% de los predios existentes en esta área, destinan el agua obtenida bien sea proveniente de sistemas de acueducto legalmente constituidos (según Ley 142 de 1994) o de captaciones propias dispuestas bien sea en quebrada o nacimiento para uso doméstico. Es importante aclarar, que al tratarse de una zona netamente rural, el total del agua consumida por un usuario tiene diversos usos entre éstos: actividades productivas a pequeña escala que se realizan generalmente en el propio predio de vivienda familiar, los cuales se aprovechan para la crianza de animales, huertas, pequeños cultivos y actividades micro-empresariales, situación que a pesar de ser prohibida por la normativa técnica RAS 2000 y la ley de servicios públicos domiciliarios 142 de 1994, prohíbe el uso del agua para actividades de subsistencia, porque los sistemas están diseñados para cierta cantidad de agua y podrían colapsar, aunque el uso comercial sí está permitido, esta situación se presenta de manera habitual por ser un estilo de vida propio de la zona de estudio.

En el área de influencia directa local, el 6,75% de los predios requieren del consumo de agua para el desarrollo de las actividades productivas, principalmente las agrícolas y acuícolas, las cuales son consideradas como producción a gran escala. Es importante determinar, qué porción de estas aguas consumidas en este tipo de actividades, son provenientes de sistemas de acueducto con tratamiento, puesto que la Ley 373 de 1997 programa para el uso eficiente y ahorro del agua, establece en su artículo 7 “Es deber de la Comisión Reguladora de Agua Potable y Saneamiento Básico de las Corporaciones Autónomas Regionales y demás autoridades ambientales, de acuerdo

con sus competencias, establecer consumos básicos en función de los usos del agua, desincentivar los consumos máximos de cada usuario y establecer los procedimientos, las tarifas y las medidas a tomar para aquellos consumidores que sobrepasen el consumo máximo fijado", todo ello en busca de un control y manejo racional para el uso de agua sobre todo en actividades diferentes a las domésticas, es decir, la satisfacción de las necesidades básicas de cualquier persona.

De otro lado el 3,33% de los predios en la zona de influencia directa local, desarrollan actividades de tipo pecuario y por consiguiente, se hace necesario revisar qué porción de este fluido es de tipo potable. Mientras que el 1,87% de los predios usan el agua captada en la zona para actividades de tipo industrial y un 0,81% registran usos del agua para actividades institucionales.

De acuerdo con los usos del agua identificados, la zona de estudio presenta una clasificación acorde con las características típicas, igualmente es de mencionar, que la existencia de fuentes hídricas en la zona, ha permitido asentamientos y consumos de agua para actividades diferentes a la doméstica. Ahora bien, según los cálculos generados en cuanto a la dotación neta se refiere, se ha encontrado que el consumo de agua proveniente de los sistemas de acueducto (Yarumaguas, Multiveredal Santa Elena, San Pedro, Las Flores, Conhydra, Aguas del Mirador, ASUASI y La Cascada) está incluso por debajo del valor mínimo establecido por la Resolución 2320 de 2009 (90 L/hab-día nivel bajo y 115 L/hab-día nivel medio), indicando que gran parte de la demanda para labores domésticas que no implican consumo humano y de tipo agrícola, son mediante captaciones artesanales en fuentes de agua como quebradas y/o nacimientos ubicados bien sea en el mismo predio o en inmediaciones a éste, lo que limita en gran medida la obtención de un dato real respecto a la cantidad de agua consumida al día, dado que no existen medidores que regulen el consumo de estas conexiones de agua cruda. Este tipo de captaciones artesanales, con o sin concesión, no tienen control en el consumo del agua, dado que no se dispone de medidores.

En términos generales se puede decir, que la calidad de las aguas determinadas a partir de los muestreos efectuados, cumplen con las disposiciones del capítulo IV del Decreto 1594 del 26 de junio de 1984, en cuanto a los criterios de calidad para destinación del recurso.

#### 3.2.6.4.2 Usuarios del agua en el AID local diagnóstico actual

A continuación se registra el estado actual de los sistemas de acueducto localizados en el AID local (Yarumaguas, Multiveredal Santa Elena, San Pedro, Media Luna, Las Flores, Conhydra, ARSA, Aguas del Mirador, ASUASI, El Progreso y Circuito La Cascada), análisis realizados a partir de los cálculos y proyecciones de dotaciones, demandas y caudales contenidos en el Anexo 3-24.

##### *3.2.6.4.2.1 Sistema de acueducto Cooperativa Yarumal de Aguas Ltda. "Yarumaguas"*

Según los cálculos y proyecciones en el Anexo 3-24, El sistema de acueducto Yarumaguas es un sistema legalmente constituido, cuenta con estructuras de captación, desarenador, planta de tratamiento compacta que incluye procesos convencionales y redes de distribución y aducción. A simple vista y según conversaciones sostenidas con el personal del área técnica, este conjunto de componentes se encuentran en condiciones adecuadas tanto estructurales como hidráulicas. Respecto al abastecimiento y presiones del servicio, se conoció que la fuente de abastecimiento La Floresta no presenta problemas de desabastecimiento, solo en algunas épocas de verano muy marcados, se ha hecho necesario recurrir a la fuente de abastecimiento alterna El Pasivo para compensar el déficit de caudal disponible.

Según información secundaria proporcionada por el área administrativa del sistema de acueducto, se determinó que según condiciones actuales, los usuarios registran una dotación neta igual a 66,18 L/hab-día la cual es menor a la dotación neta establecida por la Resolución 2320 de 2009 para un nivel de complejidad bajo siendo ésta equivalente a 90 L/hab-día. Se registra también según información proporcionada un porcentaje de pérdidas igual al 34%, estando éste por encima del valor máximo permitido por la norma para cualquier nivel de complejidad, lo que permite inferir que se hace prioritario la puesta en marcha de un plan de reducción de pérdidas tanto técnicas como comerciales, el cual involucre en primera instancia, la inclusión y adecuación de todos los equipos de medida a nivel macro y micro.

En términos de demanda del recurso agua para las condiciones actuales, la cantidad de caudal demandado por la población (QMD+15%) es menor a las cantidades de caudal concesionado y otorgado por las fuentes en condiciones críticas, valor último referenciado por la CAR correspondiente (CORNARE). Sin embargo, es importante resaltar, que actualmente solo se está haciendo uso del caudal otorgado por la fuente de abastecimiento La Floresta, quedando la quebrada El Pasivo como una fuente alterna para épocas de estiaje.

No se realiza un diagnóstico más detallado de los componentes del sistema de acueducto (desarenador, redes de aducción y conducción, planta de tratamiento, tanque de almacenamiento y redes de distribución) como implementación de modelaciones hidráulicas y de capacidad, debido a que este informe de diagnóstico se relaciona directamente con la oferta hídrica de las fuentes de abastecimiento respecto al caudal demandado y concesionado, y no con el funcionamiento técnico e hidráulico del sistema de acueducto.

#### *3.2.6.4.2.2 Sistema de acueducto Corporación Acueducto Multiveredal Santa Elena*

Según los cálculos y proyecciones en el Anexo 3-24, el sistema de acueducto Santa Elena es un sistema legalmente constituido, cuenta con estructuras de captación, desarenador, planta de tratamiento compacta que incluye procesos convencionales, redes de distribución y aducción y sistema de bombeo que permite ingresar las aguas al tratamiento. A simple vista y según conversaciones sostenidas con el personal del área técnica, este conjunto de componentes se encuentran en condiciones adecuadas tanto estructurales como hidráulicas. Respecto al abastecimiento y presiones de servicio, se conoció que la fuente de abastecimiento la quebrada Santa Elena no presenta problemas de desabastecimiento, solo en algunas épocas de verano marcados se ha visto muy disminuido el caudal, pero no hasta el punto de generar racionamientos.

Según información secundaria proporcionada por el área administrativa del sistema de acueducto se determinó que existen 1034 usuarios de tipo residencial y 4 grandes consumidores. De acuerdo con los registros de micromedición, se determinó que según condiciones actuales los usuarios registran una dotación neta residencial igual a 95,53 L/hab-día, la cual es menor a la dotación neta establecida por la Resolución 2320 de 2009 para un nivel de complejidad medio, equivalente a 115 L/hab-día, mientras que los grandes consumidores registran un consumo promedio igual a 25.900 l/usuario-día. Se registra también según información proporcionada un porcentaje de pérdidas igual al 19,96%, estando por debajo del valor máximo permitido por la norma para cualquier nivel de complejidad, lo que permite inferir que se cuenta con un sistema en óptimas condiciones técnicas.

En términos de demanda del recurso agua para las condiciones actuales, la cantidad de caudal demandado por la población (QMD+15%) es mayor a la cantidad de caudal concesionado para la fuente quebrada Santa Elena, por lo tanto se puede determinar que el sistema de acueducto está captando una cantidad mayor a la concesionada, haciendo que sea obligatorio por parte de la Corporación Acueducto Multiveredal Santa Elena solicitar un aumento respecto al caudal concesionado, o en su defecto buscar una fuente alterna para solicitar concesión y poder suplir así la demanda actual y al período de análisis (20 años).

No se realiza un diagnóstico más detallado de los componentes del sistema de acueducto (desarenador, redes de aducción y conducción, planta de tratamiento, tanque de almacenamiento, sistema de bombeo y redes de distribución) como implementación de modelaciones hidráulicas y de capacidad, debido a que este informe de diagnóstico se relaciona directamente con la oferta hídrica de las fuentes de abastecimiento respecto al caudal demandado y concesionado, y no con el funcionamiento técnico e hidráulico del sistema de acueducto.

#### *3.2.6.4.2.3 Sistema de acueducto Corporación de Acueducto de San Pedro*

Según los cálculos y proyecciones en el Anexo 3-24, el sistema de acueducto San Pedro es un sistema legalmente constituido, cuenta con estructuras de captación, desarenador, planta de tratamiento de filtración lenta, sistema de bombeo en agua cruda y tratada y redes de distribución. A simple vista y según conversaciones sostenidas con el personal del área técnica, este conjunto de componentes se encuentran en condiciones adecuadas tanto estructurales como hidráulicas, respecto al abastecimiento y presiones de servicio.

Se conoció que la fuente de abastecimiento quebrada San Pedro presenta problemas de desabastecimiento en épocas de veranos prolongados (estiaje), las cuales en su mayoría, coinciden con los dos períodos de vacaciones del año, donde se incrementa de manera excesiva la demanda de caudal y se genera por ende, un desequilibrio del sistema, obligando este suceso a realizar racionamientos y reducción de los tiempos de bombeo que permitan compensar los niveles tanto en el sistema como en la fuente abastecedora, y reducir por consiguiente, los altos gastos que conllevan estas demandas excesivas al sistema de acueducto.

Según información secundaria proporcionada por el área administrativa del sistema de acueducto, se determinó que según condiciones actuales los usuarios registran una dotación neta igual a 67,88 L/hab-día la cual es menor a la dotación neta establecida por la Resolución 2320 de 2009 para un nivel de complejidad medio, equivalente a 115 L/hab-día. Se registra también según información proporcionada un porcentaje de pérdidas igual al 28,71%, estando por encima del valor máximo permitido por la norma para cualquier nivel de complejidad, lo que permite inferir que se hace prioritario la puesta en marcha de un plan de reducción de pérdidas tanto técnicas como comerciales.

En términos de demanda del recurso agua para las condiciones actuales, la cantidad de caudal demandado por la población (QMD+15%) es mayor a la cantidad de caudal concesionado para la fuente quebrada San Pedro, por lo tanto se puede determinar que el sistema de acueducto está captando una cantidad mayor a la concesionada, haciendo esto que sea obligatorio por parte de la Corporación Acueducto San Pedro solicitar un aumento respecto al caudal concesionado, o en su defecto, buscar una fuente alterna para solicitar concesión y poder suplir así la demanda actual y al período de análisis (20 años). Lo antes mencionado también permite inferir, que en los dos períodos de vacaciones, se incrementa también de manera excesiva la cantidad de caudal captado

por fuera de la cantidad concesionada, al punto de llegar a la toma de acciones como racionamiento para lograr una recuperación general del sistema.

No se realiza un diagnóstico más detallado de los componentes del sistema de acueducto (desarenador, redes de aducción y conducción, planta de tratamiento, tanque de almacenamiento, sistema de bombeo y redes de distribución) como implementación de modelaciones hidráulicas y de capacidad, debido a que este informe de diagnóstico se relaciona directamente con la oferta hídrica de las fuentes de abastecimiento respecto al caudal demandado y concesionado, y no con el funcionamiento técnico e hidráulico del sistema de acueducto.

#### *3.2.6.4.2.4 Sistema de acueducto Corporación Acueducto Media Luna*

Según los cálculos y proyecciones en el Anexo 3-24, el sistema de acueducto Media Luna es un sistema legalmente constituido, cuenta con estructuras de captación, desarenador, planta de tratamiento y redes de distribución. A simple vista y según conversaciones sostenidas con el personal del área técnica, este conjunto de componentes se encuentran en condiciones adecuadas tanto estructurales como hidráulicas, respecto al abastecimiento y presiones de servicio.

Se conoció que la fuente de abastecimiento quebrada Santa Bárbara presenta problemas respecto a su cantidad de recurso agua disponible en el punto de captación, ya que aproximadamente 100 m aguas arriba de éste se genera el desvío del cuerpo de agua por parte de la Urbanización Mirador de Santa Elena, que toma prácticamente la totalidad del agua disponible para la creación de una cascada artificial sobre una peña que permite la formación de un embalse con proliferación de truchas, vertiendo los excesos de este sistema de nuevo al cuerpo de agua pero aproximadamente 250 m aguas abajo del punto de captación del sistema de acueducto Media Luna.

Figura 3-253 - Descarga de excesos 250 m aguas abajo del punto de captación Acueducto Media Luna.

Según información secundaria proporcionada por el área administrativa del sistema de acueducto, se determinó que según condiciones actuales los usuarios registran una dotación neta igual a 128,70 L/hab-día la cual es mayor a la dotación neta establecida por la Resolución 2320 de 2009 para un nivel de complejidad bajo equivalente a 90 L/hab-día. Se registra también según información proporcionada un porcentaje de pérdidas igual al 60,00%, encontrándose por encima

del valor máximo permitido por la norma para cualquier nivel de complejidad, lo que permite inferir que se hace prioritario la puesta en marcha de un plan de reducción de pérdidas tanto técnicas como comerciales.

Se encontró dentro del proceso de recolección primaria y secundaria, que el sistema de acueducto Media Luna, registra índices de pérdidas muy elevados que son generadas según la información suministrada por el área administrativa, debido a las múltiples conexiones fraudulentas que se registran en la red de distribución, haciendo que el sistema deje de ser autosostenible y que los niveles de agua demandada sean muy elevados respecto a lo que refleja la medición individual.

En términos de demanda del recurso agua para las condiciones actuales, la cantidad de caudal demandado por la población (QMD+15%) es mayor a la cantidad de caudal concesionado para la fuente quebrada Santa Bárbara, por lo tanto se puede determinar que el sistema de acueducto está captando una cantidad mayor a la concesionada, indicando que sea de carácter obligatorio, por parte del Sistema de Acueducto Media Luna, solicitar un aumento respecto al caudal concesionado, o en su defecto buscar una fuente alterna para solicitar concesión y poder suplir así la demanda actual y al período de análisis.

No se realiza un diagnóstico más detallado de los componentes del sistema de acueducto (desarenador, redes de aducción y conducción, planta de tratamiento, tanque de almacenamiento, sistema de bombeo y redes de distribución) como implementación de modelaciones hidráulicas y de capacidad, debido a que este informe de diagnóstico se relaciona directamente con la oferta hídrica de las fuentes de abastecimiento respecto al caudal demandado y concesionado, y no con el funcionamiento técnico e hidráulico del sistema de acueducto.

#### *3.2.6.4.2.5 Sistema de acueducto Corporación de Asociados del Acueducto Las Flores*

Según los cálculos y proyecciones en el Anexo 3-24, el sistema de acueducto Las Flores es un sistema legalmente constituido, cuenta con estructuras de un embalse artificial en el que se llevan a cabo los procesos de captación y desarenación, planta de tratamiento de filtración lenta, sistema de bombeo en agua cruda y redes de distribución. A simple vista y según conversaciones sostenidas con el personal del área técnica, este conjunto de componentes se encuentran en condiciones adecuadas tanto estructurales como hidráulicas, respecto al abastecimiento y presiones de servicio.

Se conoció que aparte de la fuente de abastecimiento quebrada Chiqueros, que se encarga de recargar el embalse artificial, se está contando actualmente con el aporte de otras fuentes y arroyos menores que también son conducidos para mejorar los niveles en el embalse y aumentar así la disponibilidad del recurso agua.

Actualmente el sistema de acueducto no cuenta con concesión de aguas vigente, puesto que el último permiso de captación otorgado por CORANTIOQUIA fue en diciembre del año 2006 por un período igual a 5 años, según el área administrativa del sistema de acueducto Las Flores, la renovación se encuentra en trámite pero a la fecha no se ha obtenido respuesta alguna.

Según información secundaria proporcionada por el área administrativa del sistema de acueducto, se determinó que según condiciones actuales, los usuarios registran una dotación neta igual a 79,43 L/hab-día la cual es menor a la dotación neta establecida por la Resolución 2320 de 2009 para un nivel de complejidad bajo equivalente a 90 L/hab-día. Se registra también según información proporcionada un porcentaje de pérdidas igual al 37,29%, estando por encima del

valor máximo permitido por la norma para cualquier nivel de complejidad, lo que permite inferir que se hace prioritario la puesta en marcha de un plan de reducción de pérdidas tanto técnicas como comerciales.

En términos de demanda del recurso agua para las condiciones actuales y en caso que este análisis se desarrollara en función de una concesión vigente con el mismo caudal otorgado en el permiso que se encuentra vencido, se tiene que la cantidad de caudal demandado por la población (QMD+15%) es mayor a la cantidad de caudal concesionado para la fuente quebrada Chiqueros, por lo tanto se puede determinar que el sistema de acueducto estaría captando una cantidad mayor a la concesionada, propiciando que sea de carácter obligatorio por parte de la Corporación de Asociados del Acueducto Las Flores, solicitar un aumento respecto al caudal concesionado, o en su defecto buscar una fuente alterna para solicitar concesión y poder suplir así la demanda actual y al período de análisis. Sin embargo, en las condiciones actuales que no se cuenta con concesión ni permiso transitorio para la toma de caudales en la fuente Chiqueros ni en otras de las fuentes que abastecen el embalse artificial, se puede establecer que es prioritario agilizar este proceso de concesión ante la CAR con un aumento de caudal respecto al concesionado en el año 2006 mediante resolución 130-5608 del 15 de diciembre.

No se realiza un diagnóstico más detallado de los componentes del sistema de acueducto (captación, planta de tratamiento, tanque de almacenamiento, sistema de bombeo y redes de distribución) como implementación de modelaciones hidráulicas y de capacidad, debido a que este informe de diagnóstico se relaciona directamente con la oferta hídrica de las fuentes de abastecimiento respecto al caudal demandado y concesionado, y no con el funcionamiento técnico e hidráulico del sistema de acueducto.

#### *3.2.6.4.2.6 Sistema de acueducto Conhydra para La Sociedad Operadora de Aeropuertos Centro Norte S.A. "Airplan S.A."*

Según los cálculos y proyecciones en el Anexo 3-24, el sistema de acueducto Conhydra es un sistema legalmente constituido, cuenta con estructuras de captación, desarenador, planta de tratamiento convencional en concreto reforzado y redes de distribución. A simple vista y según conversaciones sostenidas con el personal del área técnica, este conjunto de componentes se encuentran en condiciones adecuadas tanto estructurales como hidráulicas, respecto al abastecimiento y presiones de servicio.

Según información secundaria proporcionada por el área administrativa del sistema de acueducto, se determinó que según condiciones actuales, los usuarios registran una dotación neta igual a 22,27 L/hab-día la cual es menor a la dotación neta establecida por la Resolución 2320 de 2009 para un nivel de complejidad medio alto, situación normal ante el hecho que prácticamente el 100% de la población que manejan los dos usuarios es flotante. Se registra también según información proporcionada un porcentaje de pérdidas igual al 6,01%, estando por debajo del valor máximo permitido por la norma para cualquier nivel de complejidad, lo que permite inferir que se cuenta con un sistema de tratamiento en óptimas condiciones técnicas.

En términos de demanda del recurso agua para las condiciones actuales, la cantidad de caudal demandado por la población (QMD+15%) es menor a las cantidades de caudal concesionado y otorgado por las fuentes en condiciones críticas, valor último referenciado por la CAR correspondiente (CORNARE).

No se realiza un diagnóstico más detallado de los componentes del sistema de acueducto (desarenador, redes de aducción y conducción, planta de tratamiento, tanque de almacenamiento, sistema de bombeo y redes de distribución) como implementación de modelaciones hidráulicas y de capacidad, debido a que este informe de diagnóstico se relaciona directamente con la oferta hídrica de las fuentes de abastecimiento respecto al caudal demandado y concesionado, y no con el funcionamiento técnico e hidráulico del sistema de acueducto.

#### *3.2.6.4.2.7 Sistema de acueducto Asociación de Usuarios del Acueducto Sajonia - Alto Vallejo (ARSA)*

Según los cálculos y proyecciones en el Anexo 3-24, el sistema de acueducto ARSA es un sistema legalmente constituido, cuenta con estructuras de captación, desarenador, planta de tratamiento compacta que incluye procesos convencionales, tanque de almacenamiento y redes de distribución. A simple vista y según conversaciones sostenidas con el personal del área técnica, este conjunto de componentes se encuentran en condiciones adecuadas tanto estructurales como hidráulicas. Respecto al abastecimiento y presiones de servicio, se conoció que la fuente de abastecimiento la quebrada Yarumal no presenta problemas de suministro, solo en algunas épocas de marcados veranos, se ha visto muy disminuido el caudal, pero no hasta el punto de generar racionamientos.

Según información secundaria proporcionada por el área administrativa del sistema de acueducto se determinó que existe un total de 804 usuarios distribuidos en 495 usuarios domésticos o residenciales, 304 usuarios comerciales y 5 grandes consumidores. De acuerdo con los registros de micromedición se determinó que según condiciones actuales los usuarios registran una dotación neta residencial igual a 121,91 L/hab-día la cual es mayor a la dotación neta establecida por la Resolución 2320 de 2009 para un nivel de complejidad medio, equivalente a 115 L/hab-día, para la dotación neta por consumo comercial se determinó igual a 130,70 L/hab-día, mientras que los grandes consumidores registran un consumo promedio igual a 60.960 l/usuario-día. Se registra también según información proporcionada un porcentaje de pérdidas igual al 7,30%, estando por debajo del valor máximo permitido por la norma para cualquier nivel de complejidad, lo que permite inferir que se cuenta con un sistema en óptimas condiciones técnicas.

En términos de demanda del recurso agua para las condiciones actuales la cantidad de caudal demandado por la población (QMD+15%) es menor a la cantidad de caudal concesionado para la fuente quebrada Yarumal, pero según las proyecciones se determina que para el año próximo (2014) se estaría captando una cantidad mayor a la concesionada, propiciando que sea obligatorio por parte de La Asociación de Usuarios del Acueducto Sajonia - Alto Vallejo (ARSA) solicitar un aumento respecto al caudal concesionado, o en su defecto buscar una fuente alterna para solicitar concesión y poder suplir así la demanda actual y al período de análisis.

No se realiza un diagnóstico más detallado de los componentes del sistema de acueducto (desarenador, redes de aducción y conducción, planta de tratamiento, tanque de almacenamiento, sistema de bombeo y redes de distribución) como implementación de modelaciones hidráulicas y de capacidad, debido a que este informe de diagnóstico se relaciona directamente con la oferta hídrica de las fuentes de abastecimiento respecto al caudal demandado y concesionado, y no con el funcionamiento técnico e hidráulico del sistema de acueducto.

#### *3.2.6.4.2.8 Sistema de acueducto Asociación Acueducto Aguas del Mirador*

Según los cálculos y proyecciones en el Anexo 3-24, el sistema de acueducto Aguas del Mirador es un sistema legalmente constituido, cuenta con estructuras de captación, desarenador, planta de tratamiento compacta con procesos convencionales, tanque de almacenamiento y redes de distribución. A simple vista y según conversaciones sostenidas con el personal del área técnica, este conjunto de componentes se encuentran en condiciones adecuadas tanto estructurales como hidráulicas, respecto al abastecimiento y presiones de servicio.

Según información secundaria proporcionada por el área administrativa del sistema de acueducto, se determinó que según condiciones actuales los usuarios registran una dotación neta igual a 87,10 L/hab-día la cual es menor a la dotación neta establecida por la Resolución 2320 de 2009 para un nivel de complejidad bajo equivalente a 90 L/hab-día. Se registra también según información proporcionada un porcentaje de pérdidas igual al 6,73%, estando por debajo del valor máximo permitido por la norma para cualquier nivel de complejidad, lo que permite inferir que se cuenta con un sistema de acueducto en óptimas condiciones técnicas.

En términos de demanda del recurso agua para las condiciones actuales la cantidad de caudal demandado por la población (QMD+15%) es mayor a la cantidad de caudal concesionado por la Corporación Autónoma Regional para las fuentes Los Parra y Los Atehortúa, por lo tanto se puede determinar que el sistema de acueducto está captando una cantidad mayor a la concesionada, propiciando que sea obligatorio por parte de la Asociación Acueducto Aguas del Mirador, solicitar un aumento respecto al caudal concesionado en alguna de las fuentes, o en su defecto buscar una fuente alterna para solicitar concesión y poder suplir así la demanda actual y al período de análisis.

No se realiza un diagnóstico más detallado de los componentes del sistema de acueducto (captación, desarenador, planta de tratamiento, tanque de almacenamiento y redes de distribución) como implementación de modelaciones hidráulicas y de capacidad, debido a que este informe de diagnóstico se relaciona directamente con la oferta hídrica de las fuentes de abastecimiento respecto al caudal demandado y concesionado, y no con el funcionamiento técnico e hidráulico del sistema de acueducto.

#### *3.2.6.4.2.9 Sistema de acueducto Asociación de Usuarios del Acueducto de San Ignacio A.S.U.A.S.I.*

Según los cálculos y proyecciones en el Anexo 3-24, el sistema de acueducto ASUASI es un sistema legalmente constituido, cuenta con tres estructuras de captación, desarenador, planta de tratamiento de filtración rápida, sistema de bombeo en agua cruda y tratada y redes de distribución. A simple vista y según conversaciones sostenidas con el personal del área técnica, este conjunto de componentes se encuentran en condiciones adecuadas tanto estructurales como hidráulicas, respecto al abastecimiento y presiones de servicio.

Se conoció que para las fuentes de abastecimiento quebradas La Negra 1 y La Negra 2 actualmente no se está conservando caudal ecológico alguno, es decir, las estructuras de captación están tomando el 100% de los dos afluentes, mientras que para la quebrada La Mina no se está efectuando captación alguna, debido a que la cantidad de caudal demandado por la población está siendo suplido con las dos primeras tomas mencionadas.

Según información secundaria proporcionada por el área administrativa del sistema de acueducto, se determinó que según condiciones actuales los usuarios registran una dotación neta igual a

20,50 L/hab-día la cual es mucho menor a la dotación neta establecida por la Resolución 2320 de 2009 para un nivel de complejidad medio equivalente a 115 L/hab-día, situación que está enmarcada en el hecho que las necesidades que no requieren consumo humano, están siendo suplidas mediante conexión a nacimientos que no incluyen costos de tipo económico. Se registra también según información proporcionada un porcentaje de pérdidas igual al 32,43%, estando por encima del valor máximo permitido por la norma para cualquier nivel de complejidad, lo que permite inferir que se hace prioritario la puesta en marcha de un plan de reducción de pérdidas tanto técnicas como comerciales.

En términos de demanda del recurso agua para las condiciones enmarcadas desde el año de proyección uno (01) la cantidad de caudal demandado por la población (QMD+15%) es mayor a la cantidad de caudal concesionado para las fuentes de abastecimiento (quebradas La Negra 1, La Negra 2 y La Mina), todo esto en función de consumos acordes a la normativa vigente y tomando condiciones de abastecimiento sin uso de nacimientos, siendo esta la condición más desfavorable para la demanda del recurso de agua, lo cual permite determinar que el sistema de acueducto estaría captando una cantidad mayor a la concesionada, propiciando que sea obligatorio por parte de La Asociación de Usuarios del Acueducto de San Ignacio ASUASI, solicitar un aumento respecto al caudal concesionado, o en su defecto buscar una fuente alterna para solicitar concesión y poder suplir así la demanda para cada uno de los años que incluye el período de análisis. Igualmente se hace importante mencionar que estos cálculos están en función solo de la cantidad de caudal concesionado por la CAR correspondiente (CORANTIOQUIA), donde se respeta el porcentaje de caudal ecológico determinado en el documento de concesión oficial.

No se realiza un diagnóstico más detallado de los componentes del sistema de acueducto (desarenador, redes de aducción y conducción, planta de tratamiento, tanque de almacenamiento, sistema de bombeo y redes de distribución) como implementación de modelaciones hidráulicas y de capacidad, debido a que este informe de diagnóstico se relaciona directamente con la oferta hídrica de las fuentes de abastecimiento respecto al caudal demandado y concesionado, y no con el funcionamiento técnico e hidráulico del sistema de acueducto.

#### *3.2.6.4.2.10 Sistema de Acueducto El Progreso*

Según los cálculos y proyecciones en el Anexo 3-24, el sistema de acueducto El Progreso es un sistema legalmente constituido, cuenta con estructuras de captación, planta de tratamiento de agua potable, tanque de almacenamiento y redes de distribución. En términos generales y desde un punto de vista técnico, se puede determinar que este sistema de acueducto en cuanto a su infraestructura técnica está dentro de los lineamientos que establece la norma RAS 2000. Igualmente se hace importante resaltar, que este sistema fue construido en marco del desarrollo del plan de saneamiento y agua potable Plan Carrasquilla, por lo cual se infiere que este sistema cuenta con la infraestructura apropiada para ser un sistema en óptimas condiciones tanto técnicas como de calidad.

Como no se cuenta con información secundaria que permita determinar dotaciones y porcentaje de pérdidas que reflejen las condiciones actuales debido a la ausencia de registro de medidas a nivel macro y micro, se determinó que las condiciones actuales serían modeladas con los valores establecidos por la Resolución 2320 de 2009 para un nivel de complejidad bajo siendo la dotación neta equivalente a 90 L/hab-día y el porcentaje de pérdidas igual al 25%.

En términos de demanda del recurso agua para las condiciones actuales la cantidad de caudal demandado por la población (QMD+15%) es menor a la cantidad de caudal concesionado por la Corporación Autónoma Regional para la fuente quebrada La Quiebra.

No se realiza un diagnóstico más detallado de los componentes del sistema de acueducto (captación, tanque de almacenamiento y redes de distribución) como implementación de modelaciones hidráulicas y de capacidad, debido a que este informe de diagnóstico se relaciona directamente con la oferta hídrica de las fuentes de abastecimiento respecto al caudal demandado y concesionado, y no con el funcionamiento técnico e hidráulico del sistema de acueducto.

#### *3.2.6.4.2.11 Circuito de acueducto La Cascada (EPM)*

Según los cálculos y proyecciones en el Anexo 3-24, el circuito de acueducto La Cascada hace parte integral de las 10 plantas de potabilización con las que cuenta EPM en el Valle de Aburrá, este circuito cuenta con estructura de captación, desarenador, planta de tratamiento convencional y redes de distribución. A simple vista y según conversaciones sostenidas con el personal del área técnica, este conjunto de componentes se encuentran en condiciones adecuadas tanto estructurales como hidráulicas, respecto al abastecimiento y presiones de servicio.

Según información secundaria proporcionada por el área administrativa del sistema de acueducto, se determinó que según condiciones actuales los usuarios registran una dotación neta igual a 76,15 L/hab-día la cual es menor a la dotación neta establecida por la Resolución 2320 de 2009 para un nivel de complejidad medio alto equivalente a 125 L/hab-día. Se registra también según información proporcionada un porcentaje de pérdidas igual al 64,55%, estando por encima del valor máximo permitido por la norma para cualquier nivel de complejidad, lo que permite inferir que se hace prioritario la puesta en marcha de un plan de reducción de pérdidas tanto técnicas como comerciales.

En términos de demanda del recurso agua para las condiciones actuales la cantidad de caudal demandado por la población (QMD+15%) es menor a la cantidad de caudal concesionado para la fuente quebrada Santa Elena, por lo tanto se puede determinar que el sistema de acueducto está captando en función de las disposiciones entregadas por la CAR.

No se realiza un diagnóstico más detallado de los componentes del sistema de acueducto (desarenador, redes de aducción y conducción, planta de tratamiento, tanque de almacenamiento, sistema de bombeo y redes de distribución) como implementación de modelaciones hidráulicas y de capacidad, debido a que este informe de diagnóstico se relaciona directamente con la oferta hídrica de las fuentes de abastecimiento respecto al caudal demandado y concesionado, y no con el funcionamiento técnico e hidráulico del sistema de acueducto.

Comparando la cantidad de agua demanda por la población con la concesionada por las CAR en el AID local, se tiene para los sistemas de acueducto Multiveredal Santa Elena, San Pedro, Media Luna, Las Flores, Aguas del Mirador y ASUASI, que la cantidad de caudal demandado por los usuarios es mayor a la cantidad de caudal otorgado por la CAR, restando de manera considerable el caudal ecológico que toda fuente debe preservar y ejerciéndose entonces una presión sobre el recurso agua mayor a la que las corporaciones determinaron según estudios para otorgamiento de concesiones.

Al comparar la cantidad de caudal demandado con la cantidad de caudal medio que es capaz de ofrecer la fuente de abastecimiento, se tiene que para las condiciones actuales de estudio, solo el

sistema de acueducto ASUASI presenta desabastecimiento respecto al caudal medio capaz de ofrecer las tres fuentes de abastecimiento (La Mina, La Negra 1 y La Negra 2), en caso de contarse con consumos de caudal iguales o cercanos a la dotación neta según norma RAS 2000 (115 L/hab-día), es decir, en caso que se disminuyan las conexiones a fuentes de agua superficial que permitan suplir las necesidades que normalmente no implican consumo humano.

Sin embargo, según las condiciones observadas en campo es importante tener en cuenta, que para los sistemas de acueducto San Pedro, Media Luna y Las Flores, se presenta desabastecimiento que conduce a racionamientos enmarcados no exactamente por la cantidad de agua que ofrece la fuente, sino por déficit en la capacidad de tratamiento del sistema de agua potable (PTAP) para el caso del sistema de acueducto San Pedro, por la demanda de caudal excesiva que se presenta aguas arriba del punto de captación del sistema de acueducto Media Luna por parte de Urbanización Mirador de Santa Elena y por el volumen de almacenamiento que exige el tipo de captación (tipo embalse) para el acueducto Las Flores.

#### 3.2.6.4.3 Usuarios del agua del AID local proyecciones al período de análisis (20 años)

A continuación se registra el estado al período de análisis (20 años) de los sistemas de acueducto localizados en el AID local (Yarumaguas, Multiveredal Santa Elena, San Pedro, Media Luna, Las Flores, Conhydra, ARSA, Aguas del Mirador, ASUASI, El Progreso y Circuito La Cascada), análisis éstos realizados a partir de los cálculos y proyecciones de dotaciones, demandas y caudales contenidos en el Anexo 3-24.

##### *3.2.6.4.3.1 Sistema de acueducto Cooperativa Yarumal de Aguas Ltda. "Yarumaguas*

Según los cálculos y proyecciones en el Anexo 3-24, las proyecciones de demanda para un período de análisis igual a 20 años, fueron estimadas tomando la dotación neta y el porcentaje de pérdidas máximos establecidos por la Resolución 2320 de 2009, de modo que tanto los consumos como las demandas de caudal estén acorde con los criterios estimados según su nivel de complejidad. Por lo antes mencionado para el caso específico del sistema de acueducto Yarumaguas las proyecciones al año base de proyección 2033 se realizaron bajo la premisa de una dotación neta igual a 90 L/hab-día y un porcentaje de pérdidas (comerciales + técnicas) del 25%.

Respecto a la concesión de agua otorgada por la corporación autónoma regional CORNARE para las fuentes de abastecimiento La Floresta y El Pasivo, requieren ser renovados en el año 2018 (vigencia de la concesión 10 años), sin requerir aumentar el caudal concesionado, ya que para el período de análisis no se registra déficit respecto al caudal demandado por la población.

El caudal crítico ofrecido por las fuentes según registros entregados por la CAR, se tiene que para la quebrada La Floresta 5,6 L/s y para la quebrada El Pasivo 6,13 L/s, lo que permite determinar que si se conservan como mínimo las condiciones actuales, la fuente de agua La Floresta está en la capacidad de otorgar el caudal mínimo demandado por la población haciendo uso del 10,16% del afluente y conservando por consiguiente, un caudal ecológico en la misma. Es de anotar, que dichas proyecciones están en función de las demandas y pérdidas establecidas por la norma RAS 2000, por lo que la conservación de las condiciones descritas están sujetas al manejo integral del sistema de acueducto, es decir, un funcionamiento de tipo técnico en óptimas condiciones.

#### *3.2.6.4.3.2 Sistema de acueducto Corporación Acueducto Multiveredal Santa Elena*

Según los cálculos y proyecciones en el Anexo 3-24, las proyecciones de demanda para un período de análisis igual a 20 años, fueron estimadas tomando la dotación neta y el porcentaje de pérdidas máximos establecidos por la Resolución 2320 de 2009, de modo que tanto los consumos como las demandas de caudal estén acorde con los criterios estimados según su nivel de complejidad. Por lo antes mencionado para el caso específico del sistema de acueducto Multiveredal Santa Elena las proyecciones al año base de proyección 2033 se realizaron bajo la premisa de una dotación neta igual a 115 L/hab-día y un porcentaje de pérdidas (comerciales + técnicas) del 25%.

Respecto al permiso de concesión de agua otorgado por la corporación autónoma regional CORANTIOQUIA para la fuente de abastecimiento quebrada Santa Elena, requiere renovarse en el año 2018 (vigencia de la concesión 10 años). A la fecha de diagnóstico se requiere aumentar la cantidad de caudal concesionado, ya que de acuerdo con el caudal demandado por la población se tiene un déficit actual igual a 1,93 L/s.

El caudal medio ofrecido por la fuente según registros entregados por la CAR equivale a 336,16 L/s, lo que permite determinar que si se conservan como mínimo las condiciones actuales, la fuente de agua está en la capacidad de otorgar el caudal mínimo demandado por la población haciendo uso del 48,20% del afluente y conservando por ende un caudal ecológico en la misma. Es de anotar, que dichas proyecciones están en función de las demandas y pérdidas establecidas por la norma RAS 2000, por lo que la conservación de las condiciones descritas están sujetas al manejo integral del sistema de acueducto, es decir, un funcionamiento de tipo técnico en óptimas condiciones.

#### *3.2.6.4.3.3 Sistema de acueducto Corporación de Acueducto San Pedro*

Según los cálculos y proyecciones en el Anexo 3-24, las proyecciones de demanda para un período de análisis igual a 20 años, fueron estimadas tomando la dotación neta y el porcentaje de pérdidas máximos establecidos por la Resolución 2320 de 2009, de modo que tanto los consumos como las demandas de caudal estén acorde con los criterios estimados según su nivel de complejidad. Por lo antes mencionado para el caso específico del sistema de acueducto San Pedro las proyecciones al año base de proyección 2033 se realizaron bajo la premisa de una dotación neta igual a 115 L/hab-día y un porcentaje de pérdidas (comerciales + técnicas) del 25%.

Respecto al permiso de concesión de agua otorgado por la corporación autónoma regional CORANTIOQUIA para la fuente de abastecimiento quebrada San Pedro, requiere renovarse en el año 2021 (vigencia de la concesión 10 años). A la fecha de diagnóstico se requiere aumentar la cantidad de caudal concesionado, ya que para el año 2014 se tiene un déficit actual igual a 4,59 L/s.

El caudal medio ofrecido por la fuente según registros entregados por la CAR equivale a 69,53 L/s, lo que permite determinar que si se conservan como mínimo las condiciones actuales, la fuente de agua está en la capacidad de otorgar el caudal mínimo demandado por la población, pero se hace muy importante tener en cuenta que en la realidad al unirse la época de estiaje con los períodos de vacaciones, el nivel de las aguas baja tanto en la fuente que se hace necesario implementar acciones de racionamiento para recuperar el sistema y por ende la fuente. Es de anotar, que dichas proyecciones están en función de las demandas y pérdidas establecidas por la norma RAS

2000, por lo que la conservación de las condiciones descritas están sujetas al manejo integral del sistema de acueducto, es decir un funcionamiento de tipo técnico en óptimas condiciones.

Es importante mencionar que pese a que el presente estudio no involucra modelaciones hidráulicas de cada una de las estructuras y redes que componen el sistema de acueducto San Pedro, se determina con los cálculos de proyección que puede existir una relación entre las acciones de racionamiento para recuperación del sistema y la capacidad máxima de tratamiento que ofrece la planta de agua potable (filtración lenta), puesto que el caudal máximo diario que es el referente según la norma RAS 2000 para determinar la capacidad de este sistema, permite establecer que actualmente se está trabajando casi al máximo de su capacidad y al generarse un incremento de demandas súbito en época de vacaciones se obliga a una sobrecarga del sistema y por ende a un incremento de velocidades de filtración para las cuales fue diseñada la planta de tratamiento, lo que se refleja entonces en un aumento del lavado de los filtros, en una continua reposición de lecho filtrante y en un mínimo crecimiento biológico base de la filtración lenta; permitiendo deducir en cierto modo, que la efectividad del tratamiento va en descenso, aumentándose así la probabilidad de contar con aguas tratadas que reflejen concentraciones en ciertos parámetros fisicoquímicos y/o biológicos, por fuera de los mínimos, establecidos por la norma para definición de agua apta para consumo humano.

Por las razones antes expuestas se podría inferir que desde el área técnica del sistema de acueducto San Pedro, se implementan acciones de racionamiento que permitan compensar los niveles de las estructuras de almacenamiento y por ende se decline la actividad productiva del sistema de tratamiento durante ciertos períodos del día, minimizando así la operación de la planta bajo sobrecargas de caudal entrante el cual está sujeto a la demanda poblacional.

#### *3.2.6.4.3.4 Sistema de acueducto Corporación de Acueducto Media Luna*

Según los cálculos y proyecciones en el Anexo 3-24, las proyecciones de demanda para un período de análisis igual a 20 años, fueron estimadas tomando la dotación neta y el porcentaje de pérdidas máximos establecidos por la Resolución 2320 de 2009, de modo que tanto los consumos como las demandas de caudal estén acorde con los criterios estimados según su nivel de complejidad. Por lo antes mencionado para el caso específico del sistema de acueducto Media Luna las proyecciones al año base de proyección 2033 se realizaron bajo la premisa de una dotación neta igual a 90 L/hab-día y un porcentaje de pérdidas (comerciales + técnicas) del 25%.

Respecto al permiso de captación otorgado por la corporación autónoma regional CORANTIOQUIA para la fuente de abastecimiento quebrada Santa Bárbara, este requiere ser renovado en el año 2021 (vigencia de la concesión 10 años). A la fecha de diagnóstico se requiere aumentar la cantidad de caudal concesionado, ya que para el año base 2013 se tiene un déficit actual igual a 3,85 L/s.

El caudal medio ofrecido por la fuente según registros entregados por la CAR equivale a 54,99 L/s, lo que técnicamente permite determinar que si se conservan como mínimo las condiciones actuales, la fuente de agua está en la capacidad de otorgar el caudal mínimo demandado por la población, pero se hace muy importante tener en cuenta que en la realidad la mayor parte del caudal que transporta la quebrada Santa Bárbara es arrastrado por la Urbanización Mirador de Santa Elena dejando casi sin recurso agua la fuente hasta aproximadamente 400 m aguas abajo, tramo este en el que se localiza la estructura de captación del sistema de acueducto en análisis. Es de anotar también que dichas proyecciones están en función de las demandas y pérdidas

establecidas por la norma RAS 2000, por lo que la conservación de las condiciones descritas están sujetas al manejo integral del sistema de acueducto, es decir un funcionamiento de tipo técnico en óptimas condiciones.

Es importante mencionar que pese a que el presente estudio no involucra modelaciones hidráulicas de cada una de las estructuras y redes que componen el sistema de acueducto Media Luna, se determina con los cálculos de proyección que se hace estrictamente necesario realizar programas de sensibilización que minimicen el consumo promedio por habitante día (dotación neta), así como un control estricto del monitoreo de pérdidas que permita reducir en gran medida las conexiones fraudulentas y por ende reducir la cantidad de caudal demandado por la población pero no facturado, todo esto con el fin de que el sistema tal y como está concebido no quede con sobrecargas de las estructuras y en especial del sistema de tratamiento.

#### *3.2.6.4.3.5 Sistema de acueducto Corporación de Asociados del Acueducto Las Flores*

Según los cálculos y proyecciones en el Anexo 3-24, las proyecciones de demanda para un período de análisis igual a 20 años, fueron estimadas tomando la dotación neta y el porcentaje de pérdidas máximos establecidos por la Resolución 2320 de 2009, de modo que tanto los consumos como las demandas de caudal estén acorde con los criterios estimados según su nivel de complejidad. Por lo antes mencionado para el caso específico del sistema de acueducto Las Flores las proyecciones al año base de proyección 2033 se realizaron bajo la premisa de una dotación neta igual a 90 L/hab-día y un porcentaje de pérdidas (comerciales + técnicas) del 25%.

Respecto a la ausencia de permiso de captación otorgado por la entidad correspondiente para la fuente de abastecimiento quebrada Chiqueros o alguna otra fuente alterna, se hace estrictamente necesario realizar este trámite con el fin de poder realizar la captación de aguas de una manera legal y en función del cumplimiento de las normas. A la fecha de diagnóstico si se toma como referencia el caudal registrado en la concesión de aguas del año 2006, se requiere aumentar la cantidad de caudal concesionado, ya que para el presente año (2013) se tiene un déficit actual igual a 0,41 L/s.

El caudal medio ofrecido por la fuente según registros entregados por la CAR equivale a 4,36 L/s, lo que permite determinar que si se conservan como mínimo las condiciones actuales, la fuente de agua está en la capacidad de otorgar el caudal mínimo demandado por la población, haciendo uso de un 64,46% del total de caudal transportado por la quebrada Chiqueros. Es de anotar también que dichas proyecciones están en función de las demandas y pérdidas establecidas por la norma RAS 2000, por lo que la conservación de las condiciones descritas están sujetas al manejo integral del sistema de acueducto, es decir un funcionamiento de tipo técnico en óptimas condiciones.

#### *3.2.6.4.3.6 Sistema de acueducto Conhydra para La Sociedad Operadora de Aeropuertos Centro Norte S.A. "Airplan S.A."*

Según los cálculos y proyecciones en el Anexo 3-24, las proyecciones de demanda para un período de análisis igual a 20 años, fueron estimadas tomando la dotación neta establecida por la literatura para instalaciones de educación superior, las cuales por su funcionamiento y dotación por alumno se asemejan más al comportamiento del aeropuerto José María Córdoba y el porcentaje de pérdidas máximos establecidos por la Resolución 2320 de 2009, de modo que tanto los consumos como las demandas de caudal estén acorde con los criterios estimados según su nivel de complejidad y según el comportamiento promedio para sistemas con condiciones

similares. Por lo antes mencionado para el caso específico del sistema de acueducto Conhydra las proyecciones al año base de proyección 2033 se realizaron bajo la premisa de una dotación neta igual a 32,5 L/hab-día y un porcentaje de pérdidas (comerciales + técnicas) del 25%, esta última con el fin de no castigar el sistema a pérdidas tan ajustadas como las referidas por el funcionamiento actual del sistema, pero teniendo como referente el hecho que ningún sistema de acueducto puede sobrepasar su porcentaje de pérdidas de acuerdo a lo marcado por la normatividad.

Respecto al permiso de captación otorgado por la corporación autónoma regional CORNARE para la fuente de abastecimiento quebrada Yarumal, este requiere ser renovado en el año 2022 (vigencia de la concesión 10 años). Se tiene también que para todo el período de análisis la cantidad de agua concesionada es suficiente para suplir la cantidad de caudal demandado por la población, por lo que no se hace necesario solicitar aumentos en cuanto al caudal concesionado y/o buscar una fuente alterna que permita alcanzar el caudal mínimo para abastecimiento.

El caudal medio ofrecido por la fuente según registros entregados por la CAR equivale a 47,9 L/s, lo que permite determinar que si se conservan como mínimo las condiciones actuales, la fuente de agua está en la capacidad de otorgar el caudal mínimo demandado por la población. Es de anotar también que dichas proyecciones están en función de las demandas y pérdidas establecidas por la norma RAS 2000, por lo que la conservación de las condiciones descritas están sujetas al manejo integral del sistema de acueducto, es decir un funcionamiento de tipo técnico en óptimas condiciones.

#### *3.2.6.4.3.7 Sistema de acueducto Asociación de Usuarios del Acueducto Sajonia - Alto Vallejo (ARSA)*

Según los cálculos y proyecciones en el Anexo 3-24, las proyecciones de demanda para un período de análisis igual a 20 años, fueron estimadas tomando la dotación neta y el porcentaje de pérdidas máximos establecidos por la Resolución 2320 de 2009, de modo que tanto los consumos como las demandas de caudal estén acorde con los criterios estimados según su nivel de complejidad. Por lo antes mencionado para el caso específico del sistema de acueducto ARSA las proyecciones al año base de proyección 2033 se realizaron bajo la premisa de una dotación neta igual a 115 L/hab-día y un porcentaje de pérdidas (comerciales + técnicas) del 25%.

Respecto al permiso de captación otorgado por la corporación autónoma regional CORNARE para la fuente de abastecimiento quebrada Yarumal, este requiere ser renovado en el año 2019 (vigencia de la concesión 10 años). Al año 1 de diagnóstico se requiere aumentar la cantidad de caudal concesionado, ya que de acuerdo al caudal demandado por la población se tendrá un déficit actual igual a 3,20 L/s.

El caudal medio ofrecido por la fuente según registros entregados por la CAR equivale a 84,87 L/s, lo que permite determinar que si se conservan como mínimo las condiciones actuales, la fuente de agua está en la capacidad de otorgar el caudal mínimo demandado por la población haciendo uso del 32,32% del afluente y conservando por ende un caudal ecológico en la misma. Es de anotar también que dichas proyecciones están en función de las demandas y pérdidas establecidas por la norma RAS 2000, por lo que la conservación de las condiciones descritas están sujetas al manejo integral del sistema de acueducto, es decir un funcionamiento de tipo técnico en óptimas condiciones.

#### *3.2.6.4.3.8 Sistema de acueducto Asociación Acueducto Aguas del Mirador*

Según los cálculos y proyecciones en el Anexo 3-24, las proyecciones de demanda para un período de análisis igual a 20 años, fueron estimadas tomando la dotación neta y el porcentaje de pérdidas máximos establecidos por la Resolución 2320 de 2009, de modo que tanto los consumos como las demandas de caudal estén acorde con los criterios estimados según su nivel de complejidad. Por lo antes mencionado para el caso específico del sistema de acueducto Aguas del Mirador las proyecciones al año base de proyección 2033 se realizaron bajo la premisa de una dotación neta igual a 90 L/hab-día y un porcentaje de pérdidas (comerciales + técnicas) del 25%.

Respecto al permiso de captación otorgado por la corporación autónoma regional CORNARE para las fuentes de abastecimiento quebradas Los Parra y Los Atehortúa, este requiere ser renovado en el año 2021 (vigencia de la concesión 10 años). A la fecha de diagnóstico se requiere aumentar la cantidad de caudal concesionado, ya que de acuerdo al caudal demandado por la población se tiene un déficit actual igual a 0,03 L/s.

El caudal critico ofrecido por las fuentes según registros entregados por la CAR, se tiene para la quebrada Los Parra 4,85 L/s y para la quebrada Los Atehortúa 4,32 L/s, lo que permite determinar que si se conservan como mínimo las condiciones actuales, las fuentes de agua están en la capacidad de otorgar el caudal mínimo demandado por la población haciendo uso solo un pequeño porcentaje de ambas o de cualquiera de las fuentes y conservando por ende un caudal ecológico en la misma. Es de anotar también que dichas proyecciones están en función de las demandas y pérdidas establecidas por la norma RAS 2000, por lo que la conservación de las condiciones descritas están sujetas al manejo integral del sistema de acueducto, es decir un funcionamiento de tipo técnico en óptimas condiciones.

#### *3.2.6.4.3.9 Sistema de acueducto Asociación de Usuarios del Acueducto San Ignacio A.S.U.A.S.I.*

Según los cálculos y proyecciones en el Anexo 3-24, las proyecciones de demanda para un período de análisis igual a 20 años, fueron estimadas tomando la dotación neta y el porcentaje de pérdidas máximos establecidos por la Resolución 2320 de 2009, de modo que tanto los consumos como las demandas de caudal estén acorde con los criterios estimados según su nivel de complejidad. Por lo antes mencionado para el caso específico del sistema de acueducto ASUASI las proyecciones al año base de proyección 2033 se realizaron bajo la premisa de una dotación neta igual a 115 L/hab-día y un porcentaje de pérdidas (comerciales + técnicas) del 25%.

Respecto al permiso de captación otorgado por la corporación autónoma regional CORANTIOQUIA para las fuentes de abastecimiento quebradas La Negra 1, La Negra 2 y La Mina, este requiere ser renovado en el año 2018 (vigencia de la concesión 10 años). Como ya se mencionó para las condiciones actuales y tomando solo la porción de caudal concesionado en cada una de las fuentes de abastecimiento no se tiene déficit en cuanto a la cantidad de caudal demandado, pero acogiéndose a las proyecciones por un período igual a 20 años en función de demandas según Norma RAS 2000, desde el año 01 se presentaría un déficit igual a 4,56 L/s respecto al caudal requerido para suplir el 100% de la población abastecida.

El caudal medio ofrecido por las fuentes de abastecimiento que permiten actividades de captación en las quebradas La Negra 1, La Negra 2 y La Mina según registros entregados por la CAR equivalen a 5,73 L/s en total, lo que permite determinar que si el sistema de acueducto ASUASI empieza a aumentar sus demandas de agua en función de suplir el 100% de las necesidades de cada uno de

los usuarios y dejando de la lado las conexiones a nacimientos, es decir pasando de dotaciones de 20,50 L/hab-día a dotaciones según norma para un nivel de complejidad medio de 115 L/hab-día, se estaría presentando un desabastecimiento en términos de caudal disponible en las fuentes concesionadas, situación está que debe ser considerada ya que se hace estrictamente necesario buscar fuentes alternas que permitan un abastecimiento continuo en términos de calidad y cantidad.

Es importante mencionar que pese a que el presente estudio no involucra modelaciones hidráulicas de cada una de las estructuras y redes, así como tampoco una evaluación desde el punto de vista socioeconómico que permita analizar los registros de consumo promedio por habitante a la luz de otra área que no sea consumos según la normatividad RAS 2000 y la Resolución 2320 de 2009, se debe tener muy en cuenta que el desabastecimiento de este sistema de acueducto es factible de presentarse aun conservando las condiciones actuales de recarga natural de los acuíferos, solo con el hecho de generarse mayores consumos que en ningún momento estarían por encima de los lineamientos enmarcados por la normatividad vigente, todo esto a consecuencia que las tres fuentes de abastecimiento actuales no cuenta con la cantidad suficiente de caudal disponible.

#### *3.2.6.4.3.10 Sistema de Acueducto El Progreso*

Según los cálculos y proyecciones en el Anexo 3- 24, las proyecciones de demanda para un período de análisis igual a 20 años, fueron estimadas tomando la dotación neta y el porcentaje de pérdidas máximos establecidos por la Resolución 2320 de 2009, de modo que tanto los consumos como las demandas de caudal estén acorde con los criterios estimados según su nivel de complejidad. Por lo antes mencionado para el caso específico del sistema de acueducto El Progreso las proyecciones al año base de proyección 2033 se realizaron bajo la premisa de una dotación neta igual a 90 L/hab-día y un porcentaje de pérdidas (comerciales + técnicas) del 25%.

Respecto al permiso de captación otorgado por la corporación autónoma regional CORANTIOQUIA para la fuente de abastecimiento quebrada La Quiebra, este requiere ser renovado en el año 2022 (vigencia de la concesión 10 años). A la fecha de diagnóstico no se requiere aumentar la cantidad de caudal concesionado, pero al año 2024 se empieza registra un déficit en cuanto a la cantidad de caudal demandado por lo que se recomienda realizar la gestión de aumento de caudal con la renovación de la concesión.

El caudal medio ofrecido por la fuente según registros entregados por la CAR equivale a 7,37 L/s, lo que permite determinar que si se conservan como mínimo las condiciones actuales, la fuente de agua está en la capacidad de otorgar el caudal mínimo demandado por la población, haciendo uso de un 3,62% del total de caudal transportado por la quebrada La Quiebra. Es de anotar también que dichas proyecciones están en función de las demandas y pérdidas establecidas por la norma RAS 2000, por lo que la conservación de las condiciones descritas están sujetas al manejo integral del sistema de acueducto, es decir un funcionamiento de tipo técnico en óptimas condiciones.

Se hace importante resaltar que el sistema de acueducto El Progreso debido a la ausencia de una organización interna a nivel técnico y administrativo, se hizo necesario basar su evaluación actual de acuerdo a las disposiciones dadas por el RAS 2000, por lo tanto esta no es una descripción exacta de la situación actual en cuanto a condiciones de demanda del recurso agua por parte de la población.

#### *3.2.6.4.3.11 Circuito de acueducto La Cascada (EPM)*

Las proyecciones de demanda para un período de análisis igual a 20 años, fueron estimadas tomando la dotación neta y el porcentaje de pérdidas máximos establecidos por la Resolución 2320 de 2009, de modo que tanto los consumos como las demandas de caudal estén acorde con los criterios estimados según su nivel de complejidad. Por lo antes mencionado para el caso específico del circuito de acueducto La Cascada las proyecciones al año base de proyección 2033 se realizaron bajo la premisa de una dotación neta igual a 125 L/hab-día y un porcentaje de pérdidas (comerciales + técnicas) del 25%.

Respecto al permiso de captación otorgado por la corporación autónoma regional CORANTIOQUIA para la fuente de abastecimiento quebrada Santa Elena, este se tiene de manera temporal hasta que se implementen las acciones de captación para la concesión otorgada sobre la quebrada La Honda del Municipio de Guarne para un caudal de 330 L/s y por un período igual a 50 años. Sin embargo en caso de contar con el abastecimiento del circuito La Cascada por parte de la quebrada Santa Elena, durante el período de análisis en ningún momento se estaría llevando a cabo captaciones por encima del volumen concesionado, por lo tanto no es factible hablar de déficit.

El caudal medio ofrecido por la fuente según registros entregados por la CAR equivale a 498,13 L/s, lo que permite determinar que si se conservan como mínimo las condiciones actuales, la fuente de agua está en la capacidad de otorgar el caudal mínimo demandado por la población. Es de anotar también que dichas proyecciones están en función de las demandas y pérdidas establecidas por la norma RAS 2000, por lo que la conservación de las condiciones descritas están sujetas al manejo integral del sistema de acueducto, es decir un funcionamiento de tipo técnico en óptimas condiciones.

Es importante mencionar que pese a que el presente estudio no involucra modelaciones hidráulicas de cada una de las estructuras y redes que componen el circuito de acueducto La Cascada, se determina con los cálculos realizados a partir de los registros promedios entregados por EPM que el nivel de pérdidas es bastante alto respecto al 25% que establece la norma RAS 2000 como nivel máximo, siendo esta una situación de especial cuidado al incrementarse en gran medida por ende la demanda del recurso agua.

### 3.2.6.5 Usos del Agua AID

#### 3.2.6.5.1 Usuarios del agua del AID diagnóstico actual

A continuación se registra el estado actual de los usuarios concesionados y no concesionados localizados en el AID (local y puntual) según su cuenca de ubicación, análisis estos realizados a partir de los cálculos y proyecciones de dotaciones, demandas y caudales contenidos en el Anexo 3-24.

#### *3.2.6.5.1.1 Cuenca La Cascada*

El total de usuarios del recurso agua que cuentan con concesión, basan su abastecimiento a partir de captaciones generalmente tipo artesanal, en su mayoría no se cuenta con ningún tipo de tratamiento que mejore su calidad. En términos generales y desde el punto de vista técnico, se puede determinar que este tipo de tomas de agua cruda presenta falencias en cuanto a la infraestructura técnica, sin embargo, como no se trata de redes de distribución demasiado amplias, se puede inferir que las pérdidas técnicas son relativamente bajas.

Como no se cuenta con información secundaria que permita determinar dotaciones y porcentaje de pérdidas que reflejen las condiciones actuales, debido a la ausencia de medidores macro y micro, se determinó que las condiciones actuales serían modeladas con los valores establecidos por la Resolución 2320 de 2009 para un nivel de complejidad bajo siendo la dotación neta equivalente a 90 L/hab-día y el porcentaje de pérdidas igual al 25%.

En términos de demanda del recurso agua para las condiciones actuales la cantidad de caudal demandado por la población (QMH+15%) para este caso en específico y tomando el análisis como un sistema integrado en términos de demanda ($Q_{\text{total demandado}}$ 0,52 L/s) y de caudal concesionado ($Q_{\text{total concesionado}}$ 1,075 L/s), no se estaría realizando captaciones de caudal por encima del total concesionado por la CAR, sin embargo no se hace posible evaluar de manera precisa si se está realizando la captación de un volumen de agua por encima del máximo otorgado, dado que no se cuentan con sistemas de medida que regulen su consumo y al no implicar costo alguno por uso, es más factible que se presenten consumos por encima del máximo establecido por la norma (Resolución 2320 de 2009).

#### *3.2.6.5.1.2 Cuenca La Yarumal*

Según los cálculos y proyecciones en el Anexo 3-24, el total de usuarios del recurso agua que cuentan con concesión, basan su abastecimiento a partir de captaciones básicamente de tipo artesanal, en su mayoría no se cuenta con ningún tipo de tratamiento que mejore su calidad. En términos generales y desde un punto de vista técnico, se puede determinar que este tipo de tomas de agua cruda presenta serias falencias en cuanto a su infraestructura técnica, sin embargo como no se trata de redes de distribución demasiado amplias, se puede inferir que las pérdidas técnicas son relativamente bajas.

Como no se cuenta con información secundaria que permita determinar dotaciones y porcentaje de pérdidas que reflejen las condiciones actuales debido a la ausencia de medidores macro y micro, se determinó que las condiciones actuales serían modeladas con los valores establecidos por la Resolución 2320 de 2009 para un nivel de complejidad bajo siendo la dotación neta equivalente a 90 L/hab-día y el porcentaje de pérdidas igual al 25%.

En términos de demanda del recurso agua para las condiciones actuales la cantidad de caudal demandado por la población (QMH+15%) para este caso en específico y tomando el análisis como un sistema integrado en términos de demanda ($Q_{\text{total demandado}}$ 1,47 L/s) y de caudal concesionado ($Q_{\text{total concesionado}}$ 2,59 L/s), no se estaría realizando captaciones de caudal por encima del total concesionado por la CAR correspondiente (CORNARE), sin embargo no se hace posible evaluar de manera precisa si se está realizando la captación de un volumen de agua por encima del máximo otorgado ya que al no contarse con sistemas de medida que regulen su consumo y al no acarrear ningún tipo de costo su uso, es más factible que se den consumos por encima del máximo establecido por la norma (Resolución 2320 de 2009).

#### *3.2.6.5.1.3 Cuenca Santa Elena*

Según los cálculos y proyecciones en el Anexo 3-24, el total de usuarios del recurso agua que cuentan con concesión, basan su abastecimiento a partir de captaciones de tipo artesanal y en algunos casos son del tipo sumergido pero sin mayores especificaciones. En términos generales y desde un punto de vista técnico, se puede determinar que este tipo de tomas de agua cruda presenta serias falencias en cuanto a su infraestructura técnica, sin embargo como no se trata de

redes de distribución demasiado amplias, se puede inferir que las pérdidas técnicas son relativamente bajas.

Como no se cuenta con información secundaria que permita determinar dotaciones y porcentaje de pérdidas que reflejen las condiciones actuales debido a la ausencia de medidores macro y micro, se determinó que las condiciones actuales serían modeladas con los valores establecidos por la Resolución 2320 de 2009 para un nivel de complejidad bajo siendo la dotación neta de tipo domestico equivalente a 90 L/hab-día, mientras que las dotaciones medias para los otros usos determinados fueron extraídas de la literatura ($D_{acuicola}$: 0,001 L/$m^2$-s, $D_{agricola}$: 5 L/$m^2$-día, $D_{pecuario}$: 3 L/unidad-día) y de lo que se reflejó en campo en cada una de las visitas a los predios. El porcentaje de pérdidas se trabajó igual al 25% para cada uno de los usos.

En términos de demanda del recurso agua para las condiciones actuales la cantidad de caudal demandado por la población (QMH+15%) para este caso en específico y tomando el análisis como un sistema integrado en términos de demanda ($Q_{\text{total demandado}}$ 106,81 L/s) y de caudal concesionado ($Q_{\text{total concesionado}}$ 9,979 L/s), se estaría realizando captaciones de caudal por encima del total concesionado por la CAR correspondiente (CORANTIOQUIA), sin embargo no se hace posible evaluar de manera precisa el porcentaje real de caudal consumido por encima del máximo otorgado ya que al no contarse con sistemas de medida que regulen su consumo y al no acarrear ningún tipo de costo su uso, es más factible que se den demandas por encima de las máximas establecido por la norma (Resolución 2320 de 2009) y otorgadas por las autoridades ambientales.

#### *3.2.6.5.1.4 Cuenca La Yerbabuena*

Según los cálculos y proyecciones en el Anexo 3-24, el total de usuarios del recurso agua que cuentan con concesión, basan su abastecimiento a partir de captaciones de tipo artesanal, pero la captación que permite la toma de las aguas para consumo doméstico del Seminario Conciliar de Medellín es tipo rejilla que a simple vista evidencia un adecuado funcionamiento a nivel técnico. Al no tratarse de redes de distribución demasiado amplias, se puede inferir que las pérdidas técnicas son relativamente bajas.

Como no se cuenta con información secundaria que permita determinar dotaciones y porcentaje de pérdidas que reflejen las condiciones actuales debido a la ausencia de medidores macro y micro, se determinó que las condiciones actuales serían modeladas con los valores establecidos por la Resolución 2320 de 2009 para un nivel de complejidad bajo siendo la dotación neta de tipo domestico equivalente a 90 L/hab-día, mientras que las dotaciones medias para los otros usos determinados fueron extraídas de la literatura ($D_{agricola}$: 5 L/$m^2$-día) y de lo que se reflejó en campo en cada una de las visitas a los predios. El porcentaje de pérdidas se trabajó igual al 25% para cada uno de los usos.

En términos de demanda del recurso agua para las condiciones actuales la cantidad de caudal demandado por la población (QMH+15%) para este caso en específico y tomando el análisis como un sistema integrado en términos de demanda ($Q_{\text{total demandado}}$ 2,51 L/s) y de caudal concesionado ($Q_{\text{total concesionado}}$ 1,525 L/s), se estaría realizando captaciones de caudal por encima del total concesionado por la CAR correspondiente (CORANTIOQUIA), sin embargo no se hace posible evaluar de manera precisa el porcentaje real de caudal consumido por encima del máximo otorgado ya que al no contarse con sistemas de medida que regulen su consumo y al no acarrear ningún tipo de costo su uso, es más factible que se den demandas por encima de las máximas establecidas por la norma (Resolución 2320 de 2009) y otorgadas por las autoridades ambientales.

#### *3.2.6.5.1.5 Cuenca La Cascada*

Según los cálculos y proyecciones en el Anexo 3-24, el total de usuarios del recurso agua que no cuentan con concesión ni permiso alguno para toma de caudales, basan su abastecimiento a partir de captaciones de tipo artesanal, en su mayoría no se cuenta con ningún tipo de tratamiento que mejore su calidad. En términos generales y desde un punto de vista técnico, se puede determinar que este tipo de tomas de agua cruda presenta serias falencias en cuanto a su infraestructura técnica, sin embargo como no se trata de redes de distribución demasiado amplias, se puede inferir que las pérdidas técnicas son relativamente bajas.

Como no se cuenta con información secundaria que permita determinar dotaciones y porcentaje de pérdidas que reflejen las condiciones actuales debido a la ausencia de medidores macro y micro, se determinó que las condiciones actuales serían modeladas con los valores establecidos por la Resolución 2320 de 2009 para un nivel de complejidad bajo siendo la dotación neta equivalente a 90 L/hab-día y el porcentaje de pérdidas igual al 25%.

En términos de demanda del recurso agua para las condiciones actuales la cantidad de caudal demandado por la población (QMH+15%) para este caso en específico y tomando el análisis como un sistema integrado en términos de demanda se tiene un requerimiento igual 0,35 L/s, sin embargo es de anotar que estos cálculos están en función de los valores de consumo establecidos por la norma referida, pero para este caso en específico se pueden considerar de manera factible consumos superiores al no generar ningún tipo de costo su utilización.

#### *3.2.6.5.1.6 Cuenca La Yarumal*

Según los cálculos y proyecciones en el Anexo 3-24, el total de usuarios del recurso agua que no cuentan con concesión ni permiso alguno para toma de caudales, basan su abastecimiento a partir de captaciones de tipo artesanal, en su mayoría no se cuenta con ningún tipo de tratamiento que mejore su calidad. En términos generales y desde un punto de vista técnico, se puede determinar que este tipo de tomas de agua cruda presenta serias falencias en cuanto a su infraestructura técnica, sin embargo como no se trata de redes de distribución demasiado amplias, se puede inferir que las pérdidas técnicas son relativamente bajas.

Como no se cuenta con información secundaria que permita determinar dotaciones y porcentaje de pérdidas que reflejen las condiciones actuales debido a la ausencia de medidores macro y micro, se determinó que las condiciones actuales serían modeladas con los valores establecidos por la Resolución 2320 de 2009 para un nivel de complejidad bajo siendo la dotación neta equivalente a 90 L/hab-día y el porcentaje de pérdidas igual al 25%.

En términos de demanda del recurso agua para las condiciones actuales la cantidad de caudal demandado por la población (QMH+15%) para este caso en específico y tomando el análisis como un sistema integrado en términos de demanda se tiene un requerimiento igual 0,32 L/s, sin embargo es de anotar que estos cálculos están en función de los valores de consumo establecidos por la norma referida, pero para este caso en específico se pueden considerar de manera factible consumos superiores al no generar ningún tipo de costo su utilización.

#### *3.2.6.5.1.7 Cuenca Santa Elena*

Según los cálculos y proyecciones en el Anexo 3-24, el total de usuarios del recurso agua que no cuentan con concesión ni permiso alguno para toma de caudales, basan su abastecimiento a partir

de captaciones de tipo artesanal, en su mayoría no se cuenta con ningún tipo de tratamiento que mejore su calidad. En términos generales y desde un punto de vista técnico, se puede determinar que este tipo de tomas de agua cruda presenta serias falencias en cuanto a su infraestructura técnica, sin embargo como no se trata de redes de distribución demasiado amplias, se puede inferir que las pérdidas técnicas son relativamente bajas.

Como no se cuenta con información secundaria que permita determinar dotaciones y porcentaje de pérdidas que reflejen las condiciones actuales debido a la ausencia de medidores macro y micro, se determinó que las condiciones actuales serían modeladas con los valores establecidos por la Resolución 2320 de 2009 para un nivel de complejidad bajo siendo la dotación neta de tipo domestico equivalente a 90 L/hab-día, mientras que las dotaciones medias para los otros usos determinados fueron extraídas de la literatura ($D_{agricola}$: 5 L/$m^2$-día, $D_{pecuario}$: 3 L/unidad-día) y de lo que se reflejó en campo en cada una de las visitas a los predios. El porcentaje de pérdidas se trabajó igual al 25% para cada uno de los usos.

En términos de demanda del recurso agua para las condiciones actuales la cantidad de caudal demandado por la población (QMH+15%) para este caso en específico y tomando el análisis como un sistema integrado en términos de demanda se tiene un requerimiento igual 4,58 L/s, sin embargo es de anotar que estos cálculos están en función de los valores de consumo establecidos por la norma referida, pero para este caso en específico se pueden considerar de manera factible consumos superiores al no generar ningún tipo de costo su utilización.

#### 3.2.6.5.2 Usuarios del agua del AID proyecciones al período de análisis (20 años)

A continuación se registra el estado al período de análisis (20 años) de los usuarios concesionados y no concesionados localizados en el AID (local y puntual) según su cuenca de ubicación, análisis éstos realizados a partir de los cálculos y proyecciones de dotaciones, demandas y caudales contenidos en el Anexo 3-24.

##### *3.2.6.5.2.1 Cuenca La Cascada*

Según los cálculos y proyecciones en el Anexo 3-24, las proyecciones de demanda para un período de análisis igual a 20 años, fueron estimadas tomando la dotación neta y el porcentaje de pérdidas máximos establecidos por la Resolución 2320 de 2009, de modo que tanto los consumos como las demandas de caudal estén acorde con los criterios estimados según su nivel de complejidad. Por lo antes mencionado para el caso específico de los usuarios concesionados las proyecciones al año base 2033 se realizaron bajo la premisa de una dotación neta igual a 90 L/hab-día y un porcentaje de pérdidas del 25%.

Respecto a los permisos de captación que se tienen para la cuenca La Cascada estos fueron otorgados entre los años 2007 y 2011 por un período igual a 10 años, por lo tanto se hace necesario que se estén renovando en su totalidad a medida que se cumpla su vigencia, ya que al período de análisis en caso de que esta actividad no se realice estos 35 usuarios pasarían a formar parte del grupo de los no concesionados.

En términos de demanda de caudal y en función de la cantidad de caudal concesionado, se tiene que al período de análisis no se estaría captando ($Q_{total\ demandado}$ 0,87 L/s) por encima de la cantidad total concesionada ($Q_{total\ concesionado}$ 1,075 L/s) aún sin tener aumentos en los caudales otorgados, sin embargo es de aclarar que estas relaciones están basadas en los consumos máximos que admite la normatividad por usuario para un nivel de complejidad bajo.

#### *3.2.6.5.2.2 Cuenca La Yarumal*

Según los cálculos y proyecciones en el Anexo 3-24, las proyecciones de demanda para un período de análisis igual a 20 años, fueron estimadas tomando la dotación neta y el porcentaje de pérdidas máximos establecidos por la Resolución 2320 de 2009, de modo que tanto los consumos como las demandas de caudal estén acorde con los criterios estimados según su nivel de complejidad. Por lo antes mencionado para el caso específico de los usuarios concesionados las proyecciones al año base 2033 se realizaron bajo la premisa de una dotación neta igual a 90 L/hab-día y un porcentaje de pérdidas del 25%.

Respecto a los permisos de captación que se tienen para la cuenca La Yarumal estos fueron otorgados entre los años 2007 y 2011 por un período igual a 10 años, por lo tanto se hace necesario que se estén renovando en su totalidad a medida que se cumpla su vigencia, ya que al período de análisis en caso de que esta actividad no se realice estos 93 usuarios pasarían a formar parte del grupo de los no concesionados.

En términos de demanda de caudal y en función de la cantidad de caudal concesionado, se tiene que al período de análisis no se estaría captando ($Q_{\text{total demandado}}$ 1,67 L/s) por encima de la cantidad total concesionada ($Q_{\text{total concesionado}}$ 2,59 L/s) aún sin tener aumentos en los caudales otorgados, sin embargo es de aclarar que estas relaciones están basadas en los consumos máximos que admite la normatividad por usuario para un nivel de complejidad bajo.

#### *3.2.6.5.2.3 Cuenca Santa Elena*

Según los cálculos y proyecciones en el Anexo 3-24, las proyecciones de demanda para un período de análisis igual a 20 años, fueron estimadas tomando la dotación neta y el porcentaje de pérdidas máximos establecidos por la Resolución 2320 de 2009, de modo que tanto los consumos como las demandas de caudal estén acorde con los criterios estimados según su nivel de complejidad. Por lo antes mencionado para el caso específico de los usuarios concesionados las proyecciones al año base 2033 se realizaron bajo la premisa de una dotación neta igual a 90 L/hab-día para uso doméstico, para los demás usos del agua se continuo de igual manera asumiendo la misma dotación neta establecida por la literatura. Se tomó también en función de la normatividad un porcentaje de pérdidas del 25%.

Respecto a los permisos de captación que se tienen para la cuenca Santa Elena estos fueron otorgados entre los años 2007 y 2011 por un período igual a 10 años, por lo tanto se hace necesario que se estén renovando en su totalidad a medida que se cumpla su vigencia, ya que al período de análisis (20 años) en caso de que estas renovaciones de tipo legal no se realicen estos 96 usuarios pasarían a formar parte del grupo de los no concesionados.

En términos de demanda de caudal y en función de la cantidad de caudal concesionado, se tiene que al período de análisis se estaría captando ($Q_{\text{total demandado}}$ 107,23 L/s) por encima de la cantidad total concesionada ($Q_{\text{total concesionado}}$ 9,979 L/s), mostrando esto que tal como lo evidencian las condiciones actuales la presión sobre el recurso agua ejercido en la cuenca Santa Elena es alto, debido a la gran concentración de actividades productivas. También es de suma importancia resaltar que este tipo de consumidores del recurso agua al no contar con equipos de medida que controlen su consumo, hace que se de una manera más informal gastos por encima del máximo concesionado, que conducen a castigar más las fuentes especialmente en épocas de estiaje donde

disminuye la disponibilidad de caudal en los cuerpos de agua abastecedores y aumenta la demanda para el sostenimiento de las actividades productivas.

#### *3.2.6.5.2.4 Cuenca La Yerbabuena*

Según los cálculos y proyecciones en el Anexo 3-24, las proyecciones de demanda para un período de análisis igual a 20 años, fueron estimadas tomando la dotación neta y el porcentaje de pérdidas máximos establecidos por la Resolución 2320 de 2009, de modo que tanto los consumos como las demandas de caudal estén acorde con los criterios estimados según su nivel de complejidad. Por lo antes mencionado para el caso específico de los usuarios concesionados las proyecciones al año base 2033 se realizaron bajo la premisa de una dotación neta igual a 90 L/hab-día para uso doméstico, para los demás usos del agua se continuó de igual manera asumiendo la misma dotación neta establecida por la literatura. Se tomó también en función de la normatividad un porcentaje de pérdidas del 25%.

Respecto a los permisos de captación que se tienen para la cuenca Santa Elena estos fueron otorgados entre los años 2007 y 2011 por un período igual a 10 años, por lo tanto se hace necesario que se estén renovando en su totalidad a medida que se cumpla su vigencia, ya que al período de análisis (20 años) en caso de que esta renovación de tipo legal no se realice estos 96 usuarios pasarían a formar parte del grupo de los no concesionados.

En términos de demanda de caudal y en función de la cantidad de caudal concesionado, se tiene que al período de análisis se estaría captando ($Q_{\text{total demandado}}$ 2,99 L/s) por encima de la cantidad total concesionada ($Q_{\text{total concesionado}}$ 1,525L/s), mostrando esto que tal como lo evidencian las condiciones actuales la presión sobre el recurso agua ejercido en la cuenca Yerbabuena está un 164,59% por encima del total de caudales concesionados, debido a la gran concentración de actividades productivas. También es de suma importancia resaltar que este tipo de consumidores del recurso agua al no contar con equipos de medida que controlen su consumo, hace que se de una manera más informal gastos por encima del máximo concesionado, que conducen a castigar más las fuentes especialmente en épocas de estiaje donde disminuye la disponibilidad de caudal en los cuerpos de agua abastecedores y aumenta la demanda para el sostenimiento de las actividades productivas.

#### *3.2.6.5.2.5 Cuenca La Cascada*

Según los cálculos y proyecciones en el Anexo 3-24, las proyecciones de demanda para un período de análisis igual a 20 años, fueron estimadas tomando la dotación neta y el porcentaje de pérdidas máximos establecidos por la Resolución 2320 de 2009, de modo que tanto los consumos como las demandas de caudal estén acorde con los criterios estimados según su nivel de complejidad. Por lo antes mencionado para el caso específico de los usuarios no concesionados las proyecciones al año base 2033 se realizaron bajo la premisa de una dotación neta igual a 90 L/hab-día y un porcentaje de pérdidas del 25%.

En términos de demanda de caudal se tiene que para suplir los requerimientos de caudal de este grupo de usuarios se hace necesario un caudal total igual a 0,57 L/s, que deben en la medida de lo posible ser concesionados por la autoridad ambiental correspondiente, sin embargo es de aclarar que estas relaciones están basadas en los consumos máximos que admite la normatividad por usuario para un nivel de complejidad bajo.

Para este tipo de usuarios es difícil definir de manera precisa el grado de afectación en términos de demanda sobre el recurso agua que generan sobre las diferentes fuentes de abastecimiento, ya que al ser no concesionados se desconoce las cantidades captadas y las fuentes que son usadas para este tipo de suministros, situación está que se evidencio en campo afectan de manera considerable algunas de las captaciones de sistemas de acueducto específicamente en época de estiaje.

#### *3.2.6.5.2.6 Cuenca La Yarumal*

Según los cálculos y proyecciones en el Anexo 3-24, las proyecciones de demanda para un período de análisis igual a 20 años, fueron estimadas tomando la dotación neta y el porcentaje de pérdidas máximos establecidos por la Resolución 2320 de 2009, de modo que tanto los consumos como las demandas de caudal estén acorde con los criterios estimados según su nivel de complejidad. Por lo antes mencionado para el caso específico de los usuarios no concesionados las proyecciones al año base 2033 se realizaron bajo la premisa de una dotación neta igual a 90 L/hab-día y un porcentaje de pérdidas del 25%.

En términos de demanda de caudal se tiene que para suplir los requerimientos de caudal de este grupo de usuarios se hace necesario un caudal total igual a 0,37 L/s, que deben en la medida de lo posible ser concesionados por la autoridad ambiental correspondiente, sin embargo es de aclarar que estas relaciones están basadas en los consumos máximos que admite la normatividad por usuario para un nivel de complejidad bajo.

Para este tipo de usuarios es difícil definir de manera precisa el grado de afectación en términos de demanda sobre el recurso agua que generan sobre las diferentes fuentes de abastecimiento, ya que se desconoce las cantidades captadas y las fuentes que son usadas para este tipo de suministros, situación está que se evidencio en campo y que se hace más agreste específicamente en época de estiaje.

#### *3.2.6.5.2.7 Cuenca Santa Elena*

Según los cálculos y proyecciones en el Anexo 3-24, las proyecciones de demanda para un período de análisis igual a 20 años, fueron estimadas tomando la dotación neta y el porcentaje de pérdidas máximos establecidos por la Resolución 2320 de 2009, de modo que tanto los consumos como las demandas de caudal estén acorde con los criterios estimados según su nivel de complejidad. Por lo antes mencionado para el caso específico de los usuarios no concesionados las proyecciones al año base 2033 se realizaron bajo la premisa de una dotación neta doméstica igual a 90 L/hab-día y un porcentaje de pérdidas del 25%. Para las demás dotaciones identificadas se tomó igual valor referido por la literatura.

En términos de demanda de caudal se tiene que para suplir los requerimientos de caudal de este grupo de usuarios se hace necesario un caudal total igual a 4,98 L/s, que deben en la medida de lo posible ser concesionados por la autoridad ambiental correspondiente, sin embargo es de aclarar que estas relaciones están basadas en los consumos máximos que admite la normatividad por usuario para un nivel de complejidad bajo.

Para este tipo de usuarios es difícil definir de manera precisa el grado de afectación en términos de demanda sobre el recurso agua que generan sobre las diferentes fuentes de abastecimiento, ya que se desconoce las cantidades captadas y las fuentes que son usadas para este tipo de suministros, situación está que se evidencio en campo y que afectan de manera considerable

algunas de las captaciones de sistemas de acueducto (Captación acueducto Barrios de Jesús, Captación acueducto Media Luna) específicamente en época de estiaje.

#### 3.2.6.6 Aguas intermitentes

En la zona de estudio se presentan de dos formas principalmente; la primera, en zonas de captación de aguas cercanas a las vías principales, y la segunda en zonas sometida a alta pluviosidad la cual genera la ocurrencia de dichas aguas (escorrentía). La característica fundamental es que se logra ver el recorrido eventual del agua y en algunas partes se preserva cierta humedad en el suelo durante períodos de tiempo más largos. Las aguas intermitentes se logran ver en gran parte del área de influencia del proyecto sobre todo en época de invierno.

#### 3.2.6.7 Aguas Continuas

Se encuentran ampliamente distribuidas en la zona, donde se caracterizan por ser pequeños afluentes de agua a quebradas principales y aguas derivadas de captaciones en tanques o pequeños represamientos los cuales no presentan ningún tipo de control y propician hilos o pequeños cauces de aguas superficiales.

#### 3.2.6.8 Humedales

El término humedal surge en la legislación ambiental colombiana con la Ley 357 de 1997, referente a la aprobación de la Convención de Ramsar, la cual precisa los ecosistemas que quedan incluidos bajo tal denominación.

En este sentido, para la identificación de los humedales existentes en el área de influencia directa del proyecto Conexión Vial Aburrá-Oriente, se partió de la definición de humedales según la Convención Ramsar, de la cual se extrae «... son humedales aquellas extensiones de marismas, pantanos, turberas o aguas de régimen natural o artificial, permanentes o temporales, estancadas o corrientes, dulces, salobres o saladas, incluyendo las extensiones de agua marina cuya profundidad en marea baja no exceda de seis metros»[10].

Así mismo, RAMSAR caracteriza los humedales como cunas de diversidad biológica y fuentes de agua y productividad primaria, de los cuales innumerables especies vegetales y animales dependen para subsistir, siendo también importantes depósitos de material genético vegetal[11]. Desde esta perspectiva, la Convención RAMSAR de 1972, habla sobre la protección de humedales de importancia internacional como hábitat de aves acuáticas, constituyendo un componente importante del régimen internacional del medio ambiente.

No obstante, la definición de humedal según Ramsar contiene diversidad de elementos y ambientes en interacción que dificulta delimitarlos por la conectividad que desarrollan ecosistémicamente. Por esta razón Cowardin et al. (1979) sugiere que los humedales fueran reconocidos por su carácter de interfaz entre los sistemas terrestres y acuáticos. En esta línea, Farinha et al. (1996) ofrece criterios operativos, como:

- El límite entre tierra con cobertura vegetal predominantemente hidrofítica y aquella con cobertura mesofítica o xerofítica.
- El límite entre suelo predominantemente hídrico y aquel predominantemente seco.

[10] Davis & Carbonel, 1996
[11] Davis & Carbonel, 1996

- En aquellos sitios en donde no hay ni suelo ni vegetación, el límite entre la tierra que es inundada o saturada con agua en algún momento del año y aquella que no lo es.

En la identificación de humedales se consideró tanto la definición de Ramsar como las tipologías adoptadas por Scott (1989), las cuales fueron utilizadas por Naranjo (1998), y que permiten el reconocimiento de los humedales como sistemas naturales que se subdividen según la influencia de factores hidrológicos, geomorfológicos, químicos o biológicos, es decir, dependiendo del patrón de circulación del agua. Los artificiales se separan con base en el proceso que los origina o mantiene.

La clase del humedal se define con base en descriptores de la fisionomía del humedal, como formas de desarrollo dominantes o características del sustrato, tales como textura y granulometría en caso de no estar cubierto por plantas. La subclase depende principalmente de aspectos biofísicos particulares de algunos sistemas o de la estructura y composición de las comunidades bióticas presentes.

Por lo general, la caracterización de un humedal se basa en la vegetación dominante en las categorías paisajísticas. Otra opción para su caracterización es el análisis de composición de los ensamblajes o comunidades bióticas, de plantas y animales, en sitios particulares. En este nivel, la información (que presenta énfasis en los recursos hidrobiológicos) se encuentra dispersa en una amplia literatura que no ha sido sintetizada y colecciones científicas que no han sido utilizadas analíticamente para dar una visión de la biodiversidad asociada con los humedales. Por esto, el tema del uso de la biodiversidad asociada con los sistemas de humedales presenta notorios vacíos y el conocimiento disponible se encuentra disperso en la literatura.

Los humedales continentales incluyen una clasificación muy amplia, sin embargo, estos pueden ser agrupados en fluviales o ribereños (ríos, arroyos, cascadas), Lacustres (lagos, lagunas) y Palustres (manantiales, oasis, ojos de agua, bosques pantanosos, pantanos). Estos ecosistemas representan atributos, productos y funciones de cuya existencia se beneficia la sociedad. Dichas funciones son ***físicas***: regulación del ciclo hídrico superficial y de acuíferos, retención de sedimentos, control de erosión y estabilización microclimática; ***químicas***: regulación de ciclos de nutrientes (retención, filtración y liberación) y descomposición de biomasa terrestre como base de la productividad de los sistemas acuáticos; ***bio-ecológicas***: productividad biológica, estabilidad e integridad de ecosistemas y retención de dióxido de carbono; y ***sociales:*** sistemas productivos y socioculturales (economías extractivas, pesca artesanal, caza, recolección, pastoreo y agricultura en épocas de estiaje), recursos hidrobiológicos y soporte de acuicultura. Algunos humedales sustentan procesos comerciales, tales como la industria del palmito, y la explotación forestal en cativales y guandales. También proveen servicios de recreación, investigación científica y educación (IAvH, 1998).

En los humedales, se presenta una compleja red trófica, producto de su desarrollo evolutivo a través del tiempo y el espacio; la base de tal red se apoya en la existencia de una singular composición florística, situación que resulta atractiva para diversos grupos de fauna silvestre que aprovechan la oferta de refugio y concentración constante de alimento en la zona (Castellanos, 2006). Los ecosistemas de humedal, tienen una fauna y una flora asociada que conforman una comunidad típica para ellos. Los grupos de plantas dominantes para estos sitios son las algas, los juncos (Juncaceae), las totoras (Typhaceae), algunas especies de pastos y ciperáceas, los helechos (incluyendo las especies flotantes de los géneros *Azolla* y *Salvinia*), varias Araceae, las lentejas de agua (Lemnaceae), las chiras (Potamogetonaceae), los buchones y afines (Pontederiaceae), los barbascos (*Polygonum*), las Hydrocharitaceae y los lirios de agua (Nymphaeaceae) y en aguas

rápidas sobresale la familia Podostemonaceae[12]. Por su parte, bajo los criterios de zoología, las aves son indicadores de estos ecosistemas y se dividen en dos tipos: residentes permanentes y residentes temporales. Los residentes permanentes de los humedales colombianos se caracterizan por ser zambullidores, pelícanos, garzas (*Egretta sp*. *Nycticorax sp.*, las garzas del ganado *B.ibis* son generalistas y por lo tanto no sirven de indicadores de estos ecosistemas), patos, pollas de agua, tinguas, gallitos de ciénagas, entre otros. Adicionalmente las aves migratorias asociadas a los humedales son chorlitos, andarríos, agujetas, gaviotas y patos migratorios; aves que dependen de ambientes acuáticos para su alimentación[13].

Los humedales generalmente presentan una abundancia y diversidad de peces significativamente alta, lo cual los hace altamente productivos, ya que éstos proveen a los peces de un lugar para vivir, donde protegerse de depredadores y un lugar donde reproducirse y criar sus juveniles. Gran cantidad de especies diferentes de peces, algunos de importancia comercial, usan los humedales como sitios de desove y crianza. Como resultado, se ha determinado que la presencia de humedales es de gran importancia para la pesca comercial y recreativa en muchas regiones, pues de los papeles más importantes atribuidos a los ambientes está el relacionado con su función como zonas de desove y crianza para los peces. Esto debido a que los humedales ofrecen a los huevos, larvas y peces jóvenes un ambiente de aguas calmadas y poco profundas, abundante alimento y protección contra depredadores[14].

De las revisiones de la literatura existente sobre humedales y de la consulta de los planes de ordenamiento territorial (POT) de los municipios de Medellín, Rionegro y Guarne en jurisdicción del proyecto Conexión Vial Aburrá-Oriente, que de acuerdo con las competencias de las entidades territoriales, son los municipios y los distritos los responsables de localizar las áreas con fines de conservación y recuperación paisajística e identificar los ecosistemas de importancia ambiental; se tiene que los POT de los municipios de Medellín y Guarne no reportan humedales para la zona de su jurisdicción, y el municipio de Rionegro en su artículo 295 (2011): Disposiciones generales para la categoría de protección, Numeral 3: reporta: (…)"*el Humedal La Morelia, actualmente degradado por efectos del pastoreo, como acción encaminada a reunir y propagar la vegetación de humedales de la Altillanura, Hoy prácticamente desconocida y casi inexistente, y a fomentar el establecimiento de las poblaciones silvestres de mamíferos, aves, anfibios, batracios, peces y crustáceos, en otrora abundantes y diversos*.

*El compromiso del municipio, debe llevar a la recuperación del humedal para transformarlo en un nodo de una red de humedales ubicados en la jurisdicción de Rionegro, entre los cuales destacan por su extensión, los ubicados en el área situada entre el tramo final de la quebrada Pontezuela al tributar aguas al río Pereira: y el Rionegro en el entorno actual del casco urbano. Esta red abarcaría un sin número de charcos, lagos y lagunas construidas y que se proyectan construir por entidades, parceladores y propietarios de fincas de recreo, los cuales juegan un papel importante en el restablecimiento de las poblaciones vegetales y animales de estos ecosistemas. Adicionalmente, la secretaría de desarrollo Agropecuario o la dependencia que haga sus veces, se ocupará de conformar y mantener activa la red como una variante de la red de reservas de la sociedad civil".*

[12] Opepa, 2013
[13] Castellanos, 2006
[14] Gilmore, *et al.* 1995, USGS, 2003; Bridgewater, *et al.*; 2004

El humedal anteriormente referido está por fuera del área de influencia directa del proyecto, se registra por fuentes secundarias, dado que la recopilación de información primaria se hizo a partir de un exhaustivo trabajo de campo, en el cual se lograron identificar aproximadamente 100 ecosistemas diferentes, pudiéndose evidenciar la presencia en la zona de humedales fluviales o ribereños (quebradas), palustres (manantiales, oasis, ojos de agua) y lacustres (lagos, lagunas y ecosistemas artificiales). Sin embargo, dentro de la clasificación, los humedales palustres que incluyen pantanos, zonas inundadas de forma temporal o permanente, deben tener una vegetación y fauna típica. Bajo este concepto, en el análisis de la zona no fue evidenciado ningún cuerpo de agua que pueda incluirse en dicha clasificación. Pues cuando se realizaron los recorridos, así como la colecta y avistamiento de los diferentes grupos de fauna, dentro de las especies de aves migratorias halladas (16), la mayoría fueron reinitas de la familia Parulidae, las cuales no necesariamente están asociadas a ecosistemas acuáticos. La única especie que se encontró como indicador de un ecosistema de humedal fue *S. noveboracensis,* la cual se denomina como "reinita de humedales", sin embargo, esta especie no sólo habita en humedales sino también en bosques donde la humedad es alta y donde no necesariamente se tiene una fauna y flora típica asociada a los ecosistemas de humedal[15].

En relación con las comunidades hidrobiológicas, la diversidad y abundancia para la zona de estudio podría considerarse baja, a lo que se suma la ausencia de especies típicas de humedales palustres, pues todas las especies colectadas son típicas de quebradas de alto gradiente de la zona andina y alto andina; las cuales son de amplia distribución en este tipo de ecosistemas. Adicionalmente, los análisis de ictioplancton no evidenciaron la presencia de zonas de desove o crianza de peces. Todos estos resultados obedecen al deterioro de los cuerpos de agua presentes, producto de las múltiples actividades antrópicas que se desarrollan en la zona. Tampoco se observaron especies vegetales de las familias typhaceae, lemnaceae, potamogetonaceae (entre otras), las cuales son típicas de ambientes de humedales. Las únicas plantas acuáticas que se vieron fueron algunas especies de juncaceae, pero al estar solas en medio de un ambiente de pastos, no sirven de indicadores para determinar la presencia de un ecosistema de humedal.

Así pues, se concluye que en el área de influencia directa no existen ecosistemas de humedal, debido a la definición presentada anteriormente (presencia de zonas inundadas y pantanos con alta productividad biológica, en la cual se presenten asociaciones de fauna y flora típicas de estos ambientes). Esto puede ser corroborado debido a que en primer lugar, la presencia de aves acuáticas fue casi nula y en caso de presentarse corresponden a especies generalistas como las caravanas y las garzas del ganado, las cuales no sirven para indicar la existencia de estos ambientes. En segundo lugar, las especies ícticas y en general todas las comunidades hidrobiológicas halladas fueron especies de amplia distribución y típicas de todo tipo de ecosistemas acuáticos andinos y alto andinos. Y en tercer lugar, la ausencia de una vegetación típica de humedal de las familias mencionadas (excepto algas, helechos y aráceas que también se encuentran en otro tipo de ambientes).

### 3.2.6.9 Nacimientos

Se lograron cartografiar gran cantidad de nacimientos, en las diferentes cuencas, que dan evidencia de la importancia hídrica de esta zona. Los nacimientos se presentan ampliamente distribuidos y sirven como tomas para acueductos veredales, fuentes de agua para cultivos y en

[15] Hilty & Brown, 1986

otros casos son utilizados por los pobladores para uso netamente particular. En todo tipo de litología se encuentran los nacimientos, y de igual forma ocurre con el relieve, ya que desde cerros empinados hasta en cercanías de colinas suaves se pueden encontrar.

#### 3.2.6.10 Dolinas

Son una característica muy importante en el relieve de la zona, ya que son agujeros en el suelo que permiten que el agua de quebradas u otras continúen su cauce por debajo de éste, condicionando así el flujo del agua. Las dolinas son una característica exclusivamente en el sector de la zona constituida por dunita, y donde es importante resaltar, que algunas presentan abundante vegetación en su interior. Aproximadamente cuatro dolinas fueron identificadas claramente en el área de estudio.

#### 3.2.6.11 Tanques de agua

En las zonas donde se identificó gran concentración de cultivos y ganado, fue común encontrar tanques de agua, los cuales son abastecidos por agua de quebradas o nacimientos, lo que permite facilitar riego a los cultivos.

### 3.2.7 Hidrogeología

#### 3.2.7.1 Antecedentes Marco Hidrogeológico

##### 3.2.7.1.1 Estudio Hidrogeológico Año 2.000

A partir de los diferentes Estudios Hidrogeológicos realizados para el proyecto Conexión vial Aburrá – Oriente se distinguen dos sistemas principales de flujo de agua subterránea:

- Un sistema superficial caracterizado por una compleja red de flujo local, la cual se encuentra fuertemente ligada a la topografía y alojada dentro del basamento cristalino alterado. La base de los acuíferos libres coinciden con el tope del basamento rocoso.
- Un sistema profundo de carácter regional que une los Valles de Aburrá y San Nicolás. En este sistema, al interior del basamento se indica la presencia de algunos niveles caracterizados por valores muy bajos de resistividad eléctrica, los cuales se interpretan como señales de presencia de acuíferos confinados y salados.

La excavación del túnel Santa Elena interactúa primero con el sistema profundo regional y luego con el superficial. Para el tramo profundo de este túnel se prevén en las siguientes posibilidades:

- Realizar una conexión hidráulica entre el túnel y la superficie, a través de zonas de fallas subverticales, las cuales se han identificado a lo largo del trazado, aunque con extensión limitada. En total se estima que la extensión de la intercepción de estas zonas no superará los 90 m de longitud.
- Drenar por el túnel agua perteneciente a los acuíferos profundos confinados.

**Modelo hidrogeológico conceptual**

Para la definición del modelo se tomaron en cuenta los datos de conductividad hidráulica de la roca y de los materiales presentes. Esquemáticamente se pueden resumir así:

- Suelos residuales y zonas saprolíticas: permeabilidad comprendida entre $10^{-5}$ y $10^{-8}$ m/s de acuerdo al contenido de arcilla.
- Macizo rocoso: permeabilidad secundaria sujeta en gran medida al grado de fracturación del macizo, tal como se puede observar en la siguiente figura:

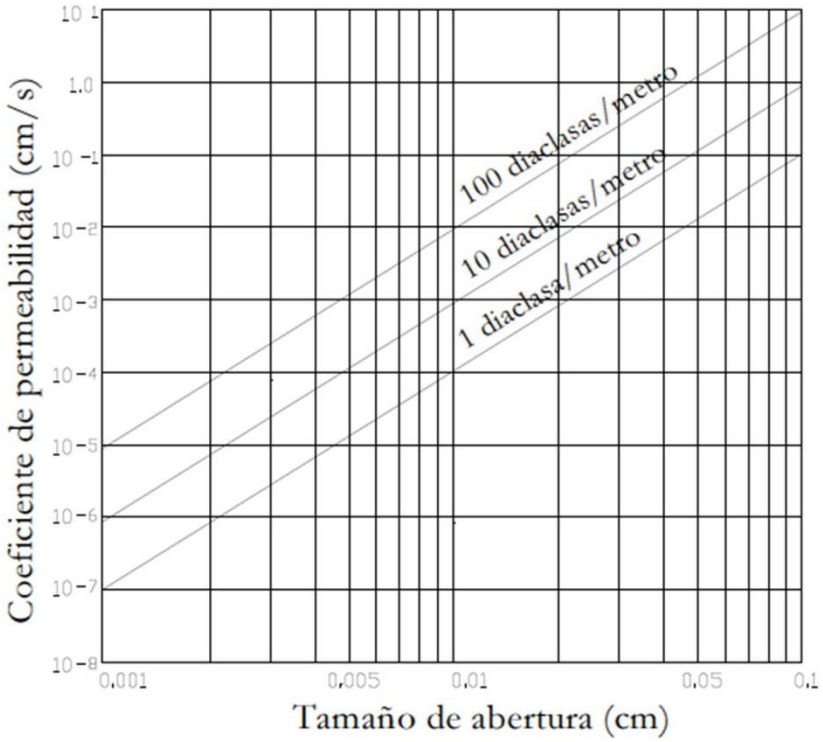



Figura 3-254 - Influencia del espaciamiento y de la apertura de las discontinuidades en la conductividad hidráulica de un macizo rocoso

Los sondeos eléctricos verticales habían evidenciado valores de resistividad muy variables entre el macizo rocoso superficial más fracturado y, por lo tanto, permeable, y el macizo rocoso localizado en la cota del túnel, constituido por roca sana.

Con base en las investigaciones realizadas y en los datos disponibles, se estimó una conductividad hidráulica del macizo rocoso entre $10^{-7}$ y $10^{-8}$ m/s. En cambio las zonas de falla, las cuales presentan unas condiciones de fracturación particular, tienen una permeabilidad mayor del orden de $10^{-5}$ m/s.

La información obtenida fue utilizada de la siguiente manera:

- Interpolación de los datos de la ubicación de los manantiales, las cisternas y los pozos para la realización de la carta piezométrica del nivel freático, la cual sirvió de referencia para prever los eventuales efectos de la construcción del túnel. En esta pieza se reconstruyó la dirección del flujo del agua subterránea y se identificó la zona de recarga (Ver siguiente figura).
- Identificación de las zonas de recarga.

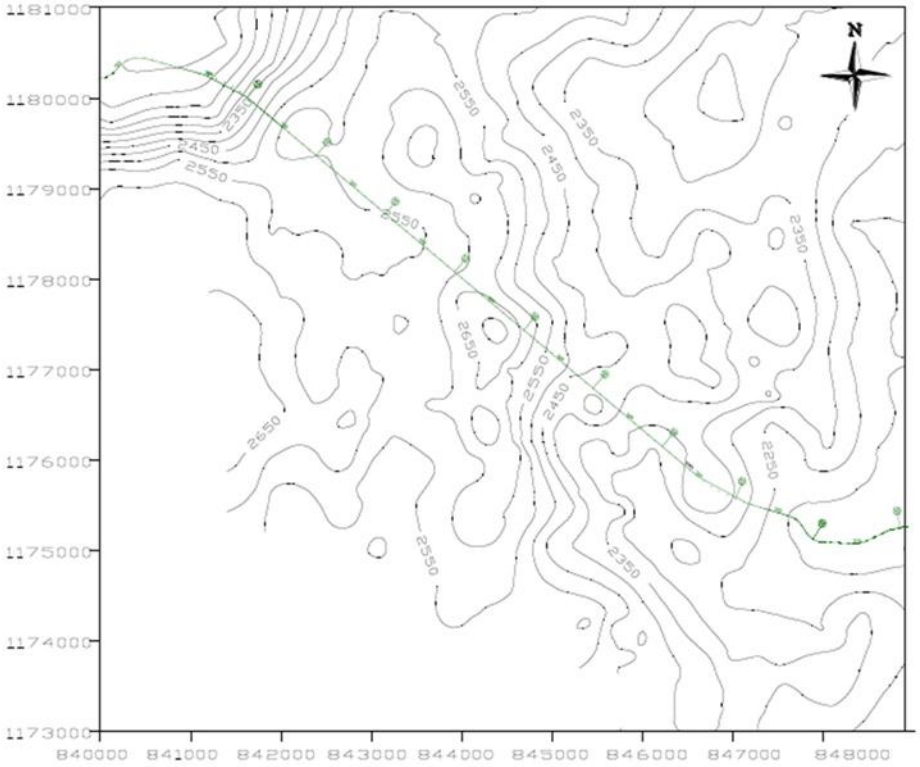



Figura 3-255 - Carta piezométrica del nivel freático

Dado que el autor[16] se enfocó en el análisis de los datos relacionados con el caudal de las fuentes hídricas, tomados después de un periodo de lluvia intensa, se consideró correcto asumirlos como valores máximos. Después de un periodo de 10 días de tiempo seco, se estudiaron de nuevo 15 manantiales con la intención de valorar la variación del caudal en ausencia de lluvias. La siguiente figura muestra una gráfica en la que se confrontan las variaciones de caudal medidas en dichos manantiales.

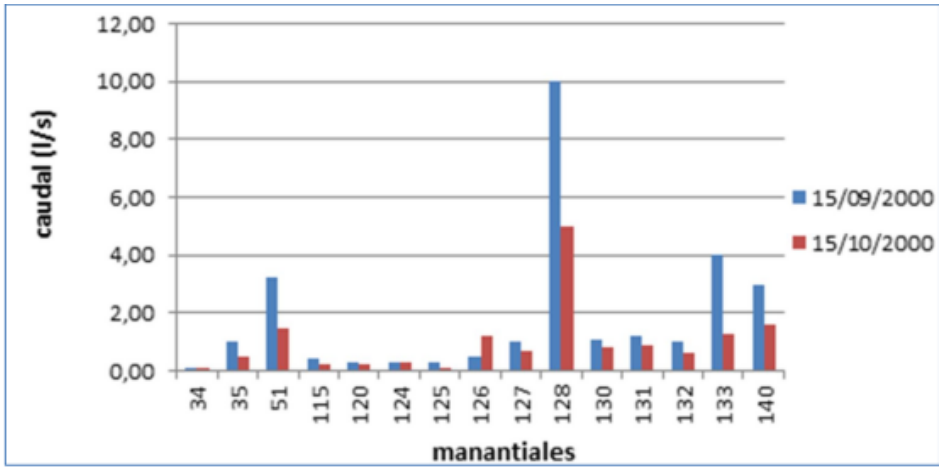



Figura 3-256 - Comparación entre las medidas de caudal (azul: valores máximos después de lluvias intensas; rojo: valores

[16] Hoyos 2.000

mínimos después de un periodo de tiempo seco).

Teniendo en cuenta que el intervalo correspondiente al periodo de tiempo seco es igual a 10 días, se observa que los caudales presentan una drástica disminución, lo cual se evidencia en la fuerte dependencia de la recarga del acuífero respecto a las lluvias y su consecuente infiltración.

De acuerdo con las observaciones hechas por el autor[17], el rol de las lluvias en la recarga de los acuíferos es particularmente significativa en el altiplano de Santa Elena, lo cual también está favorecido por la presencia de depresiones y dolinas. Este sector se afecta frecuentemente por periodos prolongados poco lluviosos que determinan una rápida disminución de los caudales en tiempos breves.

Por otro lado, a escala regional el flujo del agua subterránea depende esencialmente del gradiente y de la discontinuidad de la topografía.

El autor hace referencia a datos de literatura que indican que la composición isotópica del agua de los manantiales y del agua superficial presentan una variación mínima entre el Altiplano de Santa Elena y el fondo del Valle de Aburrá, mientras la composición isotópica del agua de lluvia presenta una variación significativa en función de la cota. La variación mínima de la composición isotópica del agua subterránea en los manantiales y quebradas se interpretó teniendo en cuenta que la mayor parte de la infiltración y recarga regional de los acuíferos respecto al trazado del túnel tiene lugar en el Altiplano de Santa Elena.

### Cálculo del balance hídrico

La valoración del balance hídrico permite calcular la cantidad de agua que interviene en el ciclo de recarga de los acuíferos. Los parámetros utilizados para estimar la infiltración eficaz en el área de estudio fueron (i) precipitación, (ii) escurrimiento y (iii) evapotranspiración.

A partir de los análisis se identificaron cuatro tipos de acuíferos:

- Acuíferos libres en suelo residual: localizados en el Altiplano de Santa Elena y ligados esencialmente a la recarga debida a las lluvias. En este tipo de suelo se consideró posible evidenciar la presencia de acuíferos salados, con base en los valores de resistividad.
- Acuíferos libres en roca fracturada: ubicados en las zonas en donde la cobertura vegetal es muy limitada o simplemente no existe. Su presencia depende claramente del estado de fracturación de la roca. El área de recarga se ubica en el altiplano de Santa Elena y en la cobertura aluvional del altiplano de Rionegro.
- Acuíferos confinados en roca fracturada: Identificados en la parte superior del basamento, cuya resistividad lo definió como roca fracturada. Además, el acuicludo se define por la presencia de limo en las fracturas y se pueden clasificar como de agua dulce o salada de acuerdo a los valores de resistividad medidos. La zona de recarga es alimentada por las fallas que los ponen en comunicación con los acuíferos libres.
- Acuíferos salados: hallados con base en los valores de resistividad muy bajos, los cuales se establecieron en la cobertura aluvional con las investigaciones geoeléctricas.

En los documentos revisados también se estimaron los efectos de la construcción del túnel en relación con los sistemas hidrogeológicos. Los resultados obtenidos fueron los siguientes:

- Permeabilidad media: 3*10-6 m/s

[17] Fabian Hoyos (2000)

- Gradiente hidráulico: 1
- Área de drenaje: 24 m2 (sección del túnel)
- Caudal de drenaje de túnel: 0,8 m3/s

Se concluyó que la construcción del túnel implicaría una alteración de las condiciones locales de circulación del agua subterránea debido al cambio de presiones al interior del macizo rocoso; considerando la construcción del túnel sin revestimiento, los aspectos hidrogeológicos resultaron ser claramente más desfavorables.

En cuanto al abatimiento del nivel piezométrico en el sector del altiplano de Santa Elena, se estimó un valor de 0,5 m en un área próxima al túnel, en caso de que todo el túnel drene agua perteneciente a los acuíferos libres.

Sin embargo, al modificar los parámetros y llevar la permeabilidad a $10^{-6}$ m/s, se previó un caudal de drenaje del túnel menor igual a 0,25 $m^3$/s. Por lo tanto, el impacto sobre los manantiales y sobre el agua superficial era inferior.

Desde el punto de vista geológico, se asumió que el estado de fracturación del macizo rocoso y, consecuentemente, la permeabilidad disminuyen con la profundidad. Así, el caudal calculado con esta hipótesis resultó compatible con una permeabilidad del orden de $6*10^{-7}$ m/s.

El análisis de estos datos permitió concluir que las condiciones más reales incluyen los siguientes parámetros:

- Permebilidad media de $5*10^{-7}$ m/s
- Presencia de 8 zonas de falla con permeabilidad comprendidas entre $10^{-5}$ y $10^{-6}$ m/s

Con tales hipótesis, la infiltración prevista fue estimada a aproximadamente 125 l/s adicionales a los 75 l/s previstos en las zonas de falla, para un total de 200 l/s.

En función de la valoración del impacto de la construcción del túnel sobre el sistema hidrogeológico, se elaboró un modelo físico basado en los datos anteriores. En general, se contempló el cruce de un material caracterizado por baja permeabilidad, sobre el cual se observaron roca fracturada y suelos residuales, a estos fueron asociados los acuíferos libres. En cambio al basamento se relacionaron los acuíferos confinados. Estos dos mantienen comunicación a través de las zonas de falla.

Para valorar el efecto de la construcción del túnel se consideraron varias posibilidades:

- Túnel construido sin ningún tipo de revestimiento
- Túnel parcialmente sin revestimiento
- Túnel en fase de construcción y parcialmente revestido

En la primera opción, el abatimiento del nivel piezométrico resultaba sustancialmente irrelevante en relación con los manantiales y podría haber generado el secado de algunas zonas húmedas (humedales) en los sectores de intercepción con fallas geológicas. En este caso, el flujo de agua salada proveniente de las zonas de falla sería de 100 l/s, del que el 80% sería evacuado por el portal oriental. En el segundo caso se previó la misma condición que para el túnel construido, pero con tiempos diferentes en la aparición de los efectos, en función del tramo de túnel excavado sin revestimiento. En un túnel con un revestimiento parcial en correspondencia con las zonas de

falla, no se estimó ningún tipo de efecto diferente al de la infiltración de un caudal de agua salada menor proveniente de la zona de falla durante la instalación del revestimiento.

Finalmente se formularon otras consideraciones de acuerdo con las características geomorfológicas e hidrogeológicas del sitio:

**Escarpe oriental del Valle de Aburrá**. Se contempló un efecto menor de la construcción del túnel entre el portal occidental y la pk 11+200. Las condiciones de la topografía permitirían una infiltración limitada en este sector considerado como una zona de descarga hidrogeológica. El caudal estimado es de 20 l/s.

**Campo de dolinas de Santa Elena.** En este sector, se considera que las consecuencias de la construcción del túnel prácticamente son nulas. En efecto, los cuerpos hídricos relacionados con las dolinas y la infiltración que se dan a través de los canales subterráneos están ligados a la escorrentía. La ausencia de cuerpos de agua permanentes se ha interpretado como un factor limitante que no permite definir un nivel de referencia para la valoración de los efectos de la construcción del túnel.

**Altiplano de Santa Elena.** En este sector se encuentran algunas zonas de falla, las cuales aportarían caudales de 25 l/s aproximadamente, con infiltraciones totales hasta de 55 l/s de agua eventualmente salada. Téngase en cuenta que el abatimiento del nivel piezométrico no se ha diferenciado de las oscilaciones estacionales de la falda.

**Transición del altiplano de Santa Elena al altiplano de Rionegro:** También en este sector se encuentran zonas de fallas, por lo que se han estimado caudales de 30 a 50 l/s. Las infiltraciones por goteo se han estimado que son menores que 70 l/s, de modo que el total esperado es de 130 l/s de agua eventualmente salada. El abatimiento mayor del nivel piezométrico ha sido identificado en proximidad de la falla la Honda con un valor de 0,45 m aproximadamente.

Los efectos de la construcción del túnel sobre el marco hidrogeológico resultan ser muy bajos. Sin embargo, en las consideraciones finales o conclusiones se ha evidenciado que el potencial drenaje de los acuíferos salinos, a través de las zonas de falla, podría alterar la salinidad de los ríos o quebradas receptoras, con consecuencias negativas en la calidad del agua.

#### 3.2.7.1.2 Informe de diseño – hidrogeología (2009)

El segundo estudio hidrogeológico fue desarrollado en el 2009 por SOLINGRAL S.A., por encargo de INTEGRAL S.A., como un complemento al estudio de impacto ambiental precedente (2000), en el que se dió particular interés al túnel Santa Elena. Las investigaciones desarrolladas incluyeron: la reconstrucción geológica del área mediante fotointerpretación y posterior verificación en el terreno; investigaciones directas e indirectas (sondeos y geoléctrica); levantamientos detallados de los manantiales con pruebas de laboratorio sobre muestras de agua y de suelo; y la caracterización hidráulica de los materiales del subsuelo.

Como parte de la complementación del estudio de impacto ambiental se llevaron a cabo:

- 24 sondeos en algunos de los cuales se ejecutaron pruebas de permeabilidad tipo *Lefranc* y *Lugeon*. Cuatro de estos sondeos estaban relacionados específicamente con la hidrogeología.
- 20 sondeos eléctricos verticales para medir la variación de la resistividad del subsuelo y el grado de saturación del material investigado.

Se tomaron muestras de agua tanto superficiales como subterráneas a las cuales se les calculó la densidad y salinidad, esta última expresada como un porcentaje de cloruros. Los altos índices de salinidad se identificaron solo en 3 muestras de tres puntos muy distantes de la zona del proyecto.

El área del proyecto se caracteriza por una elevada densidad de población. La red hidrográfica superficial se utiliza principalmente para fines agrícolas y domésticos. Por lo tanto se obtiene un detallado relevamiento del terreno para identificar una red significativa de puntos de agua superficial y subterránea. En los alrededores del trazado del túnel se realizó un inventario de los puntos de agua presentes, con medición del caudal de los afluentes de las cuencas principales. A partir de ellos se identificaron (Ver plano AO-VI-HG-001):

- **Zonas húmedas (humedales):** áreas planas saturadas de agua.
- **Manantiales:** están ampliamente distribuidos en las cuencas fluviales e interceptan todas las litologías.
- **Dolinas:** corresponden a sectores deprimidos concentrados en el área de afloramientos de dunitas.
- **Agua estancada:** zona en la cual el agua de lluvia o de escorrentía no alcanzan a fluir a causa de la escasa pendiente o de la presencia de excavaciones en las cuales el agua se estancada.
- **Lagos artificiales o naturales:** caracterizados por su baja salinidad y por su usual cercanía general a manantiales, son muy comunes donde afloran las anfibolitas.
- **Tanques de agua:** se concentran en las zonas agrícolas y ganaderas.
- **Zonas de agua intermitente:** incluyen tanto zonas de captación cercanas a las vías principales como zonas muy lluviosas que forman corrientes momentáneas.
- **Zonas de agua continua:** corresponden a los afluentes de las cuencas principales.

### Modelo hidrogeológico conceptual

El modelo hidrogeológico conceptual fue interpretado a partir de los datos obtenidos de los sondeos geoeléctricos, los cuales permitieron esquematizar el marco litoestratigráfico del subsuelo con base en las características eléctricas de los materiales encontrados. El modelo propuesto puede resumirse así:

Hacia el portal occidental y parte central del túnel, se distinguió un horizonte continuo de alteración, caracterizado por espesores y permeabilidad variable, en cuyo interior se reconocieron dos tipo de suelos:

- Suelos provenientes de la disgregación de la roca metamórfica, tales como anfibolitas, gneis y milonitas con espesor hasta de 45 m. Se distinguieron limos arcillosos en superficie y limos arenosos relativamente más permeables a cotas más profundas. Dado que se tratan de materiales de granulometría esencialmente fina no se consideran como acuíferos.
- Zonas de transición de espesor modesto entre suelo y roca. El basamento, caracterizado por fracturación, fue considerado poco permeable

Hacia el sector de Sajonia, cerca al portal oriental del túnel, se identificaron suelos provenientes de la disgregación de la roca granítica, con espesores hasta de 100 m. El horizonte de alteración también estaba representado por limos superficiales poco permeables pasando en profundidad a una composición más arenosa y permeable. Localmente se podrían reconocer mezclas de rocas frescas en matriz saprolítica de espesor variable. Tampoco se clasificó como un acuífero por el tamaño de las partículas.

Para definir este modelo de referencia se diferenciaron 5 unidades principales descritas en la siguiente tabla:

Tabla 3-106 - Unidades principales para la definición del modelo geológico

| Unidades principales para la definición del modelo hidrogeológico | Parámetros hidrogeológicos | | |
|---|---|---|---|
| | K | $S_s$ | $S_y$ |
| Suelo derivado de la disgregación de la Anfibolita de Medellín, de espesor inferior a 100 m | $6,2*10^{-7}$ m/s | $3*10^{-4}$ | 0,17 |
| Suelo residual derivado del *Stock* de Samarcanda, de espesor inferior a 100 m | $2,3*10^{-6}$ m/s | $3,2*10^{-4}$ | 0,3 |
| Anfibolitas de Medellín | $6,4*10^{-8}$ m/s | $5,7*10^{-7}$ | 0,04 |
| *Stock* de Samarcanda | $9,8*10^{-9}$ m/s | $5,7*10^{-7}$ | 0,04 |
| Zonas de falla principales | $8,5*10^{-7}$ m/s | $3*10^{-4}$ | 0,2 |

Fuente: Solingral 2.009

A escala regional se identificó la presencia de un acuífero libre, con profundidad comprendida entre 2 y 15 m aproximadamente, con un comportamiento muy similar al de la superficie topográfica.

El basamento, en cambio, por presentar permeabilidad secundaria, permite el paso del agua solo a través de las discontinuidades.

En los estudios también se menciona la manifestación de fenómenos de pseudocarsismo en una zona limítrofe al trazado de la obra que involucra principalmente las Dunitas de Medellín. La presencia de esta roca, parcialmente soluble, facilita la formación de flujos de agua al interior de la cavidad y de las fracturas, cuyas dimensiones aumentan por efecto de la disolución.

### Hidrología y precipitaciones

El estudio del área de influencia directa definida en investigaciones precedentes ha identificado 6 cuencas principales (Ver plano AO-VI-HG-001), dentro de las cuales se seleccionaron puntos en los que se midieron los caudales de las quebradas más importantes. Adicionalmente se llevó a cabo un análisis de las lluvias con base en los datos disponibles en las estaciones pluviométricas próximas al área de influencia. Según este análisis, durante el año se presenta una alternancia entre un periodo lluvioso —comprendido entre los meses de abril y noviembre— y uno seco —dado entre diciembre (o enero) y julio.

### Modelo matemático numérico

Con base en los datos disponibles se elaboró un modelo matemático numérico con VMODFLOW, con una extensión superficial de 40,7 $Km^2$, 200 columnas para 200 archivos y celdas de 21,5 m x 47 m. Se representó un estrato horizontal superficial correspondiente al nivel del suelo alterado, presente en toda el área, al cual seguía en profundidad una sucesión de 28 estratos paralelos al primero.

Las condiciones del contorno y los límites inferiores y superiores fueron definidos con base en las características geomorfológicas de las 6 cuencas consideradas.

La valoración de la recarga tuvo en cuenta la infiltración debida a la precipitación y al tipo de suelo, mediante los siguientes parámetros:

- Recarga potencial: 46 mm/año
- Infiltración: 2000 $mm^3$/año

Gracias a la simulación del efecto del flujo entre las quebradas (agua superficial) y el agua subterránea, se encontró que la interacción entre el acuífero y las quebradas se producía a través del lecho de estas últimas, que estaba representado básicamente como un acuífero semiconfinado. El valor de conductancia que se obtuvo al contemplar condiciones de flujo estacionario oscilaba entre 70 y 200 $m^2$/día.

Después de ello, se introdujeron las condiciones de drenaje para valorar el efecto de la construcción del túnel en el macizo rocoso. La conductividad estimada para los drenes fue de 10 $m^2$/día durante la fase de excavación de tramos de 500 m de túnel. Una vez terminada la excavación de cada tramo y comenzando con el siguiente, se previó que la conductividad disminuiría a 5 $m^2$/día considerando la instalación del revestimiento definitivo y la impermeabilización.

Se llevaron a cabo dos simulaciones: una en condiciones estacionarias y la otra en condiciones transitorias. La primera buscaba dar solución a una valoración del flujo de agua subterránea en orden de definir una piezometría inicial. Se asignaron valores de infiltración y conductividad hidráulica específicos para cada tipo de material, con el fin de poder reconstruir niveles piezométricos comparables con aquellos medidos en el terreno. En la segunda simulación, en régimen transitorio, se obtuvo la distribución tridimensional de la superficie piezométrica, variable con el tiempo, y el caudal previsto en el túnel.

La modelación mostró el avance del túnel respecto al nivel piezométrico, evidenciando que después de un periodo de veinte años, los niveles piezométricos permanecerían constantes. De esta manera, se evaluó el descenso de la superficie piezométrica en el tiempo. Se intentó entonces cuantificar el caudal que podría ser drenado dentro del túnel, considerando la subdivisión en tramos de excavación de 500 m y atribuyendo valores de conductividad diferentes en relación con la presencia o no del revestimiento. Los caudales más altos se calcularon en donde se presentaban las zonas fallas.

El caudal total de infiltración en el túnel fue estimado en función del tiempo. El valor máximo obtenido fue de 185 l/s, correspondiente a la etapa final de la construcción del túnel, y se estimó un abatimiento progresivo de los valores de hasta 150 l/s. Además, se especificó que, si bien el caudal total aumentaba con el tiempo, el flujo en los tramos individuales de excavación resultaba más bajo tomando en cuenta la presencia del revestimiento e impermeabilización progresiva de la excavación.

Desde el punto de vista hidrológico se previó un aumento de la infiltración de las quebradas y una disminución de los aportes subterráneos, indicado como el aspecto más relevante y cuantificable entre 80 y 85 l/s.

En conclusión, el suelo que conforma el estrato superficial contiene una cantidad de agua significativa debido a la presencia de terreno saturado y a la débil inclinación de la pendiente que obstaculiza la escorrentía y favorece la persistencia de las condiciones de humedad. A continuación se resumen los datos obtenidos de este modelo matemático:

- **Caudal máximo esperado:** entre 150 y 185 l/s.

- **Disminución real de los caudales de las quebradas:** reducción del flujo de base entre 80 y 85 l/s.
- **Abatimiento máximo de presión:** valores máximos entre 140 y 180 m, en el sector central del túnel.
- **Abatimiento máximo del nivel piezométrico**: entre 50 y 60 m, en el sector central del túnel, correspondiente al sector de máxima cobertura. En el sector intermedio, alejándose del túnel, el abatimiento está comprendido entre 20 y 40 m.

#### 3.2.7.1.3 Implementación del plan de monitoreo y seguimiento por parte del concesionario (noviembre 2012)

A partir del 2010 se encuentran disponibles datos de monitoreo relacionados con el agua superficial (quebradas), medidos por el personal técnico del Concesionario. Han sido monitoreados con frecuencia mensual, los caudales relacionados inicialmente con 42 puntos de control localizados en diferentes quebradas, que sucesivamente se han ido incrementando hasta alcanzar el total actual de 106 puntos de control.

La variabilidad de los caudales medidos en el curso del año depende esencialmente de la alternancia de periodos lluviosos y periodos secos. De igual modo, es importante notar cómo la variación de los caudales durante todo el trienio son contemporáneos y homogéneos en todas las quebradas. Esta evidencia muestra que las cuencas son similares entre sí en términos de extensión (generalmente de pequeña dimensión) y de distribución de la lluvia.

En el año 2010, los caudales mayores se registran en los meses de enero, junio y septiembre, probablemente relacionados con los periodos de mayor precipitación, en correspondencia con los puntos 8C, 11C, 23C y 29C, los cuales se encuentran ubicados en las quebradas San Pedro, Santa Elena y Santa Elena Cascada, en correspondencia del tramo inicial del túnel Santa Elena (portal occidental). Las magnitudes de caudal de las quebradas cambian drásticamente en periodos cortos, incluso después de un mes, lo que evidencia su alta dependencia de las lluvias. Con frecuencia los caudales calculados durante los meses secos se reducen a la mitad respecto a los periodos lluviosos.

Tabla 3-107 - Caudales de las corrientes superficiales identificadas en el techo del túnel

| ESTACION | Ubicación | Q max | Qmin |
|---|---|---|---|
| 1C | 270 m aguas arriba del portar oriental del túnel sobre la cuenca de la quebrada Salazar | 290,6 | 34,4 |
| 2C | Pequeño afluente por margen derecha de la quebrada Salazar, 300 m aguas arriba del 1C | 17,4 | 1,2 |
| 3C | Pequeño afluente de la quebrada Salazar por margen izquierda, 1km aguas arriba del portal oriental del túnel | 115,0 | 12,0 |
| 3CA | | 186,9 | 29,0 |
| 4C | Pequeño afluente de la quebrada Salazar por margen izquierda, 350 m aguas abajo del 3C | 25,2 | 1,2 |
| 5C | 1.3 km aguas arriba del portal sobre el cauce principal de la quebrada Salazar | 97,2 | 13,9 |

| ESTACION | Ubicación | Q max | Qmin |
|---|---|---|---|
| 6C | Pequeño afluente por margen izquierda de la quebrada El Yarumo, abajo del peaje | 26,0 | 0,5 |
| 7C | Afluente por margen derecha de la quebrada El Yarumo en la cuenca media alta | 361,6 | 25,0 |
| 8C | Cauce principal de la quebrada San Pedro, 100 m aguas arriba de la desembocadura de la quebrada Santa Elena | 500,0 | 29,5 |
| 9C | Afluente por margen derecha de la quebrada Santa Elena, 220 m aguas abajo del casco urbano y 230 m aguas arriba de la vía Santa Elena (obra hidráulica vía veredal) | 110,0 | 0,5 |
| 10C | Cauce principal de la quebrada El Placer en la obra hidráulica de cruce de la vía Santa Elena, 200 m antes de llegar al desvio de la vereda El Plan | 41,3 | 4,6 |
| 11C | Cauce principal quebrada Santa Elena, en el pontón de acceso a la finca de Corantioquia | 1.300,0 | 95,3 |
| 12C | Afluente por margen derecha de la quebrada Santa Elena, medida sobre la obra hidráulica de la vía al Plan, 170 m después de las partidas | 63,5 | 0,8 |
| 13C | 500 m aguas arriba de la medida del 12C | 14,0 | 1,5 |
| 14C | 750 m aguas arriba de la medida del 10C, sobre el mismo afluente | 40,0 | 2,2 |
| 15C | Cerca a la desembocadura de la quebrada Las Torres a la Santa Elena por la margen derecha | 40,0 | 1,5 |
| 16C | Sobre la quebrada Las Torres, 75 m aguas arriba de su desembocadura en la Santa Elena. En la obra de cruce de la vía Santa Elena | 20,0 | 0,9 |
| 17C | Cauce intermitente en la Vereda El Plan, el cual termina en una dolina | 46,0 | 0,0 |
| 18C | Cabeceras de un pequeño afluente de la quebrada Santa Elena (por margen izquierda) en inmediaciones de la Vereda El Plan | 7,0 | 0,0 |
| 19C | Parte alta de un afluente de la quebrada San Pedro, por su margen izquierda | 150,0 | 0,4 |
| 20C | 40 m antes de la desembocadura de una quebrada a la Santa Elena, por su margen izquierda. Esta quebrada se ubica 280 m aguas arriba del puente de la vía a El Plan | 114,0 | 7,7 |
| 21C | 430 m aproximadamente aguas arriba del punto 20C | 14,2 | 0,4 |
| 22C | 330 m aguas arriba del punto 21C | 240,0 | 2,4 |
| 23C | Quebrada Santa Elena, 240 m aguas arriba del puente de la vía a El Plan sobre la quebrada Las Torres. | 982,5 | 108,4 |

| ESTACION | Ubicación | Q max | Qmin |
|---|---|---|---|
| 24C | 300 m aguas arriba de la vía Santa Elena, sobre la quebrada Las torres | 20,0 | 0,3 |
| 25C | Q. BOCANA | 75,3 | 0,8 |
| 26C | Q. YARUMO (ARRIBA) | 132,8 | 34,2 |
| 27C | . YARUMO (Frente a cantera) | 413,1 | 46,8 |
| 28C | Q. LA AGUADITA | 187,3 | 1,0 |
| 29C | Q. SANTA ELENA (Cerca a Portal) | 1.311,0 | 4,8 |
| 30C | Q. BIZARRA | 116,3 | 0,0 |
| 31C | Q. LA ESPADERA KM3+980 | 697,2 | 5,7 |
| 32C | Q. EL CHOCHO KM3+300 | 1,9 | 0,1 |
| 33C | Q. LA SALADA O MEDIA AGUA | 20,0 | 0,3 |
| 34C | Q. EL SEMINARIO (BLOQUERA) | 47,6 | 0,3 |
| 35C | Q. LOS CAUNCES (CR 6AB) | 15,4 | 0,3 |
| 36C | Q. LA PASTORA | 56,0 | 15,2 |
| 37C | AFL. DER Q. LA SALAZAR Jorge Hincapie | 29,2 | 6,5 |
| 38C | A 40M PUENTE SANTA ELENA | 30,0 | 2,1 |
| 39C | Q. LA ESPADERA cerca al nacimiento | 58,5 | 0,1 |
| 40C | KM 3+080 Med-Santa Elena | 5,5 | 0,8 |
| 41C | Quebrada plazoleta portal salida | 15,4 | 5,9 |
| 42C | KM DESEMBOCADURA DE QUEBRADA | 58,6 | 1,1 |
| 43C | ACUED. C. HUMBERTO ARANGO | 1,2 | 1,0 |

A continuación se indican algunos gráficos en los cuales se observa la variabilidad del caudal en función del tiempo en los años 2010, 2011 y 2012.

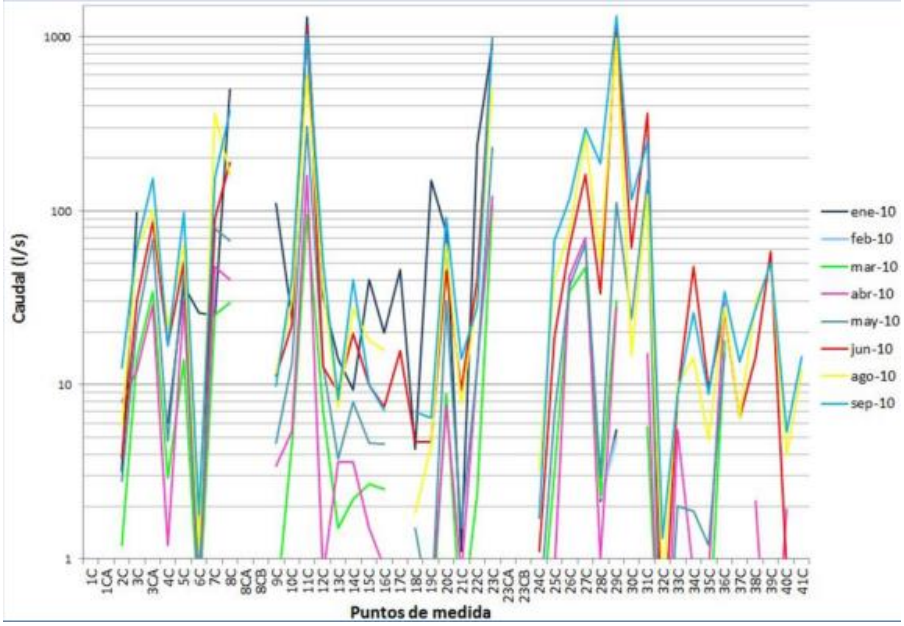



Figura 3-257 - Gráfico del caudal del agua superficial en función del tiempo (año 2010). Escala logarítmica

En el año 2011, los caudales mayores se registraron en los meses de mayo y noviembre en correspondencia con los puntos 11C, 23C, 27C, 29C y 31C, localizados en las quebradas Santa Elena, El Yarumo, Santa Elena, Cascada y Espadera.

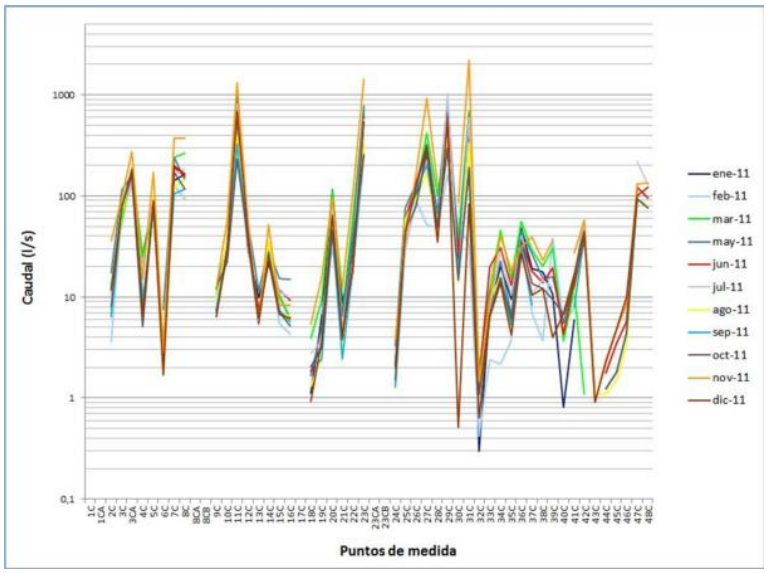



Figura 3-258 - Gráfico del caudal de agua superficial en función del tiempo (año 2011).

En el año 2012, los caudales mayores se registraron en los meses de abril y mayo en correspondencia con los puntos 11C, 23C, 29C, y 31C, localizados en las quebradas Santa Elena, Cascada y la Espadera.

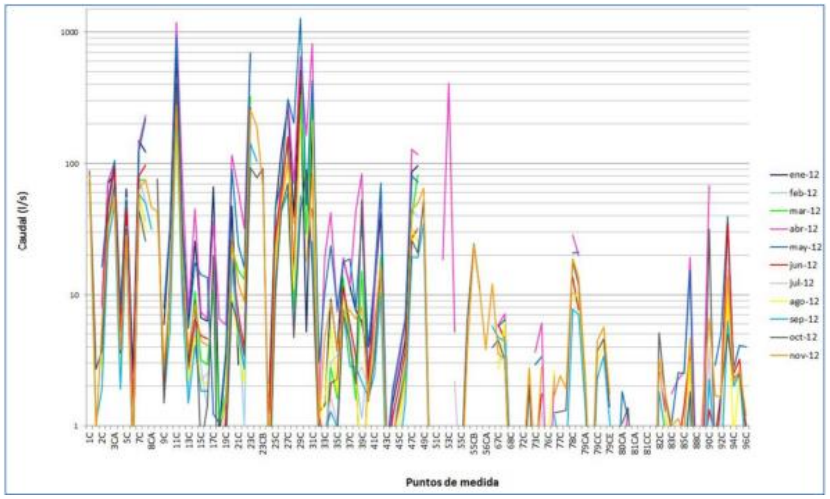



Figura 3-259 - Gráfico del caudal de agua superficial en función del tiempo (año 2012).

### 3.2.7.2 Modelo hidrogeológico conceptual

Este modelo se describe con detalle en el mapa hidrogeológico correspondiente al Anexo 3-3 del presente informe, el cual incluye los túneles Seminario y Santa Elena, y en dos perfiles hidrogeológicos hechos a lo largo del eje de los túneles antes mencionados.

El modelo hidrogeológico es coherente con la interpretación geológica del proyecto presentada en el año 2010, integrado con los datos resultantes de las investigaciones llevadas a cabo en el año 2013, ya sea por el Concesionario como por el Consorcio Geodata, que han confirmado en gran parte el modelo geológico de referencia pero también han determinado algunas modificaciones del mismo reflejadas en el perfil hidrogeológico de los túneles Seminario y Santa Elena. Específicamente, las nuevas investigaciones que han permitido esta complementación son las siguientes:

- Investigación geofísica mediante la aplicación del método de tomografía eléctrica, el cual ha contribuido a redifinir la cobertura cuaternaria superficial, evidenciando una discontinuidad general del acuífero libre presente en estos terrenos.
- Investigación geofísica profunda aplicando el método audiomagnetotelúrico (AMT), a través del cual se ha evidenciado la presencia de amplias zonas de alteración, zonas de falla y/o intensa fracturación presentes en el macizo rocoso profundo.
- Litología de los sondeos realizados entre el año 2009 y 2013.

#### 3.2.7.2.1 Propiedades hidráulicas de los complejos hidrogeológicos

Con el fin de medir la permeabilidad de los complejos hidrogeológicos que caracterizan los Túneles Seminario y Santa Elena, se ha llevado a cabo una serie de pruebas de permeabilidad en correspondencia con aljibes existentes, así como en pozos, piezómetros y perforaciones construidos específicamente para este fin. Estas pruebas ejecutadas complementan las pruebas de permeabilidad realizadas en estudios previos, los cuales se resumen en la siguiente tabla:

Tabla 3-108- Valores de permeabilidad tomados de los estudios previos al presente estudio complementario. Se incluyen pruebas tipo lugeon y pruebas tipo Lefranc

| Código de perforación | Prof. Total (m) | Litotipo | Pruebas Lefranc (Prof. m) | Pruebas Lugeon (Prof. m) | Ensayos de laboratorio (Prof. m) | Permeabilidad (m/s) | Túnel de referencia |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| AO-H-P-01 | 30,1 | Suelo residual de anfibolita | | | 6,7 - 7,2 | 6,80 E-08 | Santa Elena |
| | | Suelo residual de anfibolita | | | 9,1 - 9,6 | 9,50 E-08 | |
| | | Suelo residual de anfibolita | | | 14 - 14,5 | 1,00 E-07 | |
| AO-H-P-02 | 30,45 | Suelo residual de anfibolita | | | 4,9 - 5,4 | 2,80 E-08 | |
| AO-H-P-03 | 30,3 | arena (no recupero) | 0-25,80 | | | 1,41E-06 | |
| | | arena (no recupero) | 3,10-5,10 | | | 4,32E-07 | |
| | | arena (no recupero) | 3,10-5,10 | | | 1,44E-07 | |
| | | arena (no recupero) | 7,00-10,05 | | | 3,34E-06 | |
| | | limo arcilloso y arenoso | 11,80-15,30 | | | 8,73E-06 | |
| | | limo arcilloso y arenoso | 27,30-30,30 | | | 3,39E-05 | |
| AO-H-P-04 | 30,05 | limo arcilloso y arenoso | 3,10-5,10 | | | 2,59E-06 | |
| | | limo arcilloso y arenoso | 3,10-5,10 | | | 7,20E-07 | |
| AO-H-P-04 | 30,05 | limo arcilloso y arenoso | 12,55-15,55 | | | 4,23E-07 | Santa Elena |
| | | limo arcilloso y arenoso | 12,55-15,55 | | | 3,17E-07 | |
| | | limo arcilloso y arenoso | 17,45-20,45 | | | 7,41E-07 | |
| | | limo arcilloso y arenoso | 22,55-25,55 | | | 7,41E-07 | |
| | | limo arcilloso y arenoso | 22,55-25,55 | | | 6,35E-07 | |
| | | Suelo residual de anfibolita | | | 10,1-10,6 | 1,80E-08 | |
| | | Suelo residual de anfibolita | | | 17,1-17,6 | 7,40E-08 | |
| AO-TB-P-01 | 30,05 | Díque aplitico | | | 6,5-7,5 | 3,20E-08 | Seminario |
| AO-TB-P-07 | 30,1 | Suelo residual de gabro | | | 8,7-9,3 | 3,70E-08 | |
| AO-TS-P-02 | 150 | Anfibolitas | | 65,3-67,7 | | 5,20E-08 | Santa Elena |
| | | Anfibolitas | | 79,7-82,1 | | 3,91E-07 | |

| Código de perforación | Prof. Total (m) | Litotipo | Pruebas Lefranc (Prof. m) | Pruebas Lugeon (Prof. m) | Ensayos de laboratorio (Prof. m) | Permeabilidad (m/s) | Túnel de referencia |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Dunitas y peridotitas | | 98-100,4 | | 8,06E-08 | |
| | | Dunitas y peridotitas | | 108-110,4 | | 9,49E-08 | |
| | | anfibolitas | | 124,7-127,1 | | 4,16E-08 | |
| | | anfibolitas | | 136,6-139,9 | | 3,25E-08 | |
| AO-TS-P-03 | 151 | Arena | | | 43,4-46,4 | 1,50E-06 | |
| | | Arena | | | 52,4-55,4 | 3,80E-07 | |

En particular, se ejecutaron:

- Veinte (20) pruebas de permeabilidad tipo Lugeon en correspondencia con dos sondeos que interceptaron el macizo rocoso que será atravesado por el túnel Santa Elena. Uno de ellos alcanzó la cota del túnel en profundidad.
- Ocho (8) Pruebas de bombeo en Aljibes y pozos/piezómetros localizados en correspondencia con los terrenos de cobertura del túnel Santa Elena.
- Dos (2) pruebas de permeabilidad tipo Lefranc en correspondencia con piezómetros que interceptaron los terrenos de cobertura del Túnel Seminario y alcanzaron la cota del túnel en profundidad.

Los resultados de estas pruebas se relacionan en la siguiente tabla:

Tabla 3-109 - Resultados Pruebas hidráulicas Ejecutadas por Geodata

| Túnel de Referencia | Unidad Geológica | Prueba (Código) | Tipo | Transmisividad T (m2/s) | Conductividad K (m/s) | Coeficiente de Almacenamiento S | Ce (l/s/m) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Santa Elena | Anfibolitas de Medellín | PB-01 | Aljibe | 5,55E-05 | 1,01E-05 | 5,48E-02 | 0,23 |
| Santa Elena | Anfibolitas de Medellín | PB-02 | Aljibe | 2,93E-05 | 5,47E-06 | 5,07E-02 | 0,13 |
| Santa Elena | Anfibolitas de Medellín | PB-03 | Aljibe | - | - | - | 0,14 |
| Santa Elena | Anfibolitas de Medellín | PB-03 Prueba 2 | Aljibe | - | 5,97 E-6 | - | - |
| Santa Elena | Gneis Milonítico de Sajonia | PB-04 | Aljibe | 2,44E-06 | 2,10E-07 | 5,97E-01 | 0,07 |
| Santa Elena | Anfibolitas de Medellín | ING-PER-DES-03 | Piezómetro | - | - | - | - |
| Santa Elena | Stock de Samarcanda | ING-PER-DES-04 (Prueba 1) | Piezómetro | 2,08-E-5 | 6,94 E-6 | 5,67 E-4 | - |

| Túnel de Referencia | Unidad Geológica | Prueba (Código) | Tipo | Transmisividad T (m2/s) | Conductividad K (m/s) | Coeficiente de Almacenamiento S | Ce (l/s/m) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Santa Elena | Stock de Samarcanda | ING-PER-DES-04 (Rep. Prueba 1) | Piezómetro | 2,05E-05 | 6,48E-06 | 4,08E-04 | - |
| Santa Elena | Stock de Samarcanda | ING-PER-DES-05 (Prueba 1) | Piezómetro | 1,35 E-4 | 4,51 E-5 | 6,55 E-3 | - |
| Santa Elena | Stock de Samarcanda | ING-PER-DES-05 (Rep. Prueba 1) | Piezómetro | 1,23 E-4 | 4,10E-05 | 7,81 E-3 | - |
| Santa Elena | Gneis Milonítico de Sajonia | ING-PER-LUG-01 | Piezómetro | - | Desde 1,70E-06 hasta rechazo | - | - |
| Santa Elena | Stock de Samarcanda | ING-PER-LUG-02 | Piezómetro | - | Desde 2,30E-06 hasta rechazo | - | - |
| Seminario | Gabro de San Diego | ING-PER-DES-01 | Piezómetro | | (5,39E-8 - 4,3E-8) | | |
| Seminario | Gabro de San Diego | ING-PER-DES-02 | Piezómetro | | (5,40E-8 - 3,8E-8) | | |

Los valores de permeabilidad obtenidos en estas pruebas han sido correlacionados con la litología y el contexto geológico del área y por lo tanto asociados con los complejos hidrogeológicos descritos a continuación.

### 3.2.7.2.2 Parâmetros hidráulicos de los complejos hidrogeológicos

Las pruebas de permeabilidad ejecutadas y descritas con detalle se pueden analizar detalladamente en el Anexo 3-3-– Estudio Hidrogeológico.

Los parámetros hidraúlicos de las unidades hidrogeológicas que se prevé serán interceptadas por los túneles Seminario y Santa Elena son los siguientes:

- Capacidad específica (Ce in l/s/m)
- Trasmisividad (T in $m^2/s$)
- Conductividad hidráulica (K en m/s)
- Coeficiente de almacenamiento (S)

Tabla 3-110 - Parámetros hidráulicos de los diferentes unidades o complejos hidrogeológicos que se prevé serán interceptados por los túneles Seminario y Santa Elena

| Complejo hidrogeologico $Q_1$ | | | | | | Túnel de referencia |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Pruebas de bombeo | | | | | | |
| Prof (m) | K (m/s) | Ce (l/s/m) | T ($m^2/s$) | S | aljibe | |
| 4,97-9,84 | 5,97E-06 | - | - | - | PB-03 | Santa Elena |

| Complejo hidrogeologico $Q_1$ | | | | | | Túnel de referencia |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Pruebas de bombeo | | | | | | |
| 2,99-8,5 | 1,01E-05 | 0,23 | 5,55 E-5 | 5,48 E-2 | PB-01 | Santa Elena |

| Complejo hidrogeológico $Q_3$ | | | | | | Túnel de referencia |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Ensayos de laboratorio | | | | | | |
| Prof (m) | K (m/s) | | | | AO-H-P-01 | Santa Elena |
| 6,7-7,2 | 6,80E-08 | | | | | |
| 9,1-9,6 | 9,50E-08 | | | | | |
| 14-14,5 | 1,00E-07 | | | | | |
| Pruebas Lefranc/Ensayos de laboratorio | | | | | perforación | |
| Prof (m) | K (m/s) | | | | AO-H-P-04 | Santa Elena |
| 3,10-5,10 | 2,59E-06 | | | | | |
| 3,10-5,10 | 7,20E-07 | | | | | |
| 12,55-15,55 | 4,23E-07 | | | | | |
| 12,55-15,55 | 3,17E-07 | | | | | |
| 17,45-20,45 | 7,41E-07 | | | | | |
| 22,55-25,55 | 7,41E-07 | | | | | |
| 22,55-25,55 | 6,35E-07 | | | | | |
| 10,1-10,6 | 1,80E-08 | | | | | |
| 17,1-17,6 | 7,40E-08 | | | | | |
| 8,7-9,3 | 3,70E-08 | | | | AO-TB-P-07 | Seminario |
| Pruebas Lefranc | | | | | | |
| Prof (m) | K (m/s) | | | | Perforación | |
| 37-40 | 4,30E-08 | | | | ING-PER-DES-01 | Seminario |
| 27-30 | 3,80E-08 | | | | ING-PER-DES-02 | |
| Pruebas de bombeo | | | | | | |
| Prof (m) | K (m/s) | Ce (l/s/m) | T ($m^2$/s) | S | aljibe | |
| 2,72-8,08 | 5,47E-06 | 0,13 | 2,93 E -5 | 5,07 E-2 | PB-02 | Santa Elena |
| 2,07-13,25 | 2,10E-07 | 0,07 | 2,44 E-6 | 5,97 E-1 | PB-04 | |

| Complejo hidrogeologico $Q_4$ | | perforación | Túnel de referencia |
|---|---|---|---|
| Pruebas Lefranc | | | |
| Prof (m) | K (m/s) | | |
| 0-25,80 | 1,41E-06 | AO-H-P-03 | Santa Elena |

| Complejo hidrogeologico $Q_4$ | | | | perforación | Túnel de referencia |
|---|---|---|---|---|---|
| Pruebas Lefranc | | | | | |
| Prof (m) | K (m/s) | | | | |
| 3,10-5,10 | 4,32E-07 | | | | |
| 3,10-5,10 | 1,44E-07 | | | | |
| 7,00-10,05 | 3,34E-06 | | | | |
| 11,80-15,30 | 8,73E-06 | | | | |
| Ensayos de laboratorio | | | | perforación | |
| Prof (m) | K (m/s) | | | | |
| 43,4-46,4 | 1,50E-06 | | | AO-TS-P-03 | Santa Elena |
| 52,4-55,4 | 3,80E-07 | | | | |
| Pruebas de bombeo | | | | piezómetro | |
| Prof (m) | K (m/s) | T ($m^2$/s) | S | | |
| 5,36-20,04 | 6,94E-06 | 2,08-E-5 | 5,67 E-4 | ING-PER-DES-04 | Santa Elena |
| 5,62-20,04 | 6,48E-06 | 2,05E-05 | 4,08E-04 | | |
| 6,14-15,7 | 4,51 E-5 | 1,35 E-4 | 6,55 E-3 | ING-PER-DES-05 | |
| 6,28-15,7 | 4,10E-05 | 1,23 E-4 | 7,81 E-3 | | |

| Complejo hidrogeológico $Q_5$ | | | Túnel de referencia |
|---|---|---|---|
| Pruebas Lefranc | | | |
| Prof (m) | K (m/s) | perforación | |
| 27,30-30,30 | 3,39E-05 | AO-H-P-03 | Santa Elena |

| Complejo hidrogeológico 1 | | | Túnel de referencia |
|---|---|---|---|
| Ensayos de laboratorio | | | |
| Prof (m) | K (m/s) | perforación | |
| 6,5-7,5 m | 3,20E-08 | AO-TB-P-01 | Seminario |
| Pruebas Lugeon | | | |
| Prof (m) | K (m/s) | perforación | |
| 65,3-67,7 | 5,20E-08 | AO-TS-P-02 | Santa Elena |
| 79,7-82,1 | 3,91E-07 | | |
| 98-100,4 | 8,06E-08 | | |
| 108-110,4 | 9,49E-08 | | |
| 124,7-127,1 | 4,16E-08 | | |

| Complejo hidrogeológico 1 | | | Túnel de referencia |
|---|---|---|---|
| Ensayos de laboratorio | | | |
| Prof (m) | K (m/s) | perforación | |
| 136,6-139,9 | 3,25E-08 | | |
| 77,8-78,8 | R | ING-PER-LUG-01 | |
| 81,8-82,8 | 6,50E-07 | | |
| 98,8-99,8 | R | | |
| 100,8-101,8 | R | | |
| 104,7-105,7 | R | | |
| 109,7-110,7 | R | | |
| 114,7-115,7 | R | | |
| 120-121 | R | | |
| 125-126 | R | | |
| 130-131 | R | | |
| 135-136 | R | | |

Fuente: Datos procedentes de la ejecución de pruebas de permeabilidad obtenidas en estudios previos y durante el desarrollo del estudio complementario del componente hidrogeológico realizado por Geodata.

Los valores de permeabilidad obtenidos en estas pruebas han sido correlacionados con la litología y el contexto geológico del área y por lo tanto asociados con los complejos hidrogeológicos descritos a continuación.

### 3.2.7.2.3 Descripción de los complejos hidrogeológicos

Los litotipos previstos a lo largo del trazado de la obra subterránea han sido reagrupados en complejos hidrogeológicos con el fin de hacer una previsión hidrogeológica en correspondencia con el trazado de los túneles. La subdivisión de los terrenos y de la roca en complejos hidrogeológicos se llevó a cabo tanto para el túnel Seminario como para el túnel Santa Elena.

En la siguiente tabla se reporta la leyenda hidrogeológica con la cual se esquematizan los complejos hidrogeológicos, donde se diferencia la cobertura cuaternaria de los acuíferos en roca; para cada uno de ellos se indica, además, el intervalo de variación de la permeabilidad y se especifica el tipo de permeabilidad.

Las pruebas de permeabilidad a disposición para definir los intervalos de permeabilidad de los diferentes complejos hidrogeológicos, derivan del conjunto de pruebas ejecutadas en las diferentes etapas del proyecto y en el curso de la campaña de investigaciones realizada en el presente estudio complementario durante los meses de febrero a abril del 2013, descritos en el informe 2 y resumidos en la tabla 30.

En las páginas siguientes se muestra la leyenda de los complejos hidrogeológicos, descritos sistemáticamente en la columna de la izquierda, se les asigna un código, y se definen las características de permeabilidad media.

La permeabilidad media del complejo es esquematizada utilizando la clasificación de la "*Association Française des Travaux En Souterrain* (AFTES), propuesta con una norma de 1992,

frecuentemente utilizada por los proyectistas de túneles en Europa y en América del Sur. Esta clasificación establece 4 clases de permeabilidad crecientes desde K1 hasta K4, como se ilustra en la siguiente tabla:

Tabla 3-111 - Leyenda Hidrogeológica

| Complejo hidrogeológico | | Clase de permeabilidad (AFTES, 1992) | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | K1 | K2 | K3 | K4 |
| | | Muy bajo-bajo | Bajo-medio | Medio-alto | Alto-muy alto |
| Codigo | Nombre e descripción | <1E-8 | 1E-8>K>1E-6 | 1E-6>K>1E-4 | >1E-4 |
| 1 | **Anfibolitas de Medellin - TRaM:** anfibolita da grano medio a fino compuesta por anfibol y feldspato, foliada y micropiegada, diabasas y esquistos verdes con micropliegues y cizalliamiento. Se caracterizan por presentar y grado de alteración alto; **Migmatitas de Puente Peláez - TRmPP:** roca hibrida en parte ígnea en parte metamórfica; **Gneis de La Ceja - TrnLC:** rocas relacionadas con un metamórfismo de tipo retrógado y caracterizadas por una marcata foliación; **Gneis milonitici di Sajonia - JKgrnS:** gneis de grano medio, foliado, compuesto por feldspato, cuarzo, micas y anfiboles y micropiegado; **Gabro de San Diego - IIA(KgSD):** roca poco fracturada y meteorizada, de resistencia dura, con alteraciones locales de discontinuidad, se presentan diques centimétricos y venillos | | | | |
| 2 | **Dunitas de Medellin - JKuM:** roca muy fracturada y localmente serpentinizada de color verde oscuro. En presensencia de pseudo-carsismo las dunitas pueden llegar a permeabilidad alta; **Metabasitas del Picacho - JKmbP:** rocas che van desde gabros con textura predominante ígnea aunque con mineralogia metamórfica-hasta verdaderas anfibolitas | | | | |
| 3 | **Zona de cabalgamiento - Kmce:** paquete de rocas compuesta por una gran diversidad de rocas como: milonitas, esquistos, cataclasitas y por metagabros, dunitas y anfibolitas afectadas tectónicamente | | | | |
| 4a | **Batolito Antioqueño - KcdA:** rocas granodiorítica cuya formación se asocia con el Stock de Las Estancias y el Stock de Samarcanda; **Stock de Las Estancias - KcdE:** cuerpos intrusivos interpretados como apófisis del batolito; **Stock de Samarcanda - KcdS:** granito y granodioriti, compuestos por micas, feldspatos sódicos y cuarzo principalmente | | | | |
| 4b | **Stock de Samarcanda meteorizado:** granito y granodioriti muy meteorizados en el contacto tra anfibolitas y Stock de Samarcanda | | | | |
| 5 | **Gabro de San Diego fracturado:** roca fracturada caracterizada da resistividad eléctrica da 300 a 800 Ωm aproximadamente | | | | |
| Q1 | **Depósitos cuaternari detriticós e gravitazionales - Qd+Qf:** se destacan acumulación de grandes bloques en matriz limoso-arenosa e limoso-arcillosa (Qd) e depositos conexos a debris-flow (Qf); **Depósitos antrópicos - Qll:** se vinculan a la ampliación de centros urbanos | | | | |
| Q2 | **Depósitos aluvionales y aluvionales/torrenciales - Qal+Qat:** son producto de fenómenos de inundación de las quebradas o los cursos de agua | | | | |
| Q3 | **Suelos residuales/transición suelo-saprolito - IB/IB-IC:** limi e limi arcillosi de color pardo rojizo, amarillento y verde grisaceo, humedad media y baja consistencia | | | | |
| Q4 | **Saprolito - IB-IC/IC:** arena, arena limosa e limo arenoso pardo amarillento a grisaceo localmente suelto con algunas bandas limo arcillosas, envolviendo fragmentos rocosos intensamente meteorizados y fracturados | | | | |
| Q5 | **Transición suelo-roca - IC/IIA:** roca fracturada y alterada, se presentan venas calcareas, fracturas antiguas selladas y algo de fracturamiento mecánico. Presencia de fuerte oxidación y meteorizacion de minimales rodeadas de una matriz saprolitica limo arenosa | | | | |

Fuente: Geodata – 2.013

Tabla 3-112 - Descripción de la permeabilidad de acuerdo a la norma AFTES

| Clase | Permeabilidad en m/s | Descripción |
|---|---|---|
| K1 | $< 10^{-8}$ | de muy baja a baja |
| K2 | $10^{-8}$ à $10^{-6}$ | de baja a media |
| K3 | $10^{-6}$ à $10^{-4}$ | De media a alta |
| K4 | $> 10^{-4}$ | da alta a muy alta |

Fuente: AFTES 1992

La atribución del grado de permeabilidad a las formaciones geológicas previstas en el túnel se basa en los siguientes datos de entrada:

- Pruebas hidrogeológicas en perforaciones, que permiten definir el campo de variabilidad de la permeabilidad equivalente de cada formación,
- Comparación con otros túneles ya excavados en formaciones similares, de las cuales se conoce el caudal específico.

Para cada complejo hidrogeológico se indica el rango de permeabilidad que se refiere a sus condiciones medias. En los casos en los cuales hay posibilidad de aumentar aún más el grado de permeabilidad, debido a la presencia de zonas de mayor fracturación en el basamento, o de niveles con granulometría más gruesa y por lo tanto más, permeables (p.e. en depósitos cuaternarios), se indica con una flecha la amplitud del incremento.

Los complejos hidrogeológicos identificados se describen a continuación, indicando los litotipos que los conforman y sus características hidrogeológicas típicas.

**Complejo 1**: Este complejo hidrogeológico reagrupa las Anfibolitas de Medellín (TRaM), las Migmatitas de Puente Palaez (TRmpp), el Gneis de la Ceja (TrnLC), el Gneis Milonítico de Sajonia (JKgmS) y el Gabro de San Diego (IIa, KgSD). Todas estas son rocas caracterizadas por valores de permeabilidad de media a baja, equivalentes aproximadamente a $10^{-7}$ m/s a $10^{-8}$ m/s, que pueden localmente incrementarse hasta valores medios a altos (aprox. $10^{-6}$ m/s), si la roca se ve afectada por fracturas o fallas geológicas. El intervalo de permeabilidad aquí propuesto es coherente con los datos disponibles en estudios precedentes (EIA 2009) y en los estudios más recientes llevados a cabo por el Consorcio Geodata (Pruebas Lugeon realizadas en el sondeo ING-PER-LUG-01). Tal complejo hidrogeológico se encuentra presente en el túnel Santa Elena, entre las progresivas aproximadas pK 10+484 y 14+790, pK 17+314 y 18+461. Este complejo hidrogeológico no aplica para el túnel Seminario.

**Complejo 2**: Comprende las Dunitas de Medellín (JKuM) y las Metabasitas del Picacho (JKuM). Las Dunitas, en particular, son rocas caracterizadas por valores de permeabilidad medios a bajos, que pueden verse incrementadas notablemente en presencia de finómenos pseudo-carsicos ligados a la disolución del olivino, hasta alcanzar valores de permebilidad altos a muy altos. Según se deduce de los datos geológicos a disposición, no se prevé que este complejo sea interceptado por el túnel Santa Elena, ni por el túnel Seminario.

**Complejo 3**: Está representado por la falla de cabalgamiento (Kmce), es decir por roca a las cuales se le ha asignado valores de permeabilidad medios a bajos, que pueden verse incrementados en presencia de fracturas o fallas geológicas. Según se deduce de los datos geológicos a disposición, no se prevé que este complejo sea interceptado por el túnel Santa Elena, ni por el túnel Seminario.

**Complejo 4a**: Reagrupa las rocas del Batolito Antioqueño (KcdA, del Stock de las Estancias (KcdE) y del Stock de Samarcando (KcdS). Se trata de rocas intrusivas a las cuales se les ha asignado valores de permeabilidad de bajos a medios, que pueden verse incrementados en presencia de fracturas o fallas geológicas, hasta llegar a asumir valores de permeabilidad medios. El intervalo de permeabilidad aquí propuesto es coherente con los datos disponibles de las investigaciones más recientes llevados a cabo por el Consorcio Geodata (Pruebas Lugeon realizadas en el sondeo ING-PER-LUG-02). Tal complejo hidrogeológico se encuentra presente en el túnel Santa Elena, entre las progresivas aproximadas pK 15+236 y 16+982.

**Complejo 4b**: Vista ya la elevada variabilidad de la permeabilidad que puede asumir el complejo 4a descrito anteriormente, se ha decidido distinguir las zonas meteorizadas del Stock de Samarcanda mediante el complejo 4b. Con base en la información geofísica profunda o sondeos AMT realizados en el 2013 ha sido posible identificar amplias zonas con valores de resisitividad baja en correspondencia con los bordes del Stock y a lo largo del eje del túnel Santa Elena, las cuales se han interpretado como zonas alteradas, fracturadas y/o falladas. A este complejo en particular se le ha asignado un grado de permeabilidad medio. Tal complejo hidrogeológico se encuentra presente en el túnel Santa Elena, entre las progresivas aproximadas Pk 14+792 y 15+236, pk 17+003 y 17+314.

**Complejo 5**: Reagrupa las rocas gábricas fracturadas del Gabro de San Diego, rocas a las cuales se les ha asignado valores de permeabilidad de medios a bajos. Tal complejo hidrogeológico se

encuentra presente en el túnel Santa Elena, entre las progresivas aproximadas PK 5+165 y PK 5+743.

**Complejo $Q_1$**: Depósitos cuaternarios y gravitacionales (Qd+Qf), depósitos antrópicos (QII) a los cuales se les ha asignado valores de permeabilidad de medios a bajos, que pueden verse incrementados en función de la granulometría de los depósitos. El intervalo de permeabilidad propuesto es coherente con los datos disponibles de las investigaciones más recientes llevados a cabo por el Consorcio Geodata (Pruebas de bombeo PB 01 y PB 03).

**Complejo $Q_2$**: Depósitos aluvionales y aluvionales/torrenciales (Qal+Qat) a los cuales se les ha asignado valores de permeabilidad medios, debido a su granulometría generalmente gruesa.

**Complejo $Q_3$**: Suelos residuales, transición suelo-saprolito (IB/IB-IC) a los cuales se les ha asignado valores de permeabilidad de medios a bajos, debido a su composición dominantemente limo-arcillosa. El intervalo de permeabilidad aquí propuesto es coherente con los datos disponibles en estudios precedentes (EIA 2009) y en los estudios más recientes llevados a cabo por el Consorcio Geodata (Pruebas de bombeo PB02, PB04 y en los pozos/piezómetros ING-PER-DES-01 y ING-PER-DES-02). Tal complejo hidrogeológico se encuentra presente en el área de los portales de los túneles Seminario y Santa Elena.

**Complejo $Q_4$**: Saprolito (IB-IC/IC) al cual ha sido asignado valores de permeabilidad de medios a bajos, variables en función de la composición más o menos arenosa de los diferentes suelos de alteración que componen este complejo. Tal complejo hidrogeológico se encuentra presente en el área de los portales de los túneles Seminario y Santa Elena. El intervalo de permeabilidad propuesto es coherente con los datos disponibles en estudios precedentes (EIA 2009) y en los estudios más recientes llevados a cabo por el Consorcio Geodata (Pruebas de bombeo en los pozos/piezómetros ING-PER-DES-04 y ING-PER-DES-05).

**Complejo $Q_5$**: Transición suelo-roca (IC/IIA) al cual se le han asignado valores de permeabilidad medios, variables en función del grado de fracturación de la roca y de la composición granulométrica de la matriz. El intervalo de permeabilidad propuesto es coherente con los datos disponibles en estudios precedentes (EIA 2009). Tal complejo hidrogeológico se encuentra presente en el área de los portales de los túneles Seminario y Santa Elena.

#### 3.2.7.2.4 Condiciones hidrogeológicas esperadas a lo largo de los túneles

En los parágrafos siguientes se presenta las condiciones hidrogeológicas previstas a lo largo de los túneles Seminario y Santa Elena.

Con base en estas previsiones geológicas, ilustradas a continuación, han sido obtenidas las previsiones de caudal drenado por los túneles y de la probabilidad de impacto sobre los manantiales y cursos de agua superficial presentes en superficie, en el área de influencia de los túneles, presentados en los capítulos sucesivos.

##### *3.2.7.2.4.1 Túnel Seminario*

**PK 5+095-5+165**

El perfil hidrogeológico del túnel Seminario prevé en este tramo la intercepción de complejos cuaternarios (Q3, Q4 e Q5) de granulometría variable caracterizada por permeabilidades entre $10^{-5}$ e $10^{-8}$ m/s aproximadamente. Las características hidrogeológicas de estos complejos se han

obtenido por las investigaciones llevadas a cabo en los estudios precedentes[18] y corroborados por las pruebas de permeabilidad tipo Lefranc realizadas por el consorcio Geodata en el desarrollo de las investigaciones del 2013. Los resultados obtenidos se ubican en el rango de permabilidades propuesto para este complejo. Tratándose de la zona de los portales, las coberturas son modestas.

**PK 5+165-5+740**

Este sector del túnel, que representa la porción central, ha sido identificado en el complejo 5 (Gabro de San Diego fracturado). Esta formación ha sido identificada gracias a las investigaciones geofísicas de alta resolución mediante la técnica de tomografía eléctrica, que ha evidenciado a la cota del túnel la presencia de material caracterizado por valores de resistividad verosímilmente correspondientes a roca alteradas y/o fracturada, con características hidrogeológicas de menor calidad respecto a aquellas atribuidas a la roca sana del Gabro de San Diego. Los valores de permeabilidad asignados se ubican dentro del rango de bajo a medio, estimados en el orden de $10^{-6}/10^{-7}$ m/s.

Fueron identificadas cinco estructuras tectónicas, no indicadas en el modelo geológico de referencia, identificadas gracias al perfil geóficos obtenido. Estos elementos, que pueden corresponder a fallas geológicas, así como la eventual presencia de fracturación, pueden representar canales preferenciales de flujo para el agua, que podría ser drenada hasta la cota del túnel.

En el perfil hidrogeológico se ha considerado correcto no reportar el nivel piezométrico de la napa superficial, dado que los datos recopilados durante las investigaciones no evidencian la presencia de un acuífero superficial propiamente dicho. No obstante, no es de descartar que debido a cambios laterales en el tamaño de grano de la cobertura cuaternaria y a la presencia de roca fracturada, puedan existir sectores localmente saturados. Por esta razón se ha considerado prudente estimar la existencia de carga hidráulica y en consecuencia la ocurrencia de un eventual drenaje, durante la fase de excavación, del agua eventualmente presente en acuíferos colgados.

Entre las progresivas aproximadas PK 5+425 y PK 5+745 se observan las mayores coberturas.

**PK 5+740-5+865**

En este sector el túnel intercepta nuevamente el complejo cuaternario (Q5, Q4 e Q3), caracterizado por presentar granulometría variable con valores de permeabilidad característicos entre $10^{-6}$ y $10^{-8}$ m/s aproximadamente. Las características hidrogeológicas de estos complejos han sido obtenidas por las investigaciones llevadas a cabo en los estudios precedentes[19] y corroborados por las pruebas de permeabilidad tipo Lefranc realizadas por el consorcio Geodata en el desarrollo de las investigaciones del 2013.

Tratándose de la zona de los portales, las coberturas son modestas.

#### *3.2.7.2.4.2 Túnel Santa Elena*

**PK 10+330-10+480**

El perfil hidrogeológico del túnel Santa Elena prevé en este tramo la intercepción de complejos cuaternarios identificados como Q3 y Q5, caracterizados por presentar granulometría variable con

[18] EIA (2009)
[19] EIA 2009

valores de permeabilidad comprendidos entre $10^{-5}$ e $10^{-8}$ m/s aproximadamente. Las características hidrogeológicas de estos complejos han sido obtenidas por las investigaciones llevadas a cabo en los estudios precedentes[20] y corroborados por las pruebas de permeabilidad (pruebas de bombeo) realizadas por el consorcio Geodata en el desarrollo de las investigaciones del 2013. En este tramo de excavación se indica la presencia de una superficie piezométrica obtenida de las mediciones realizadas en los piezómetros instalados.

**PK 10+480-14+790**

Este sector del túnel se caracteriza por la presencia dominante del complejo 1, el cual se caracteriza por presentar valores de permeabilidad generalmente bajos, del orden de $10^{-7}$ a $10^{-8}$ m/s, pero con la posibilidad de incrementarse hasta valores medios del orden de $10^{-6}$ m/s cuando se interceptan zonas fracturadas o zonas de fallas. El conocimiento de las características hidrogeológicas de este complejo ha sido obtenido de las investigaciones llevadas a cabo en los estudios precedentes y corroborados por las pruebas de permeabilidad (pruebas Lugeon) realizadas por el consorcio Geodata en el desarrollo de las investigaciones del 2013.

Entre las progresivas aproximadas PK 10+480 y PK 12+255, se señala la presencia de una zona de intensa fracturación que ha sido evidenciada mediante geofísica profunda aplicando la técnica AMT (sondeo audiomagnetotelúricos). A lo largo de este tramo de túnel se han identificado además diferentes fallas geológicas (en las progresivas aprox. PK 10+955 y 11+005, PK 11+275 y 11+540, PK 12+265 y 12+305, PK 12+758 y 12+808, PK 13+745 y 13+795, Pk 14+420 y 14+500). Además de aquellas indicadas en el modelo geológico de referencia han sido agregadas aquellas identificadas con las investigaciones geofísicas profundas. Esta zona, si no es adecuadamente tratada con pre-inyecciones puede llegar a representar canales preferenciales de flujo a través de los cuales puede el agua ser drenada hasta la cota de los túneles. Al tratarse de un sector en el cual se tienen las coberturas más elevadas de todo el trazado del túnel (mayores a 500m), la carga hidráulica asumida es notable, similar a la cobertura topográfica, debido especialmente a la presencia de discontinuidades subverticales.

**PK 14+790-15+235**

Este tramo del túnel se caracteriza por la presencia dominante del complejo 4b (Stock de Samarcanda alterado, fracturado y/o fallado). Esta faja de roca ha sido identificada mediante geofísica profunda aplicando la técnica AMT (sondeo audiomagnetotelúricos), y puede relacionarse con una potencial zona de alteración hidrotermal desarrollada al margen de la intrusión granodiorítica del Stock de Samarcanda. A este tramo de macizo rocoso se le han asignado valores de permeabilidad medios del orden de $10^{-6}$ m/s. Mediante la investigación geofísica profunda se confirma la presencia de la fallas trazadas en el modelo geológico de referencia, entre las progresivas aproximadas entre PK 15+100 y 15+150. Esta zona puede representar también en este caso canales preferenciales de flujo a través de los cuales el agua puede ser drenada hasta la cota de los túneles.

Tratándose de un sector en el cual se alcanzan coberturas muy elevadas, la carga hidráulica asumida es notable, similar a la cobertura topográfica, debido especialmente a la presencia de discontinuidades subverticales

**PK 15+235-16+975**

[20] EIA 2009

Este sector del túnel se caracteriza por la presencia dominante del complejo 4a (ver leyenda hidrogeológica), caracterizado por valores de permeabilidad generalmente bajos a medios, del orden de $10^{-8}/10^{-7}$ m/s, pero con posibilidad de verse incrementados hasta valores del orden de $10^{-6}$ m/s en presencia de zonas fracturadas o falladas. El conocimiento de las características hidrogeológicas de este complejo ha sido obtenida de las pruebas de permeabilidad tipo Lugeon realizadas por el Consorcio Geodata durante las investigaciones del 2013. Los resultados obtenidos se ubican dentro del rango propuesto.

A loa largo de este tramo de túnel se han identificado además varias fallas entre las progresivas aproximadas PK 15+525 y 15+580, PK 16+155 y 16+210, pK 16+730 y 16+975). Adicionalmente a las fallas indicadas en el perfil geológico de referencia fueron agregadas aquellas identificadas a través de las investigaciones geofísicas profundas (AMT). Esta zona puede representar también es este caso canales preferenciales de flujo al interior de los cuales el agua puede ser drenada hasta la cota de los túneles.

La carga hidráulica asumida es aproximadamente igual a la cobertura topográfica.

**PK 16+975-17+315**

Este tramo del túnel se caracteriza por la presencia dominante del complejo 4b (Stock de Samarcanda alterado, fracturado y/o fallado). Esta faja de roca ha sido identificada mediante geofísica profunda aplicando la técnica AMT (sondeo audiomagnetotelúricos) y puede relacionarse con una potencial zona de alteración hidrotermal desarrollada al margen de la intrusión granodiorítica del Stock de Samarcanda. A este tramo de macizo rocoso se le han asignado valores de permeabilidad medios del orden de $10^{-6}$ m/s. Mediante la investigación geofísica profunda se confirma la presencia de las fallas trazadas en el modelo geológico de referencia.

La carga hidráulica asumida es aproximadamente igual a la cobertura topográfica.

**PK 17+315-18+470**

Este sector del túnel se caracteriza por la presencia dominante del complejo 1 (ver leyenda hidrogeológica), caracterizado por valores de permeabilidad generalmente bajos, pero posibles de verse incrementados hasta valores del orden de $10^{-6}$ m/s en presencia de zonas fracturadas o falladas. El conocimiento de las características hidrogeológicas de este complejo ha sido obtenido de las investigaciones llevadas a cabo en los estudios precedentes y corroborados por las pruebas de permeabilidad (pruebas Lugeon) realizadas por el consorcio Geodata en el desarrollo de las investigaciones del 2013.

A lo largo de este tramo de túnel se identificaron además varias fallas entre las progresivas aproximadas PK 17+475 y 17+610 y PK 17+925 y 17+975). Adicionalmente a las fallas indicadas en el perfil geológico de referencia fueron agregadas aquellas identificadas a través de las investigaciones geofísicas profundas (AMT). Esta zona puede representar también es este caso canales preferenciales de flujo al interior de los cuales el agua puede ser drenada hasta la cota de los túneles.

**PK 18+470-18+510**

El perfil hidrogeológico del túnel Santa Elena prevé en este tramo la intercepción del complejo cuaternario Q5, caracterizado por valores medios de permeabilidad. El conocimiento de las características hidrogeológicas de este complejo ha sido obtenido de las investigaciones llevadas a

cabo en los estudios precedentes. En este tramo de excavación se ha indicado la superficie piezométrica, obtenida de las mediciones realizadas en los piezómetros construidos.

#### 3.2.7.3 Balance Hidrogeológico y evaluación de la recarga

En este subcapítulo se presentan los datos de lluvias y temperatura utilizados como base para el cálculo del balance hidrogeológico, así como el método y los resultados del balance mismo junto con la cuantificación de la infiltración media anual en el área interceptada por el trazado de los túneles Seminario y Santa Elena. Esta última representa la recarga de los acuíferos.

La valoración del balance hidrogeológico puede hacerse mediante un cálculo inverso medio, que toma en consideración la morfología del terreno y el promedio de la lluvia que cae sobre la cuenca, que después es verificado mediante mediciones de caudal en los cursos de agua en los puntos de cierre de las cuencas. Para la valoración inversa media, existen diferentes métodos que permiten obtener la escorrentía, como por ejemplo el método Kennessey (1930) y el método SCS (Soil Conservation Service, 1972). Dado que el área en estudio se caracteriza por presentar un contexto dominado por relieves colinado y de altiplanicie, con presencia abundante de cultivos, se ha considerado idóneo aplicar el método Kennessey porque el mismo ha sido desarrollado y aplicado justamente en contextos geomorfológicos similares.

##### 3.2.7.3.1 Jerarquización de la red de drenaje superficial

Con el fin de definir la importancia de los cursos de agua superficiales, en el ámbito del estudio hidrogeológico en objeto, se ha llevado a cabo una clasificación del retículo hidrográfico de acuerdo con el método de Horton (1945), modificado posteriormente por Strahler (1952, 1957).

Tal método prevé la representación de la red de drenaje de acuerdo con una morfología tipo “árbol” o “ramificada”, en la cual los cursos de agua individuales son identificados como segmentos de recta conectados entre sí por nodos de tal forma que cada uno de ellos define una dirección.

De forma simple, la jerarquización de una red hidrográfica puede ser expresada con la asignación de valores numéricos tal como se indica en la figura siguiente.

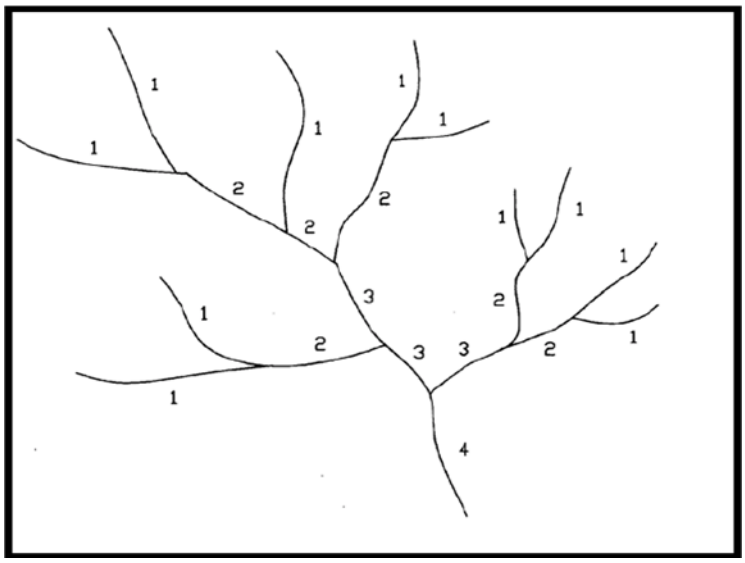



Figura 3-260- Ejemplo de jerarquización de una red hidrográfica según el criterio de Strahler (1952, 1957).

En síntesis, el método prevé lo siguiente:

- A los cursos de agua que representan la fuente de la red hídrica se les asigna el valor 1,
- La confluencia de dos canales de orden 1 conlleva a que la importancia de la red hidrográfica aumente, por lo cual el curso de agua que se genera asume un valor de 2,
- La confluencia de dos canales de orden 2 conlleva a que la importancia de la red hidrográfica aumente, por lo cual el curso de agua que se genera asume un valor de 3.
- La confluencia de un canal de orden inferior con uno de orden superior no conlleva a un cambio en el orden de importancia del curso de agua que se genera. Por ejemplo, la confluencia de una canal de orden 1 con uno de orden 3 no modifica el orden de importancia. Sólo la confluencia de dos cursos de agua de la misma relevancia determina un aumento del orden.

Se procede de acuerdo con esta modalidad hasta que la jerarquización de toda la red sea completada.

En el caso del área interceptada por el trazado de los túneles Seminario y Santa Elena, la metodología ha sido aplicada a las seis cuencas pertenecientes al área de influencia directa del túnel Santa Elena (La Aguadita, Santa Elena, La Cascada, La Honda, El Yarumo, Salazar), y el área de influencia del túnel Seminario. En la siguiente figura se muestra el área en donde se ha llevado a cabo la jerarquización de la red hidrográfica.

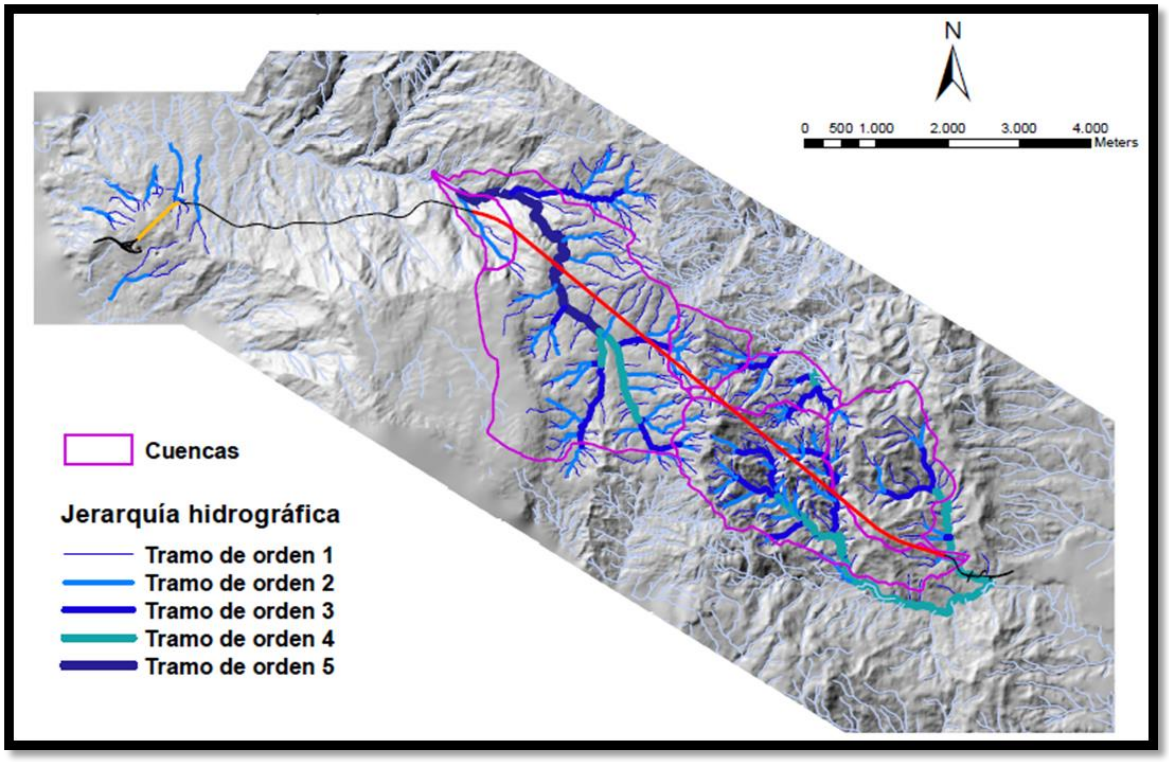



Figura 3-261 - erarquización de la red hidrográfica de las cuencas interceptadas por los túneles Seminario y Santa Elena

En la siguiente tabla se presenta un breve resumen de los datos estadísticos que resultan de este análisis:

Tabla 3-113 - Jerarquización de la red hidrográfica relacionada con los túneles Seminario y Santa Elena

| Túnel | Orden | Tramo (n°) | Longitud (m) | % |
|---|---|---|---|---|
| Santa Elena | 1 | 361 | 77.132 | 58,70 |
| Santa Elena | 2 | 160 | 27.775 | 21,14 |
| Santa Elena | 3 | 88 | 13.841 | 10,53 |
| Santa Elena | 4 | 33 | 8.688 | 6,61 |
| Santa Elena | 5 | 13 | 3.966 | 3,02 |
| *Total Santa Elena* | | *655* | *131.402* | *100,00* |
| Seminario | 1 | 37 | 7.183 | 61,77 |
| Seminario | 2 | 15 | 4.446 | 38,23 |
| *Total Seminario* | | *52* | *11.629* | *100,00* |

Fuente: Consorcio Geodata.

Se observa como en los dos túneles el orden más frecuente de los cursos de agua es 1, igual a aproximadamente el 60% de la longitud total del retículo hidrográfico analizado. El orden que sigue en frecuencia para los dos túneles es 2, equivalente al 20% para el caso del túnel Santa Elena y 40% para el túnel Seminario. En otras palabras, los órdenes de magnitud 1 y 2 representan entre el 80% y 100% del total de la longitud de los retículos hidrográficos aledaños e interceptados por los túneles Seminario y Santa Elena.

Esta clasificación se ha aplicado también a los puntos que se monitorean mensualmente por la Concesión, cada punto ha sido relacionado con el orden de jerarquización del curso de agua correspondiente.

Este resultado es un indicativo de la presencia de un retículo hidrográfico poco evolucionado, con prevalencia de órdenes menores, de importancia modesta, que conforman la morfología colinada en la cual se desarrollan los túneles.

La asociación se ha hecho para un total de 64 puntos, distribuidos de la siguiente manera.

Tabla 3-114 - Jerarquización de 64 puntos localizados sobre cursos de agua superficiales que se monitorean

| ORDEN | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|---|---|---|---|---|---|
| CANTIDAD | 24 | 18 | 12 | 6 | 4 |
| SIGLA | 4C, 6C, 9C, 13C, 15C, 16C, 18C, 19C, 24C, 43C, 50C, 51C, 55C, 70C, 72C, 73C, 74C, 76C, 80CA, 82C, 83C, 84C, 88C, 94C | 2C, 10C, 12C, 14C, 21C, 22C, 28C, 37C, 38C, 41C, 44C, 45C, 46C, 67CA, 76CA, 79C, 81C, 86C | 3C, 3CA, 5C, 8CB, 20C, 47C, 49C, 55CA, 55CB, 56C, 56CA, 78C | 1C, 7C, 8C, 23CB, 26C, 27C | 11C, 23C, 29C, 42C |

Fuente: Consorcio Geodata

Se observa que la mayor parte de los puntos de medición se localizan en cursos de agua de orden 1.

Analizando el caudal medio en cada uno de los puntos antes identificados, se obtiene el gráfico siguiente:

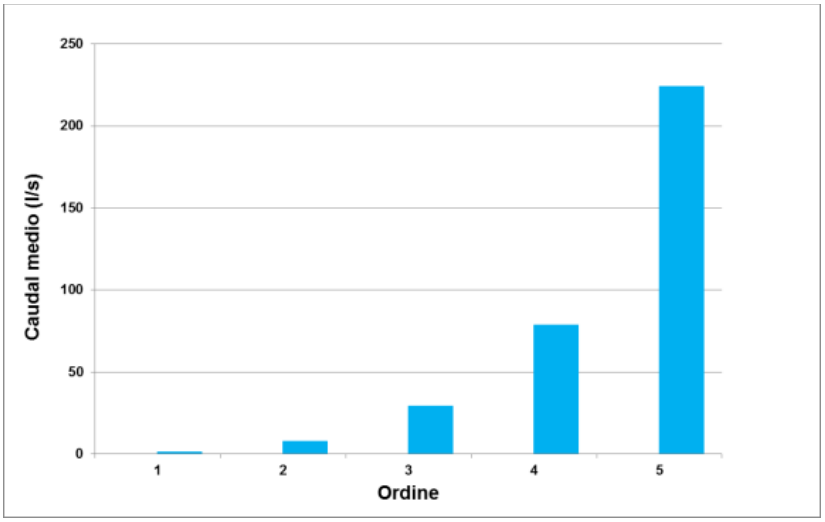



Figura 3-262 - Gráfico de comparación entre el caudal medio medido y el orden de jerarquización del curso de agua correspondiente.
Fuente: Consorcio Geodata

Del grafico anterior se evidencia que el caudal medio aumenta progresivamente, como es de esperar, al crecer el orden de jerarquización.

#### 3.2.7.3.2 Balance hidrogeológico

La metodología aplicada para calcular el balance hidrogeológico inverso medio ha sido definida para hacer frente a un estudio a escala regional, dado que el túnel puede involucrar sistemas de flujo muy vastos. Una vez recopilada y analizada la información de base (datos pluviométricos y de temperatura), han sido procesados y obtenidos los factores de la ecuación del balance hidrogeológico. La ecuación en su forma más simple se puede escribir de la siguiente manera:

$$I = P - Etr – R$$

dónde:

P = Precipitación media anual (m/año)
Etr = Evapotranspiración real media anual (m/año)
R = Escorrentía superficial o escurrimiento medio anual (m/año)
I = Infiltración media anual en el subsuelo (m/año)

Este tipo de balance distingue la componente superficial (R) de aquella subterránea (I), proporcionando así una herramienta para estimar el potencial de recarga de los acuíferos.

En la ecuación 5, la precipitación (P) se mide directamente en los pluviómetros; la evapotranspiración (Etr) se obtiene tomando la temperatura media anual aplicando el método de TURC, mientras que el factor R se ha obtenido a escala regional mediante el método KENNESSEY, ilustrado en el parágrafo precedente.

En las dos tablas siguientes se resumen los parámetros del cálculo del balance hidrogeológico medio anual y los resultados obtenidos en términos de infiltración (I), así como la recarga del acuífero superficial, que corresponde al flujo de infiltración sobre toda la superficie considerada.

$$Recarga = I \cdot S$$

Donde S es la superficie de la cuenca considerada.

##### *3.2.7.3.2.1 Túnel Santa Elena*

Las dos tablas siguientes representan los parámetros del cálculo del balance hidrogeológico medio anual y los resultados obtenidos en términos de infiltración (I) para los dos sectores interceptados por el trazado del túnel Santa Elena. Uno de ellos corresponden al sector occidental, conformado por las Cuencas de Santa Elena y La Aguadita, que tienen una superficie de 9.446.105 $m^2$, y el otro, corresponde al sector oriental, constituido por las cuencas Yarumal, La Cascada, La Honda y Salazar, que en su conjunto tienen una superficie de 9.732.989 $m^2$.

Tabla 3-115 - Valores mínimos, medios y máximos del balance hidrogeológico en las cuencas Santa Elena y La Aguadita

| | P (mm/a) | Etr | R | I | Recarga |
|---|---|---|---|---|---|
| | m/a | mm/a | mm/a | mm/a | l/s |
| Min | 2.119 | 889 | 951 | 279 | 84 |
| Max | 2.966 | 929 | 1.331 | 706 | 212 |

| | P (mm/a) | Etr | R | I | Recarga |
|---|---|---|---|---|---|
| | m/a | mm/a | mm/a | mm/a | l/s |
| Med | 2.459 | 911 | 1.103 | 445 | 133 |

Fuente: Consorcio Geodata

Tabla 3-116 - Valores mínimos, medios y máximos del balance hidrogeológico en las cuencas El Yarumo, La Cascada, La Honda y Salazar

| | P (mm/a) | ETR | R | I | Recarga |
|---|---|---|---|---|---|
| | m/a | mm/a | mm/a | mm/a | l/s |
| Min | 2.119 | 889 | 617 | 613 | 189 |
| Max | 2.966 | 929 | 863 | 1.174 | 362 |
| Med | 2.459 | 911 | 716 | 832 | 257 |

Fuente: Consorcio Geodata

#### *3.2.7.3.2.2 Túnel Seminario*

El cálculo del balance para el Túnel Seminario se ha hecho en correspondencia con el área que incluye la cuenca hidrográfica de la Q xxxx interceptada por el trazado del túnel, la cual tiene una superficie de 405.584 $m^2$.

En la tabla siguiente se resumen los parámetros de cálculo del balance hidrogeológico medio anual y los resultados obtenidos en términos de infiltración (I) y recarga del acuífero superficial (CUAL ACUIFERO), que corresponde al flujo de infiltración sobre toda la superficie considerada

Tabla 3-117 - Valores mínimos, medios y máxmos del balance hidrogeológico en la cuanca interceptada por el Túnel Seminario

| | P (mm/a) | Etr | R | I | Recarga |
|---|---|---|---|---|---|
| | mm/a | mm/a | mm/a | mm/a | l/s |
| Min | 2.119 | 889 | 890 | 340 | 4 |
| Max | 2.966 | 929 | 1.246 | 791 | 10 |
| Med | 2.459 | 911 | 1.033 | 515 | 7 |

Fuente: Consorcio Geodata

Considerando la superficie de la cuenca interceptada por el trazado del túnel Seminario, la recarga total que se acumula es equivalente a un caudal medio de 7 l/s (variable entre 4 y 10 l/s).

### 3.2.7.3.3 Conclusiones sobre el balance hidrogeológico

La recarga de los acuíferos constituye un factor limitante en el cálculo del caudal esperado en el túnel. Admitiendo que la recarga de los sistema de flujo interceptados por el túnel sean todos alimentados por infiltración del acuífero superficial, en principio, el caudal drenado por el túnel no podría exceder la cantidad de agua que se infiltra en las cuencas interceptadas por el trazado de este. En este sentido, el valor de la recarga indica por lo tanto el valor teórico máximo previsible de agua que puede ser drenada por el túnel.

Para el túnel Santa Elena, bajo el supuesto que toda el agua infiltrada en las cuencas sea interceptada por los túneles, los caudales de infiltración estarían en un rango potencial de 273 a

574 l/s, con un promedio de 390 l/s, valores que resultan de la suma de los caudales medios, máximo y mínimos reportados en la tabla anterior. Sin embargo, dado que el túnel intercepta un medio fracturado como es el macizo rocoso y no un medio poroso como es la zona de cobertura (salvo en los portales), es claro que la única posibilidad que existe para que el agua de infiltración llegue a la cota del túnel es a través de fallas o fracturación intensa, por lo que el caudal de esperar en los túneles será menor a los valores antes reportada. Lo relevante del balance hidrogeológico es poder definir una recarga potencial para ingresar al modelo numérico.

Para el túnel Seminario, la recarga total que se obtiene es igual a un caudal promedio de 7 l/s (variable entre 4 y 10 l/s).

En lo que respecta a la valoración de la fiabilidad de la previsión resultante del balance hidrogeológico, es importante tener en cuenta que las series históricas de la lluvia tomadas como referencia son completas y provienen de fuentes confiables. La temperatura ha sido medida en una de las estaciones de referencia. Las tres estaciones climáticas de medición tomadas como referencia se encuentran bien distribuidas y localizadas en contextos geográficos representativos de las zonas examinadas. Además, el método de cálculo del coeficiente de escorrentía, propuesto por Kennessey, ha sido desarrollado en zonas colinadas, con pendientes comprendidas en su mayor parte entre 0°-20°, similares a las presentes en las zonas de influencia de los túneles Seminario y Santa Elena.

En conclusión tomando en cuenta el estado actual de conocimiento y frente a las consideraciones antes expuestas, los valores de infiltración obtenidos deben considerarse confiables para obtener un orden de magnitud de la recarga.

#### 3.2.7.4 Inventario de puntos de agua

Se llevaron a cabo dos inventarios de puntos de agua en épocas de verano e inverno respectivamente. Los dos inventarios se realizaron en zonas aledañas al trazado de los Seminario y Túneles Santa Elena, traspasándose en algunos casos los límites del área de influencia directa establecida para el proyecto.

Los principales objetivos de naturaleza hidrogeológica que se tuvieron para el cubrimiento de la zona objeto de estudio fueron:

- Cubrir la mayor parte de la zona aledaña al trazado de los túneles, sin limitarse a un corredor geométrico específico, con especial énfasis en los puntos de agua cercanos al eje de los túneles.
- Obtener un conocimiento lo más detallado posible del estado actual de los recursos hídricos presentes en el área de influencia de los túneles
- Identificar los puntos de agua localizados en correspondencia con los principales litotipos presentes en la zona. Específicamente se relacionan las siguientes unidades litológicas:
  - ✓ Depósitos de deslizamiento
  - ✓ Depósitos de flujos de lodos y/o escombros
  - ✓ Dunitas de Medellín
  - ✓ Anfibolitas de Medellín
  - ✓ Gneis milonítico de Sajonia
  - ✓ Gabro de San Diego
  - ✓ Stock de Samarcanda

- Identificar los puntos de agua que sirven de abastecimiento a los acueductos localizados en la zona.

La campaña de campo relacionadas con el primer y segundo inventario involucró dos equipos independientes, cada uno de ellos constituido por un geólogo, el líder, y dos ayudantes o vaquianos oriundos del corregimiento de Santa Elena, quienes se movilizaron en vehículos 4x4 con su respectivo conductor, también vecino del sector.

Para el primer inventario la campaña se llevó a cabo desde el 10 de diciembre de 2012 hasta el 19/01/2013, con una complementación realizada del 1 al 09 de febrero de 2013. Toda la campaña se realizó en época prevalentemente seca y dio lugar a un censo de 382 puntos distribuidos de la siguiente manera:

- 255 puntos de agua subterránea (manantiales, pozos y aljibes)
- 18 puntos de agua subterránea representados en piezómetros
- 109 puntos de agua superficial localizado sobre cursos de agua superficial

El segundo inventario de puntos de agua realizado en invierno, se realizó de la siguiente manera:

- 244 puntos de agua subterránea representados en manantiales, pozos y aljibes que habían sido identificados en la campaña anterior.
- 27 puntos de agua subterránea representados en manantiales que surgieron durante la época de lluvias. Estos puntos de agua son adicionales a los registrados en la campaña anterior.
- 18 puntos de agua subterránea representados en piezómetros identificados en la campa anterior.
- 7 puntos de agua subterránea representados en piezómetros adicionales a los registrados en la campaña anterior.
- 53 puntos de agua superficial localizados sobre cursos de agua superficial.

Para la ejecución del primer y segundo inventario cada equipo de trabajo contó con la siguiente instrumentación:

- Recipientes de volumen conocido para efectuar las correspondientes mediciones de caudales
- Sonda piezométrica
- GPS
- Equipos HANNA INSTRUMENTS, modelos HI 98120, HI 98129 y HI 98130, resistentes al agua, con carcasa completamente sellada a la humedad y diseñados para flotar.

Desde el punto de vista hidrogeológico los principales parámetros medidos en cada punto censado fueron:

- Caudal de los manantiales y quebradas. El 100% de las mediciones de caudal pertenecientes a manantiales y el 85% de las mediciones de caudal pertenecientes a las quebradas se hicieron con método volumétrico. El 15% de las mediciones de caudal en quebradas, realizadas con estimación de secciones, será corroborado con molinete en época de verano.
- Niveles freáticos en pozos, aljibes y piezómetros. La medición de estos niveles se hizo con sonda piezométricos.

- Conductividad eléctrica del agua (µs/cm), pH y sólidos totales disueltos (SDT). Medidos con sondas multiparamétrica[21]. Todas las temperaturas de pH y conductividad son automáticamente compensadas por temperatura. El instrumento cuenta con calibración de fábrica; en campo se estableció un control de la calibración con soluciones normalizadas provenientes del mismo fabricante del instrumento. Por otro lado, la calibración del pH se hizo con frecuencia diaria, mientras que la de la conductividad se realizó con frecuencia semanal. Las calibraciones rutinarias se hicieron en los sitios de muestreo.
- ORP (mV), medido con una sonda de ORP HANNA INSTRUMENTS, modelo HI 98120. Su sensor de temperatura expuesto provee un rápido tiempo de respuesta y su cercanía garantiza la exacta compensación de temperatura en las lecturas. El instrumento viene calibrado de fábrica.

En el Informe Hidrogeológico anexo 3-3, se reportan los puntos de agua recopilados durante el primer inventario. Los datos han sido registrados en el formato FUNIAS y los puntos han sido ingresados en una base de datos preparada específicamente para este proyecto, la cual se entrega junto con la Geodatabase respectiva e integran los anexos del Estudio Hidrogeológico.

En la siguiente figura se reporta un gráfico que representa los diversos tipos de puntos censados:

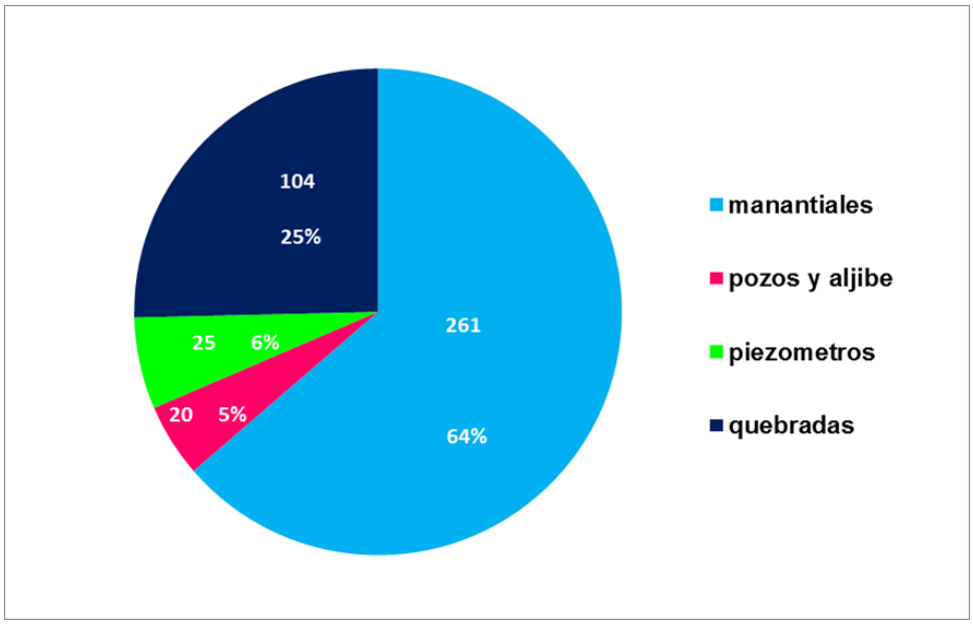



Figura 3-263 - Gráfico que representa los diferentes tipos de puntos de agua censados

La discriminación de los puntos de agua mostrados en la figura anterior respecto a los túneles Seminario y Santa Elena, es la siguiente:

- De los 261 manantiales reportados, 9 de ellos se relacionan con el túnel Seminario, los manantiales restantes fueron encontrados en la zona de influencia del túnel Santa Elena.
- Los 20 pozos y aljibes reportados, todos se relacionan con el túnel Santa Elena. En correspondencia con la zona de influencia del túnel Seminario no se encontraron pozos ni aljibes.

[21] HANNA INSTRUMENTS, modelos HI 98129 y HI 98130

- De los 25 piezómetros reportados, 2 de ellos corresponden al túnel Seminario, los piezómetros restantes se localizan en la zona de influencia del túnel Santa Elena.
- De los 104 puntos de control localizados sobre cursos de agua superficial, reportados en la figura anterior, 6 de ellos se relacionan con el túnel Seminario, los puntos de control restantes se localizan en la zona de influencia del túnel Santa Elena.

De lo anterior es evidente la escasez de fuentes hídricas en el área de influencia del túnel Seminario.

Un resumen de los datos del inventario se presenta en las tablas que conforman el Anexo 2 del Estudio Hidrogeológico que se encuentra en el Anexo 3-3. Estos datos son analizados a través de gráficos de correlación entre los distintos parámetros medidos en el terreno, como caudal y principales datos físico – químicos, entre los cuales están la conductividad eléctrica en µS/cm con compensación a 25°C, la mineralización total (SDT) en mg/l y potencial de oxidoreducción (ORP).

Como se observa en el gráfico siguiente, casi la totalidad de los caudales medidos en los manantiales tienen valores muy bajos, por debajo de los 2 l/s, tanto en época de verano como en invierno, lo cual es indicativo de una circulación poco profunda, presente en los depósitos cuaternarios y terrenos de alteración del basamento rocoso.

Los mayores caudales se desarrollan a lo largo del Túnel de Santa Elena en correspondencia de algunos cursos de aguas superficiales. Estos valores representan una pequeña parte del total de medidas realizadas (<15%).

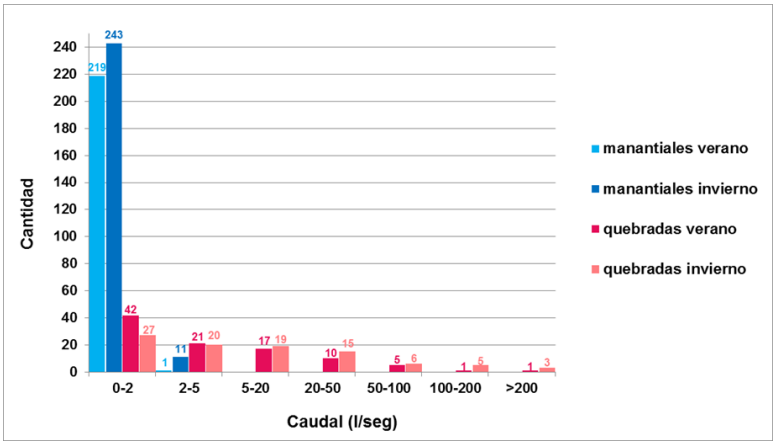



Figura 3-264 - Gráfico que representa los caudales medidos

De acuerdo al análisis realizado en el Estudio Hidrogeológico Anexo, es claro ver que el agua muestreada durante los dos inventarios corresponde a agua poco mineralizada o agua mineral. La conductividad más alta (TDS > 160 mg/l) se encuentran presentes en el sector NW del trazado del Túnel Santa Elena, fuera del área interceptada por los dos túneles objeto de este estudio, en correspondencia con el lado opuesto al corredor del tramo vial que será construido a cielo abierto (Ver Anexo 3.3). En particular, en este tramo la conductividad más elevada ha sido medida en la quebrada denominada La Salada (ASP_025), igual a 2012 µS/cm en época de verano y 2342 µS/cm en época de invierno (aprox. 1600 mg/l). Sin embargo, con base en los datos geológicos e hidrogeológicos hoy disponibles, no se prevé que esta agua rica en sales minerales pueda afectar la excavación de las obras subterráneas y los acuíferos eventualmente interceptados por los dos túneles objeto del presente estudio complementario (Túneles Seminario y Túnel Santa Elena).

Otro factor de correlación ha sido analizado relacionando la conductividad eléctrica con la cota o altitud en m.s.n.m de cada punto muestreado. Tomando en consideración el agua poco mineralizada y mineral, en ninguno de los dos inventarios se encontró una correlación clara entre los dos parámetros, aunque si se nota como el agua con conductividad más baja y menos mineralizada, se ubica en las cotas más altas, mientras que los valores más altos de conductividad se encuentran restringidos a las cotas más bajas. La falta de una variabilidad apreciable de la conductividad eléctrica entre manantiales y cursos de agua superficial, indica una estrecha correlación entre la circulación hídrica subterránea y aquella superficial.

Otras consideraciones pueden hacerse teniendo en cuenta el gráfico *"box plot"*, que muestra para cada formación geológica la distribución estadística de los puntos medidos. En la siguiente figura (medición realizado en época de verano), se representa el percentil 50 del valor de conductividad eléctrica (cuadrático) y el rango comprendido entre 5° y 95° (lineal). Parece evidente la diferencia de conductividad del agua perteneciente a las Metabasitas del Picacho (ASP_024 y ASP_031), más mineralizada, probablemente a causa de su composición mineralógica más soluble.

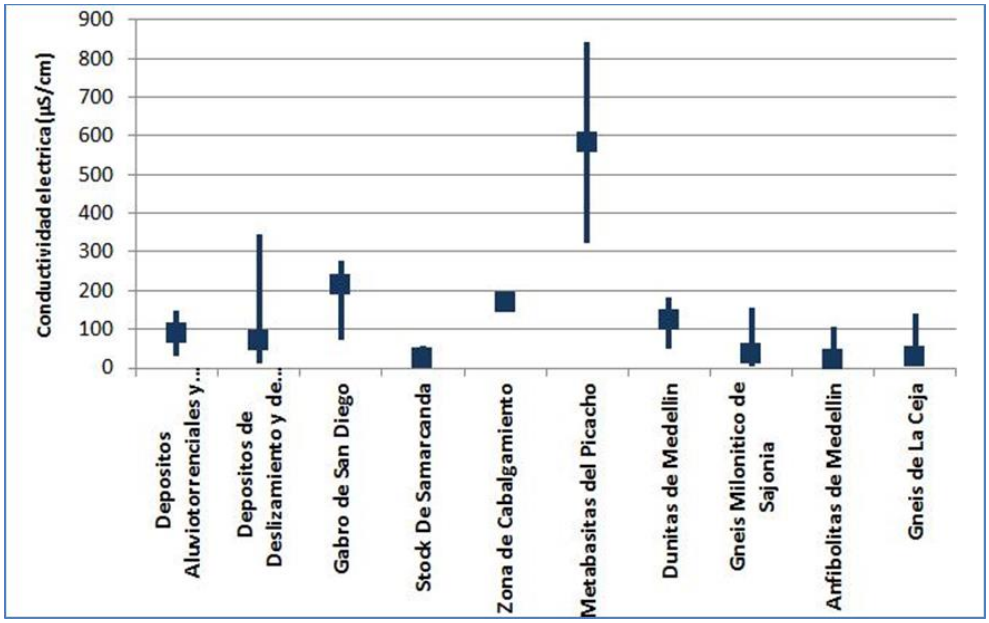



Figura 3-265 - Box-plot de la conductividad eléctrica (µS/cm a 25°C) en relación con los correspondientes litotipos. Es evidente el percentil 5°, 50° y 95°
Fuente: Consorcio Geodata

Los valores típicos de los litotipos considerados son:

Tabla 3-118 - Valores de los litotipos considerados

| Litotipo | 95 percentile | 5 percentile | 50 percentile |
|---|---|---|---|
| Depósitos Aluviotorrenciales y aluviales | 146,5 | 28,8 | 88,5 |
| Depósitos de Deslizamiento y de flujos de lodos y/o escombros | 345,2 | 11,7 | 70 |
| Gabro de San Diego | 276,5 | 72,0 | 213,0 |
| Stock De Samarcanda | 58,8 | 8,0 | 25,0 |
| Zona de Cabalgamiento | 177,4 | 153,6 | 168,5 |
| Metabasitas del Picacho | 841,3 | 323,8 | 582,5 |
| Dunitas de Medellín | 181,7 | 49,6 | 123,5 |
| Gneis Milonítico de Sajonia | 156,1 | 3,0 | 36,5 |
| Anfibolitas de Medellín | 105,2 | 8,0 | 22,0 |

| Litotipo | 95 percentile | 5 percentile | 50 percentile |
|---|---|---|---|
| Gneis de La Ceja | 139,4 | 15,8 | 30,0 |

Fuente: Consorcio Geodata

Los valores reportados en la figura anterior son confirmados con los datos obtenidos durante el inventario realizado en época de invierno.

Otras consideraciones se puedan hacer a través de los gráficos de correlación entre el parámetro ORP (Oxidation Reduction Potential) y el pH. El potencial de oxido-reducción indica la tendencia del agua a adquirir electrones y por lo tanto a ser reducida. Valores negativos de ORP indican la presencia de un ambiente reductor, que puede ser relacionado con agua profunda o aguas estancadas en las cuales ha sido consumido el oxígeno. Por ejemplo, la "eutrofización" del agua superficial es un proceso que implica la presencia de agua reducida. El pH indica a su vez la escala de medición del carácter ácido o básico del agua, que varía entre 1 y 14.

El gráfico siguiente muestra la correlación entre dos parámetros en las mediciones hechas en época de verano e invierno respectivamente, diferenciando entre agua subterránea (manantiales, pozos, aljibes y piezómetros) y cursos de aguas superficiales. El gráfico muestra que el agua subterránea en verano y en invierno presenta valores de ORP muy positivos. Esta evidencia sugiere la presencia, en general, de agua bien oxigenada y oxidada, y sistemas de flujo rápidos para el agua subterránea.

Adicionalmente, el agua subterránea muestra valores de OPR más positivos en invierno respecto a aquellos registrados en verano. Agua más oxidada en la estación lluviosa podría indicar una mayor velocidad del flujo de agua y una menor permanencia en el acuífero en esta estación caracterizada en general por presentar mayores precipitaciones. Esta evidencia implica un deterioramiento de la condición de vulnerabilidad del agua subterránea en invierno, con particular referencia a las numerosas captaciones domésticas presentes en la zona de influencia de los túneles, particularmente del túnel Santa Elena.

El círculo verde evidencia el agua con valores de ORP negativos. Estos corresponden al agua subterránea muestreada en la mayor parte de los piezómetros y en un pozo (AST-036, medición de invierno). Se distinguen también dos mediciones sobre los cursos de agua superficial (ASP-005 e ASP-050), caracterizados por valores e ORP negativos.

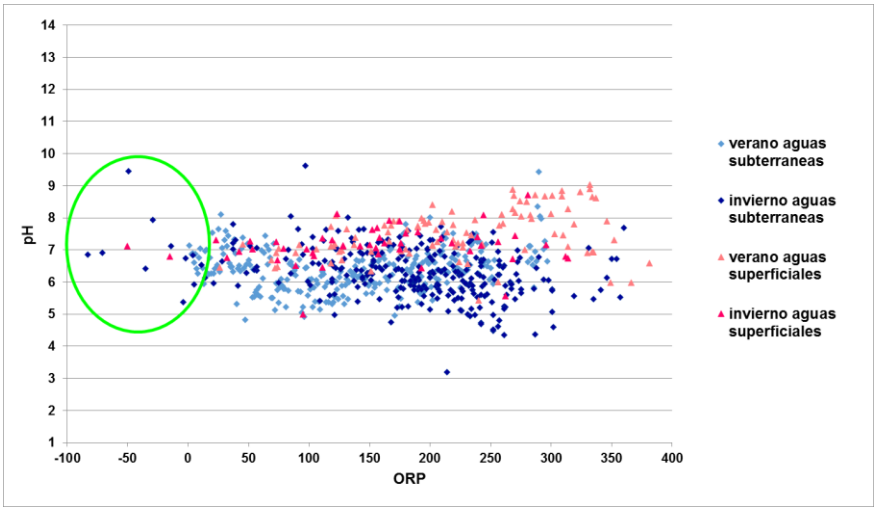



Figura 3-266 - Gráfico de correlación entre ORP y pH de los puntos de agua censados en verano e invierno respectivamente. El círculo verde indica el agua con valores de OPR negativos
Fuente: Consorcio Geodata

### 3.2.7.5 Comportamiento de la superficie piezométrica

Con el objeto de valorar la morfología de la napa superficial y cuantificar las oscilaciones estacionales del nivel piezométrico, se llevaron a cabo dos campañas de medición de niveles entre los meses de diciembre del 2012 a mayo del 2013, en la temporada de verano en enero-febrero, y en la temporada de invierno en abril-mayo.

Con base en estas mediciones fueron elaboradas dos cartas piezométricas, que pueden ser tomadas como referencia para las condiciones de carga hidráulica y dirección de flujo en invierno (Ver Estudio Hidrogeológico Anexo).

Según los análisis de precipitaciones realizados en el Estudio Hidrogeológico anexo, el comportamiento estacional de las lluvias medias mensuales medidas en las estaciones localizadas en inmediaciones del área de influencia de los túneles durante un periodo veintianual, muestran dos períodos lluviosos, alternados con dos períodos menos lluviosos. En particular, los dos máximos lluviosos aparecen durante los meses de abril-mayo (máximo absoluto) y octubre (máximo relativo) y los dos mínimos se ubican en los meses de enero-febrero (mínimo absoluto) y julio-agosto (mínimo relativo).

#### 3.2.7.5.1 Niveles piezométrico medidos

La red de mediciones de los niveles piezométricos está constituida por 18 piezómetros a lo largo del túnel Santa Elena y dos piezómetros a lo largo del túnel Seminario, estos últimos en proximidad con los portales. En el Anexo 4 del Estudio Hidrogeológico (Anexo 3-3) se indica la ubicación de los piezómetros.

Tabla 3-119 - Red de monitoreo piezométrico en periodos de verano e invierno a lo largo del túnel Santa Elena

| Punto de medición | Código | Profundidad (m desde superficie) | Profundidad en verano (m desde superficie) | Fecha de medición | Profundidad en inverno (m desde superficie) | Fecha de medición |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Piezómetro | PZ 1 | 30 | -14,90 | 15/01/2013 | -12,69 | 21/05/2013 |
| Piezómetro | PZ 2 | 40 | -14,00 | 15/01/2013 | -13,60 | 21/05/2013 |
| Piezómetro | PZ 3 | 40 | -9,25 | 15/01/2013 | -9,08 | 21/05/2013 |
| Piezómetro | PZ 4 | 100 | -5,15 | 15/01/2013 | -4,87 | 21/05/2013 |
| Piezómetro | PZ 5 | 40 | -24,95 | 15/01/2013 | -9,80 | 21/05/2013 |
| Piezómetro | PZ 6 | 40 | -8,40 | 15/01/2013 | -7,14 | 21/05/2013 |
| Piezómetro | PZ 7 | 71 | -21,60 | 15/01/2013 | -21,21 | 21/05/2013 |
| Piezómetro | PZ 8 | 60 | -7,00 | 15/01/2013 | -6,67 | 18/05/2013 |
| Piezómetro | PZ 9 | 61 | -13,75 | 15/01/2013 | -13,59 | 18/05/2013 |
| Piezómetro | PZ 10 | 39,50 | -5,80 | 15/01/2013 | -7,31 | 18/05/2013 |
| Piezómetro | PZ 11 | 80 | -21,80 | 15/01/2013 | -21,51 | 18/05/2013 |
| Piezómetro | PZ 12 | 52 | -0,25 | 15/01/2013 | -0,52 | 18/05/2013 |
| Piezómetro | PZ 13 | 100 | -8,45 | 15/01/2013 | -6,97 | 18/05/2013 |
| Piezómetro | PZ 14 | 160 | -1,80 | 22/01/2013 | rebosando | 21/05/2013 |
| Piezómetro | PZ 15 | 40 | -14,45 | 15/01/2013 | -15,42 | 21/05/2013 |
| Piezómetro | PZ 16 | 50 | -33,15 | 15/01/2013 | -33,66 | 21/05/2013 |
| Piezómetro | PZ 17 | 40 | -39,20 | 15/01/2013 | -39,10 | 21/05/2013 |
| Piezómetro | PZ 18 | 40 | -4,50 | 15/01/2013 | -4,60 | 21/05/2013 |

Fuente: Consorcio Geodata

Tabla 3-120. Red de monitoreo piezométrico en periodos de invierno a lo largo del túnel Seminario

| Punto de medición | Código | Profundidad (m desde superficie) | Profundidad en verano (m desde superficie) | Fecha de medición | Profundidad en inverno (m desde superficie) | Fecha de medición |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Piezómetro | ING-PER-DES-01 | 40 | - | - | - | abril 2013 |
| Piezómetro | ING-PER-DES-02 | 30 | - | - | - | abril 2013 |

Fuente: Consorcio Geodata

### 3.2.7.5.2 Mediciones en época de verano

Para las mediciones piezométricas realizadas en época de verano se toma como referencia la fecha del 15/01/2013, en la cual los 18 piezómetros fueron medidos el mismo día, en concordancia con el comportamiento estacional de las lluvias que registra los valores mínimos durante el mes de enero.

De su interpolación se ha generado la carta piezométrica que constituye el anexo No. 13 del Informe Hidrogeológico.

#### 3.2.7.5.3 Mediciones en época de invierno

Las mediciones en época de invierno para los piezómetros registradas entre el 18 y el 21 de mayo del 2013 permitieron actualizar la carta piezométrica con nuevos datos relacionados con la época de invierno (Ver Anexo 3.3 – Estudio Hidrogeológico). Las variaciones observadas en los piezómetros oscilaron en su mayoría alrededor de los 2 m de profundidad, o menos. La oscilación mayor, igual a 15,15 m, se evidenció en el piezómetro 5 (Ver Anexo 3.3 – Estudio Hidrogeologico).

De acuerdo a lo indicado anteriormente, se deduce que el comportamiento de la superficie piezométrica, a la escala indicada en la cartografía (1:17.500), no ha resultado modificada de manera significativa respecto a la primera carta piezométrica entregada con el Informe del Estudio Hidrogeológico (Anexo 3.3).

##### *3.2.7.5.3.1 Niveles piezométricos en relación a la pluviosidad*

Entre el final del año 2011 y comienzos del 2013 fueron instalados 22 piezómetros. Cuatro de ellos (2+2) localizados en correspondencia con los dos portales y los 18 restantes distribuidos en proximidad al trazado del Túnel Santa Elena, en los cuales se monitorea constantemente el nivel piezométrico.

Se dispone además del registro pluviométrico, desde el año 2012 a mayo 2013, de tres estaciones pluviométricas monitoreadas por el Concesionario, dos de las cuales se encuentran localizadas en correspondencia con los portales del Túnel Santa Elena y han sido tomadas como base para los análisis sucesivos.

Además de los registros pluviométricos diarios aportados por las estaciones localizadas en el Portal Oriental y Occidental del Túnel Santa Elena, y con el fin de llevar a cabo una correlación óptima entre la variación del nivel piezométrico vs el patrón de lluvias en las diferentes cuencas hidrográficas, es necesario disponer de todos los datos relacionados con la estratigrafía o descripción litológica de cada perforación, datos no disponibles para todos los piezómetros dado que la mayoría de ellos fueron construidos a destrucción de núcleo, ejecutada en correspondencia con cada piezómetro instalado, así como un detalle de instalación de los mismos.

El esquema de instalación de los piezómetros indica que se trata de piezómetros que miden principalmente el acuífero superficial.

En este estudio se usará el término “nivel piezométrico” para hacer referencia al nivel medido dentro del piezómetro sin distinguir entre acuífero libre o acuífero confinado.

Dicho esto, en los párrafos sucesivos se reportan las observaciones hechas sobre los datos actualmente disponibles. Específicamente se analiza la correlación directa entre los datos de lluvia diaria aportada por los pluviómetros y los niveles medidos en los piezómetros, relacionados con las cuencas localizadas en los Portales Oriental y Occidental del Túnel Santa Elena.

**Sector Occidental**

La correlación general entre el patrón de lluvias y los niveles piezométricos hecha para el sector Occidental del Túnel Santa Elena (Ver figura siguiente), muestra una serie de datos que es posible subdividir en dos tiempos bien definidos de acuerdo con la naturaleza, la velocidad y el significado de las variaciones piezométricas. En efecto, parece evidente la diferencia entre la correlación lluvias-nivel piezométrico observados antes y después de junio del 2012.

De hecho, considerando comparables aunque obviamente no idénticos los picos de lluvias presentes en mayo 2012 y octubre-noviembre 2012 y abril-mayo 2013, tomando en cuenta sólo la escorrentía, sin considerar el agua de lluvia que se evapora y aquella que se infiltra de acuerdo a las diferentes temperaturas medias mensuales, se observan diferencias netas en la respuesta del nivel piezométrico.

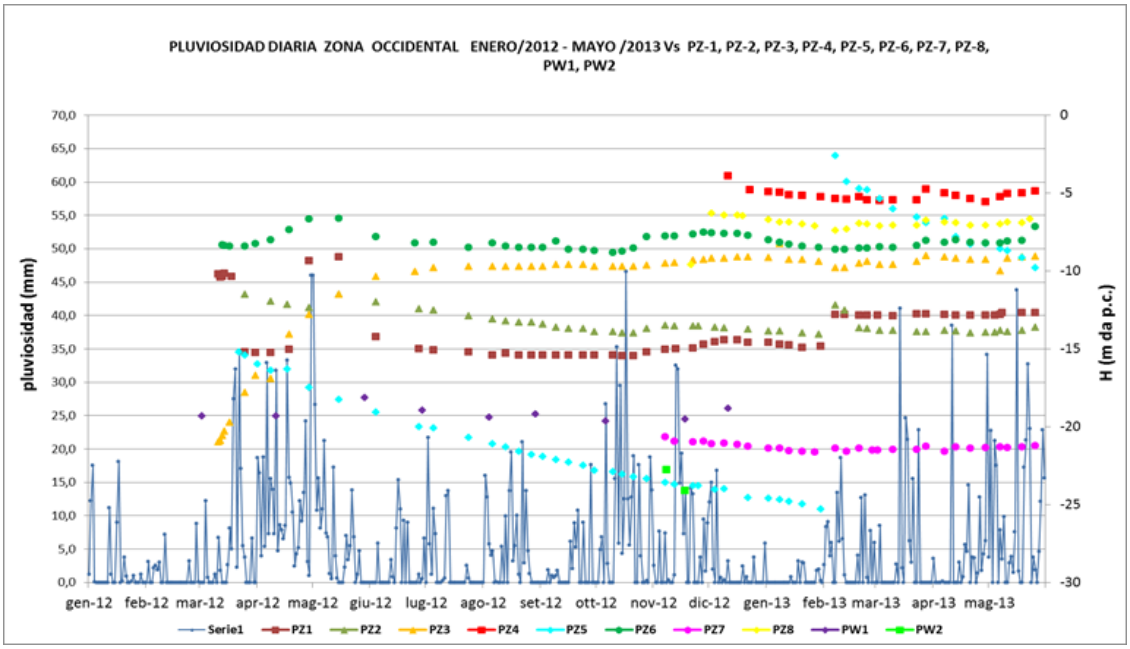



Figura 3-267 - Gráfico de correlación entre las lluvias registradas en el sector del portal occidental y los niveles piezométricos (año 2012 - mayo 2013).

Para cada piezómetro individual se describen a continuación las características de correlación *lluvias-nivel piezométrico* que ha sido posible identificar:

- PZ4, presenta una débil respuesta a los picos de precipitación con ligero aumento del nivel piezométrico después de las lluvias más intensas.
- PZ7, presenta una napa a profundidad casi que constante a lo largo de todo el periodo de tiempo, sin ser influenciado significativamente por la precipitación.
- PZ8, presenta un comportamiento similar al PZ 4, con una discreta respuesta a los picos de precipitación representada en modestos aumentos del nivel piezométrico.
- PZ1, aunque es el piezómetro más próximo al pluviómetro de referencia para esta cuenca, la variación del nivel en su interior presenta una evidente dificultad de correlación con las lluvias; específicamente se observa una brusca disminución del nivel piezométrico tras el pico de lluvias de marzo-abril del 2012, que es difícil de entender sobre todo por el claro contraste con el fuerte aumento del nivel piezométrico en correspondencia con el pico de lluvias de mayo 2012. Como ya se ha evidenciado anteriormente en general también este piezómetro después de junio 2012 presenta una correlación lluvia-nivel piezométrico marcadamente diferente del periodo precedente caracterizado por un nivel casi constante y muy poco influenciado por el pico de lluvias de octubre-noviembre 2012 que a pesar de ser similar al registrado en mayo del 2012 no produce ningún efecto evidente en el nivel medido. Se observa un aumento neto del nivel piezométrico a partir de febrero 2013 en respuesta al aumento de las lluvias, para después estabilizarse nuevamente.

- PZ2, en contraposición con el patrón de las lluvias, en claro incremento de marzo a mayo 2012, el nivel piezométrico tiende a disminuir en el mismo periodo. Tal correlación inversa no aparece más después de junio 2012, como se puede observar en correspondencia con el pico de lluvias de octubre-noviembre 2012, en el cual se observa sólo un ligero incremento del nivel; al igual que en el caso del PZ1, la profundidad del nivel disminuye a partir de febrero 2013 para luego alcanzar una estabilización hasta mayo 2013.
- PZ3, este piezómetro presenta un notable incremento del nivel piezométrico en el periodo marzo-mayo 2012, fácilmente correlacionable con el incremento de las lluvias observables en el mismo periodo; esta correlación directa y positiva no se observa más después de julio 2012 cuando, aunque en correspondencia del pico de lluvias de octubre-noviembre 2012 y mayo 2013, no se evidencian variaciones apreciables del nivel piezométrico;
- PZ5, el nivel piezométrico observado disminuye a ritmo constante desde abril 2012 hasta febrero 2013, no muestra ninguna correlación con las lluvias. Esto puede deberse a varios factores tales como errores en la metodología de adquisición o transcripción de los datos, presencia de características geológicas y/o hidrogeológicas particulares (p.e. presencia de cuencas de descarga vecinas) o problemas asociados a la construcción e instalación del piezómetro.
- PZ6, este piezómetro es el único que presenta un comportamiento coherente en el periodo marzo 2012 a mayo 2013, en el cual se observa una leve correlación directa entre los picos de precipitación y los incrementos del nivel piezométrico en el mismo periodo, que en una primera aproximación puede relacionarse con una napa freática superficial contenida en un acuífero de no poco espesor y extensión.
- PW1 (PZ-TS-PW-01), medida registrada de las lluvias con un ligero retardo. se muestran variaciones del nivel piezométrico no mayores al metro y por lo tanto no presentan oscilaciones significativas.
- PW2 (PZ-TS-PW-02), el periodo de tiempo cubierto por los datos a disposición es muy corto para hacer algún tipo de observación.

Sector Oriental

En la cuenca hidrográfica en la cual se ha instalado el pluviómetro del Portal Oriental se encuentran presentes ocho piezómetros, cuyas mediciones inician entre octubre y diciembre del 2012, estas variaciones en función de las lluvias se reportan en el gráfico siguiente (Ver figura 46).

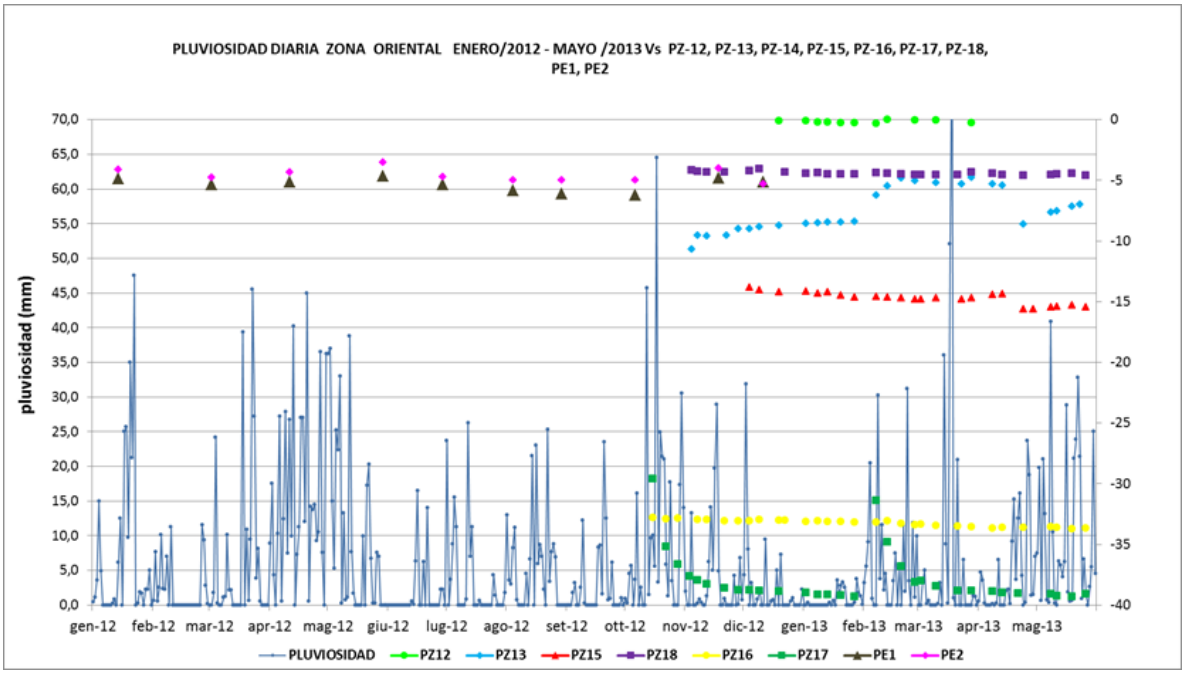



Figura 3-268 - Gráfico de correlación entre las lluvias registradas en el sector del portal oriental y los niveles piezométricos (año 2012/mayo 2013).

El corto periodo de tiempo en el cual se pueden llevar a cabo las correlaciones *lluvias-niveles piezométricos* conlleva a que sólo para algunos piezómetros se puedan hacer algunas consideraciones y se espera que con la continuación del plan de monitoreo y seguimiento establecido en este estudio, se siga nutriendo la información acá referida:

- PZ12, presenta una napa con profundidad más o menos constante a lo largo del corto periodo de tiempo del cual se disponen lecturas, no se ve influenciado significativamente por el paso de las lluvias.
- PZ15, presenta un comportamiento sustancialmente indiferente a las lluvias, presentando un modesto aumento del nivel piezométrico después de las lluvias de abril 2013, al cual sigue un descenso que parece invertirse con las lluvias de mayo 2013.
- PZ13, en sentido contrario al comportamiento de las lluvias, las cuales muestran un evidente descenso desde noviembre 2012 a enero 2013, el nivel piezométrico tiende a incrementarse en el mismo periodo por causas que a la luz de la información actual no es posible explicar; se observa un aumento neto del nivel piezométrico en respuesta a las lluvias de abril 2013.
- PZ16, el comportamiento del nivel piezométrico es constante desde octubre 2012 a mayo 2013, no se nota una influencia apreciable por el contemporáneo descenso o aumento de las lluvias, esto con base a la información actual no es posible explicar.
- PZ17, el comportamiento del nivel piezométrico muestra un evidente descenso desde octubre del 2012 a enero del 2013 en concordancia con el descenso de las lluvias en el mismo periodo que en una primera aproximación puede relacionarse con una napa freática superficial contenida en un acuífero de no poco espesor y extensión.
- PZ18, el comportamiento del nivel piezométrico se presenta constante desde noviembre 2012 a enero 2013, este no resulta influenciado por el descenso contemporáneo de las lluvias y de acuerdo a la información actual no es posible explicar. Se observa un aumento neto del nivel

piezométrico en respuesta a las lluvias de febrero 2013, después del cual el nivel comienza un descenso continúo a pesar de las lluvias de abril y mayo 2013.

- PE1 (PZ-TS-PE-01), es uno de los piezómetros que ha sido monitoreado durante mayor cantidad de tiempo. Las mediciones registran el paso de las lluvias con un ligero retardo, mostrando variaciones del nivel piezométrico no mayores a un metro y por lo tanto no presentan oscilaciones significativas.
- PE2 (PZ-TS-PE-02), al igual que en el caso del piezómetro anterior corresponde a uno de los piezómetros que posee una gran cantidad de lecturas realizadas en un periodo de tiempo prolongado. Las mediciones registran el paso de las lluvias con un ligero retardo, mostrando variaciones del nivel piezométrico no mayores a un metro y por lo tanto no presentan oscilaciones significativas.

Una de las posibles causas por las que la respuesta de la variación del nivel piezométrico no es inmediata en relación con los picos de lluvias, puede estar relacionada con la naturaleza poco permeable de la cobertura superficial.

#### 3.2.7.5.4 Descripción de la superficie piezométrica

Las mediciones de la napa o nivel del agua subterránea observada en los piezómetros han permitido identificar los niveles piezométricos correspondientes a una napa libre, no confinada, y de generar, a gran escala, una carta piezométrica relacionada con su comportamiento. Para la definición del comportamiento de la napa, además de las mediciones realizadas en los piezómetros, han sido consideradas las mediciones hechas en los pozos, Aljibes y manantiales.

Las mediciones piezométricas indican en los sectores del fondo de los valles niveles con cotas próximas a la cota del curso de agua, confirmando que estos drenan la napa. En el contexto morfológico del área de influencia de los túneles, constituido por morfología dominantemente colinada, se aprecia que la napa libre drena desde las laderas hacia el fondo de los valles, alimentando de este modo los cursos de agua existentes.

En consecuencia, para aquellos sectores donde no se dispone de mediciones directas en piezómetros, pozos, aljibes y manantiales, se ha asumido que el curso de agua corresponde a la urgencia en superficie de la napa freática, y que su cota puede ser correlacionada entre incisiones limítrofes.

El sector del Túnel Seminario no se encuentra influenciado por una red hidrográfica permanente, sino únicamente por cursos de agua intermitentes que se activan en presencia de lluvias para luego desaparecer o disminuir a caudales ínfimos en un corto intervalo de tiempo. Esta situación permite asumir la ausencia de una napa freática significativa, razón por la cual se ha considerado correcto no elaborar una piezometría de este sector.

Ésta hipótesis ha sido confirmada mediante la ejecución de dos piezómetros localizados en inmediación a los portales, en correspondencia con las progresivas PK 5+237 y PK 5+816 aproximadamente, de 30 y 40 m de profundidad, los cuales no han evidenciado presencia de agua, confirmando en consecuencia la ausencia de un acuífero propiamente dicho.

El modelo geológico de referencia indicaba para el túnel Seminario un nivel piezométrico con direcciones de flujo paralelo a la ladera obtenido muy probablemente de las mediciones piezométricas realizadas durante la perforación de los sondeos efectuados en inmediaciones del trazado del túnel durante los estudios del 2009. Los dos piezómetros construidos por Geodata

como parte de las investigaciones llevadas a cabo en el transcurso del estudio complementario, no han evidenciado presencia de agua hasta profundidades de 30 y 40 m. Sin embargo, no es de descartar que algunos tramos alterados del Gabro de San Diego de mayor granulometría o afectados por fallas geológicas, que serán interceptados durante la excavación, puedan encontrase localmente saturados albergando napas colgadas.

Para el túnel Santa Elena las mediciones de la napa observada en los piezómetros, indican en los sectores del fondo de los valles, niveles con cotas cercanas a las cotas de los cursos de agua superficiales. Este dato, unido al contexto morfológico presente en la zona de influencia de los túneles, caracterizado por presentar un relieve prevalentemente colinado y localmente montañoso, en el cual se encuentra una falda libre que desde las laderas fluye hacia el fondo de los valles, alimentando los cursos de agua, ha permitido referir de manera fiable los niveles medidos en una falda libre no confinada y de generar, a gran escala, una carta piezométrica que define su comportamiento.

En consecuencia a las consideraciones precedentes se ha estimado, para el sector del Túnel de Santa Elena, que los cursos de agua corresponden con la manifestación en superficie de la falda freática, y que sus cotas pueden ser correlacionadas entre valles limítrofes, tomando en consideración el nivel piezométrico registrado en los piezómetros intermedios.

En el túnel Santa Elena, en el sector comprendido entre las PK 13+500 y 15+000 aproximadamente, así como en los sectores adyacentes al eje del trazado, donde no fueron construidos piezómetros y, con base en el conocimiento geológico de la zona, se asumió que el comportamiento de la napa es análogo. Por lo tanto, en este sector específico, se han correlacionado las cotas de los cursos de agua de valles limítrofes.

La piezometría resultante presenta una tendencia más o menos paralela a la topografía, en la cual las direcciones de flujo del agua subterránea varía en correspondencia de las numerosas crestas, que funcionan como divisorias de aguas, y del fondo de los valles.

La morfología bastante articulada de la superficie piezométrica elaborada, corrobora la existencia de un acuífero libre que se extiende por toda el área de influencia de los túneles. Considerando la litología dominante de los terrenos cuaternarios y de alteración que albergan el agua subterránea, así como los datos aportados por la tomografía eléctrica realizada y reportada en el segundo informe de avance, es posible considerar que frecuentemente se trata de un ***acuífero libre discontinuo y heterogéneo***, representado en pequeñas napas de dimensiones limitadas, alojadas en una cobertura superficial en términos generales poco permeable, al interior de la cual se desarrollan localmente sectores de mayor permeabilidad que permiten el drenaje del agua de infiltración alimentando numerosos manantiales caracterizados en su conjunto por presentar caudales modestos, en su mayoría inferiores a 2 l/s, como ha sido puesto en evidencia por los dos inventarios de puntos de agua realizados en época de verano e invierno respectivamente.

El modelo geológico de referencia del túnel Santa Elena indicaba un nivel piezométrico con dirección preferencial de flujo paralelo a las laderas, obtenido muy probablemente de las medidas piezométricas efectuadas en los sondeos realizados durante los estudios previos, especialmente aquellos del 2009[22]. Este dato ha sido complementado durante el estudio realizado en el 2.013 con base en las mediciones llevadas a cabo en los piezómetros construidos desde el 2010 hasta el

[22] plano I-P-2028-AO-VI-GO-005, EIA-Integral

2013. El resultado y análisis de estas mediciones se resumen en los mapas piezométricos presentados (ver Estudio Hidrogeológico Anexo).

#### 3.2.7.6 Valoración de la presencia de agua en los túneles

##### 3.2.7.6.1 Agua drenada en el túnel seminario

Como se ha ilustrado anteriormente, la previsión del ingreso de agua el interior de los túneles presentado en este capítulo se refieren a un régimen permanente, con túneles excavados sin ningún tipo revestimiento (provisional o definitivo) y sin ningún tipo de pre-inyección.

El túnel Seminario ha sido diseñado con dos tubos, aunque en una primera fase operativa funcionará con un sólo tubo bidireccional de radio promedio igual a 5 m aproximadamente, excavado con pendiente constante de aproximadamente 6%, que aumenta progresivamente desde el portal de SW hacia el portal NE. El agua drenada en condiciones estacionales serán por lo tanto captadas por gravedad hacia el portal SW.

El proceso de valoración del caudal estabilizado drenado por la obra subterránea se ha llevado a cabo a través del análisis de los parámetros hidrogeológicos obtenidos de las pruebas realizadas en piezómetros, del monitoreo de puntos de agua (subterráneos y superficiales) y de las observaciones directas realizadas en el terreno.

Los datos fueron interpretados también en función del modelo hidrogeológico de referencia y del contexto geológico-estructural de la zona de influencia de los túneles.

La valoración se ha efectuado considerando el túnel completamente drenante. Eventuales reducciones de caudal obtenidas como consecuencia de las intervenciones de pre-inyección del macizo rocoso podrán ser valoradas en una segunda fase.

El caudal total estabilizado y acumulado esperado en el portal SE del túnel Seminario, de acuerdo a la valoración hecha en esta fase del proyecto, está comprendido entre 3 y 9 l/s.

El perfil hidrogeológico del túnel Seminario presenta una característica simétrica. De hecho se prevé que entre los dos portales, el túnel será excavado en los tramos iniciales dentro de suelos que derivan de la alteración del basamento cristalino (complejo hidrogeológico Q3, Q4 y Q5). Se trata de terrenos de granulometría limosa a areno-limosa con permeabilidad de baja a media, de acuerdo a la clasificación de AFTES, con caudal estabilizado del orden de 0.02 a 3 l/s/100m. En su conjunto, estos sectores caracterizados por presentar las menores coberturas, contribuirán con caudales estabilizados totales comprendidos entre 1,5 y 2,4 l/s.

De acuerdo a lo evidenciado en los piezómetros (ING-PER-DES-02), la zona del portal NE, por aproximadamente 90 m, debería ser excavada por encima de la napa freática y por lo tanto, para este tramo, no se prevé flujos constantes al interior del túnel, sino goteos menores en periodos de mayor lluviosidad.

La parte central del túnel Seminario se prevé que será excavado al interior de la roca correspondiente al complejo 5, el cual se caracteriza en su conjunto por presentar fajas de roca alterada y fracturada localmente interceptada por fallas que pueden extenderse hasta la cota del túnel. En su conjunto, el caudal esperado en este tramo contribuye con cerca del 75% del caudal drenado por todo el túnel.

En correspondencia con las zonas de fallas se han previsto entradas puntuales de agua al interior del túnel con caudales estabilizados máximos de 0,8 l/s. Este caudal podrá reducirse a través de la ejecución de pre-inyecciones. Sin embargo, dada la fracturación total del macizo, será importante verificar la posibilidad efectiva de realizar a través de inyecciones el aislamiento del acuífero del entorno del túnel en modo tal de aislar e impermeabilizar la faja de fracturación más intensa responsable del flujo puntual. Es importante anotar que el caudal máximo estimado en la tabla siguiente toma en cuenta una recarga constante por encima del túnel. En realidad, en el caso del túnel Seminario, la escasa presencia de agua en superficie y la modesta cuenca de recarga localizada en su área de influencia, conllevan a considerar poco probable la ocurrencia del caudal máximo reportado en la tabla mencionada anteriormente. El caudal máximo se debe tomar como referencia para el equipamiento de los sistemas de evacuación del agua durante la excavación.

#### *3.2.7.6.1.1 Resultados considerando un sólo tuvo con y sin pre-inyecciones*

Considerando la construcción de un solo tubo, los caudales específicos y totales estabilizados, calculados mediante el enfoque analítico descrito al inicio del presente capítulo, son los siguientes (ver **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**).

- Sin considerar la aplicación de tratamientos de impermeabilización de las zonas de falla y zonas fracturadas a través de pre-inyecciones:
  - *Los caudales específicos* oscilan entre 0,00 a 3,66 l/s/100m de túnel, para el complejo hidrogeológico Q3, Q4, Q5 y entre 0,27 a 2,06 l/s/100m de túnel, para el complejo hidrogeológico 5.
  - *El caudal total* acumulado esperado en el portal SE del túnel Seminario oscila entre 3 y 9 l/s.
- Considerando la aplicación de tratamientos de impermeabilización de las zonas de falla y zonas fracturadas a través de pre-inyecciones:
  - *Los caudales específicos* oscilan entre 0,00 a 0,50 l/s/100m de túnel, para el complejo hidrogeológico Q3, Q4, Q5 y entre 0,27 a 0,50 l/s/100m de túnel, para el complejo hidrogeológico 5.
  - *El caudal total* acumulado esperado en el portal SE del túnel Seminario oscila entre 2 y 3 l/s.

El detalle de la previsión del ingreso de agua tramo por tramo al interior de la excavación, se ilustra en la siguiente tabla, en la cual se indican los tramos en los cuales se esperan flujos de tipo difuso y aquellos en los cuales se esperan flujos puntuales.

Tabla 3-121 - Caudal estabilizado tramo por tramo en el túnel Seminario considerando la construcción de un sólo tubo con y sin tratamientos de impermeabilización a través de pre-inyecciones

| PK | | l | Cl | F | CAUDAL ESTABILIZADO SIN PRE-INYECCIONES | | | | CAUDAL ESTABILIZADO CON PRE-INYECCIONES | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| PK i | PK f | Longitud | Complejo Hidrogeológico | Grado de fracturación | Caudal específico | | Caudal Total | | Caudal específico | | Caudal Total | |
| | | | | | MIN | MAX | MIN | MAX | MIN | MAX | MIN | MAX |
| m | m | m | - | - | (l/s/100 m) | (l/s/100 m) | l/s | l/s | (l/s/100 m) | (l/s/100 m) | l/s | l/s |
| PORTALE SE | | | | | | | | | | | | |
| 5094 | 5099 | 5 | Q3 | | 0,02 | 0,11 | 0,00 | 0,01 | 0,02 | 0,11 | 0,00 | 0,01 |
| 5099 | 5130 | 31 | Q4 | | 0,03 | 0,08 | 0,01 | 0,02 | 0,03 | 0,08 | 0,01 | 0,02 |
| 5130 | 5165 | 35 | Q5 | Fracturación | 1,96 | 3,14 | 0,69 | 1,10 | 0,50 | 0,50 | 0,18 | 0,18 |
| 5165 | 5336 | 171 | 5 | Fracturación | 0,27 | 1,35 | 0,46 | 2,30 | 0,27 | 0,50 | 0,46 | 0,86 |
| *5336* | *5386* | *50* | *5* | *Falla* | 0,32 | 1,60 | *0,16* | *0,80* | 0,32 | 0,50 | 0,16 | 0,25 |
| 5386 | 5484 | 98 | 5 | Fracturación | 0,34 | 0,34 | 0,33 | 0,33 | 0,34 | 0,34 | 0,33 | 0,33 |
| *5484* | *5534* | *50* | *5* | *Falla* | 0,38 | 1,90 | *0,19* | *0,95* | 0,38 | 0,50 | 0,19 | 0,25 |
| 5534 | 5625 | 91 | 5 | Fracturación | 0,41 | 0,41 | 0,37 | 0,37 | 0,41 | 0,41 | 0,37 | 0,37 |
| *5625* | *5675* | *50* | *5* | *Falla* | 0,41 | 2,06 | *0,21* | *1,03* | 0,41 | 0,50 | 0,21 | 0,25 |
| 5675 | 5743 | 68 | 5 | Fracturación | 0,34 | 1,71 | 0,23 | 1,16 | 0,34 | 0,50 | 0,23 | 0,34 |
| 5743 | 5779 | 36 | Q5 | Fracturación | 2,28 | 3,66 | 0,82 | 1,32 | 0,50 | 0,50 | 0,18 | 0,18 |
| 5779 | 5819 | 40 | Q5 | Fracturación | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 5819 | 5843 | 24 | Q4 | | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 5843 | 5867 | 24 | Q3 | | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| PORTAL NE | | | | | | | | | | | | |
| | | 773 | | | | | 3 | 9 | | | 2 | 3 |

#### *3.2.7.6.1.2 Resultados considerando dos tubos con y sin pre-inyecciones*

Considerando la construcción de dos tubos, los caudales específicos y totales estabilizados, calculados mediante el enfoque analítico descrito al inicio del presente capítulo, son los siguientes.

- Sin considerar la aplicación de tratamientos de impermeabilización de las zonas de falla y zonas fracturadas a través de pre-inyecciones:
  - *Los caudales específicos* oscilan entre 0,00 a 4,39 l/s/100m de túnel, para el complejo hidrogeológico Q3, Q4, Q5 y entre 0,32 a 2,47 l/s/100m de túnel, para el complejo hidrogeológico 5.
  - *El caudal total* acumulado esperado en el portal SE del túnel Seminario oscila entre 4 y 11 l/s.
- Considerando la aplicación de tratamientos de impermeabilización de las zonas de falla y zonas fracturadas a través de pre-inyecciones:
  - *Los caudales específicos* oscilan entre 0,00 a 0,50 l/s/100m de túnel, para el complejo hidrogeológico Q3, Q4, Q5 y entre 0,38 a 0,50 l/s/100m de túnel, para el complejo hidrogeológico 5.
  - *El caudal total* acumulado esperado en el portal SE del túnel Seminario oscila alrededor de 3 l/s.

El detalle de la previsión del ingreso de agua tramo por tramo al interior de la excavación, se ilustra en la siguiente tabla, en la cual se indican los tramos en los cuales se esperan flujos de tipo difuso y aquellos en los cuales se esperan flujos puntuales.

Tabla 3-122 - Caudal estabilizado tramo por tramo en el túnel Seminario considerando la construcción de dos tubos con y sin tratamientos de impermeabilización a través de pre-inyecciones

| PK | | l | CI | F | CAUDAL ESTABILIZADO SIN PRE-INYECCIONES | | | | CAUDAL ESTABILIZADO CON PRE-INYECCIONES | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| PK inicial | PK final | Longitud Total | Complejo Hidrogeológico | Grado de fracturación | Caudal específico en los dos tubos | | Caudal total en los dos tubos | | Caudal específico en los dos tubos | | Caudal total en los dos tubos | | Tipo de flujo |
| | | | | | MIN | MAX | MIN | MAX | MIN | MAX | MIN | MAX | |
| m | m | m | - | - | (l/s/100 m) | (l/s/100 m) | l/s | l/s | (l/s/100 m) | (l/s/100 m) | l/s | l/s | - |
| PORTAL SE | | | | | | | | | | | | | |
| 5094 | 5099 | 5 | Q3 | | 0,03 | 0,14 | 0,00 | 0,01 | 0,03 | 0,14 | 0,00 | 0,01 | DIFUSA |
| 5099 | 5130 | 31 | Q4 | | 0,04 | 0,09 | 0,01 | 0,03 | 0,04 | 0,09 | 0,01 | 0,03 | DIFUSA |
| 5130 | 5165 | 35 | Q5 | Fracturación | 2,36 | 3,77 | 0,82 | 1,32 | 0,50 | 0,50 | 0,18 | 0,18 | DIFUSA |
| 5165 | 5336 | 171 | 5 | Fracturación | 0,32 | 1,62 | 0,55 | 2,76 | 0,32 | 0,50 | 0,55 | 0,86 | DIFUSA |
| *5336* | *5386* | *50* | *5* | *FALLA* | 0,38 | 1,92 | 0,19 | 0,96 | 0,38 | 0,50 | 0,19 | 0,25 | PUNTUAL |
| 5386 | 5484 | 98 | 5 | Fracturación | 0,41 | 0,41 | 0,40 | 0,40 | 0,41 | 0,41 | 0,40 | 0,40 | DIFUSA |
| *5484* | *5534* | *50* | *5* | *FALLA* | 0,46 | 2,28 | 0,23 | 1,14 | 0,46 | 0,50 | 0,23 | 0,25 | PUNTUAL |
| 5534 | 5625 | 91 | 5 | Fracturación | 0,49 | 0,49 | 0,45 | 0,45 | 0,49 | 0,49 | 0,45 | 0,45 | DIFUSA |
| *5625* | *5675* | *50* | *5* | *FALLA* | 0,49 | 2,47 | 0,25 | 1,23 | 0,49 | 0,50 | 0,25 | 0,25 | PUNTUAL |
| 5675 | 5743 | 68 | 5 | Fracturación | 0,41 | 2,05 | 0,28 | 1,39 | 0,41 | 0,50 | 0,28 | 0,34 | DIFUSA |
| 5743 | 5779 | 36 | Q5 | Fracturación | 2,74 | 4,39 | 0,99 | 1,58 | 0,50 | 0,50 | 0,18 | 0,18 | DIFUSA |
| 5779 | 5819 | 40 | Q5 | Fracturación | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | DIFUSA |
| 5819 | 5843 | 24 | Q4 | | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | - |
| 5843 | 5867 | 24 | Q3 | | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | - |
| PORTAL NE | | | | | | | | | | | | | |
| | | 773 | | | | | 4 | 11 | | | 3 | 3 | |

#### 3.2.7.6.2 Agua drenada en el túnel santa elena

Como se indicado anteriormente, la previsión del ingreso de agua al interior de los túneles presentado en éste capítulo se refiere a un régimen permanente, **con dos tubos excavados y sin ningún tipo de revestimiento (primario o definitivo) y sin ningún tipo de pre-inyección**.

El túnel Santa Elena ha sido diseñado con dos tubos, uno de los cuales se prevé absorba el tránsito bidireccional y el otro sirva de túnel de emergencia. Los dos tubos que serán construidos simultáneamente, tienen pendientes constantes de aprox. el 2%, ascendentes desde el portal occidental hacia el portal oriental. El agua drenada a largo plazo en régimen estabilizado será evacuada por gravedad hacia el portal occidental.

Los dos tubos presentan secciones diferentes: el tubo localizado más al norte tiene un radio mayor respecto a aquel situado más al sur, presentando éste último una sección vertical más reducida en aproximadamente 1 – 2 m, en función de la sección tipo. Sin embargo, a fines del cálculo del caudal esperado en cada uno de ellos, se ha considerado un radio medio equivalente de 5 m para los dos tubos, que compensa las diferencias de diámetro entre sus ejes verticales y horizontales respectivamente.

La suma de los dos tubos determina el drenaje de un caudal estabilizado comprendido entre 159 y 266 l/s. La amplitud del intervalo entre valores mínimos y máximos se debe al intervalo de permeabilidad máximo y mínimo utilizado en el cálculo el cual determina el caudal que será drenado a lo largo de las zonas de falla y tramos con mayormente fracturados. Este intervalo de permeabilidad ha sido deducido de las pruebas de permeabilidad ejecutadas, cuyos resultados han sido reportados en capítulos precedentes.

Como en el caso descrito del túnel Seminario, la excavación del túnel se dará en un contexto caracterizado por terrenos sueltos en correspondencia con el portal occidental y de un basamento rocoso más o menos fracturado en la parte central del trazado.

Los terreno sueltos que se prevén sea interceptados por la excavación desde los portales están constituidos principalmente por limos, limos arcillosos (complejo hidrgeológico Q3) que representan los horizontes más superficiales el perfil de alteración del basamento rocoso constituido por Anfibolitas (Anfibolitas de Medellín). Estos terrenos tienen permeabilidades generalmente bajas. La intercepción de estos depósitos superficiales no debería determinar flujos de agua importantes al interior del túnel. En estos tramos se espera en el mayor de los casos, goteo y humedad.

Se prevé por lo tanto interceptar un horizonte de transición entre el suelo y la roca (complejo hidrogeológico Q5). Se trata de un horizonte con espesor cercano a los 50 m, con permeabilidad de media a baja, constituido por rocas fracturadas y materiales dominantemente areno-limosos productos de la alteración del basamento. Estos sectores se caracterizan a lo largo del túnel Santa Elena por presentar cargas hidráulicas entre 10 – 20 m. Los caudales estabilizados previstos son del orden de 3 l/s/100m de túnel.

De las progresivas aproximadas PK 14+480 hasta la PK 18+470, la excavación del túnel se prevé sea hecha al interior del basamento rocoso. Más exactamente, entre las progresivas PK 14+480 y 14+790 y entre PK 17+310 y 18+470, la excavación interceptará la Anfibolita de Medellín (Complejo hidrogeológico 1), mientras que en el sector central entre las progresivas aproximadas

PK 14+790 y 17+310, se prevé que el túnel intercepte la granodioritica del Stock de Samarcanda relacionado con la génesis del Batolito Antioqueño (complejo hidrogeológico 4a), en cuyos bordes se localiza el complejo hidrogeológico 4b en correspondencia con las Anfibolitas. La permeabilidad del Stock de Samarcanda es generalmente más alta respecto a los litotipos del Batolito Antioqueño, debido a su mayor grado de fracturación.

En cada caso, el grado de fracturación se intensifica en correspondencia e inmediaciones de fallas principales o zonas fracturadas, en donde existe mayor probabilidad que ocurran flujos de agua puntuales al interior del túnel. En particular, se esperan entradas de agua puntuales a lo largo de las estructuras tectónicas principales como por ejemplo la falla de Santa Elena, que será interceptada al interior del complejo 1 en los alrededores de la PK 12+770 y a lo largo la falla del Stock de Samarcanda en los alrededores de la PK 16+900. A lo largo de estas estructuras se realizaron dos modelos numéricos de flujo con el fin de verificar su rol hidrodinámico en función de los caudales esperados en el túnel y de los impactos sobre los recursos hídricos en superficie.

El caudal estabilizado específico previsto para los tramos de roca excavados al interior de los diferentes litotipos que conforman el basamento cristalino, varían entre 0,2 y 1,7 l/s por cada 100m de túnel para las Anfibolitas del Complejo 1 y entre 2 y 20 l/s por cada 100m de túnel para los complejos 4a y 4b.

Las entradas puntuales de agua al interior del túnel, presentan a su vez caudales estabilizados que varían entre 1 y 2 l/s por cada 10 m de túnel, lo cual es coherente con los cálculos hechos mediante modelo numérico. Considerando la totalidad de las fracturas del macizo rocoso, se debe verificar la posibilidad efectiva de lograr a través de inyecciones la separación del acuífero entorno a la excavación, en modo tal que se aíslen e impermeabilicen las fajas de mayor fracturación responsables de los flujos puntuales al interior del túnel.

#### *3.2.7.6.2.1 Escenario constructivo: un sólo tubo con y sin pre-inyecciones*

Considerando la construcción de un solo tubo, los caudales específicos y totales estabilizados, calculados mediante el enfoque analítico descrito al inicio del presente capítulo, son los siguientes.

- Sin considerar la aplicación de tratamientos de impermeabilización de las zonas de falla y zonas fracturadas a través de pre-inyecciones:
  - *Los caudales específicos* oscilan 0,21 y 2,15 l/s/100 m de túnel, para las Anfibolitas del Complejo 1 y entre 1,65 y 20,47 l/s/100 m de túnel para los complejos hidrogeológicos 4a y 4b.
  - *El caudal total* acumulado esperado en el portal occidental del túnel Seminario oscila entre 132 y 221 l/s.
- Considerando la aplicación de tratamientos de impermeabilización de las zonas de falla y zonas fracturadas a través de pre-inyecciones:
  - *Los caudales específicos* oscilan entre 0,21 a 2,09 l/s/100m de túnel, para las Anfibolitas del Complejo 1 y entre 0,50 a 2,89 l/s/100m de túnel, para los complejos hidrogeológicos 4a y 4b.
  - *El caudal total* esperado en el portal occidental del túnel Seminario oscila entre 53 y 63 l/s.

La amplitud del intervalo entre valores mínimos y máximos se debe al intervalo de permeabilidad máximo y mínimo utilizado en el cálculo el cual determina el caudal que será drenado a lo largo de las zonas de falla y tramos más fracturados. Este intervalo de permeabilidad ha sido deducido de

las pruebas de permeabilidad ejecutadas, cuyos resultados han sido reportados en capítulos precedentes.

En la siguiente tabla se muestran los valores de caudales estabilizados tramo por tramo a lo largo de todo el túnel Santa Elena. Los valores indican el caudal acumulado relacionado con el drenaje de los dos tubos que conforman el túnel.

Tabla 3-123 - Caudal estabilizado esperado tramo por tramo en el túnel Santa Elena con y sin pre-inyecciones y considerando la presencia de uno sólo tubo

| K | | l | CI | F | CAUDAL ESTABILIZADO SIN PRE-INYECCIONES | | | | CAUDAL ESTABILIZADO CON PRE-INYECCIONES | | | | Tipo de flujo |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Pi | Pf | Longitud | Complejo Hidrogeológico | Grado de fracturación | Caudal específico con 1 tubo | | Caudal total con 1 tubo | | Caudal específico con 1 tubo | | Caudal total con 1 tubo | | |
| | | | | | MIN | MAX | MIN | MAX | MIN | MAX | MIN | MAX | |
| m | m | m | - | - | l/s/100 m | l/s/100 m | l/s | l/s | l/s/100 m | l/s/100 m | l/s | l/s | - |
| PORTAL OCCIDENTAL | | | | | | | | | | | | | |
| 10333 | 10361 | 28 | Q3 | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | - |
| 10361 | 10428 | 67 | Q5 | Fracturación | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | DIFUSO |
| 10428 | 10484 | 56 | Q5 | Fracturación | 2,28 | 3,66 | 1,28 | 2,05 | 0,5 | 0,5 | 0,28 | 0,28 | DIFUSO |
| 10484 | 10719 | 235 | 1 | Fracturación | 0,29 | 2,15 | 0,67 | 5,05 | 0,29 | 0,5 | 0,67 | 1,18 | DIFUSO |
| 10719 | 10959 | 240 | 1 | Fracturación | 0,25 | 0,25 | 0,61 | 0,61 | 0,25 | 0,25 | 0,61 | 0,61 | DIFUSO |
| 10959 | 11009 | 50 | 1 | *Falla* | 0,24 | 1,84 | 0,12 | 0,92 | 0,24 | 0,5 | 0,12 | 0,25 | PUNTUAL |
| 11009 | 11283 | 274 | 1 | Fracturación | 0,23 | 1,75 | 0,64 | 4,79 | 0,23 | 0,5 | 0,64 | 1,37 | DIFUSO |
| 11283 | 11550 | 267 | 1 | *Falla* | 0,21 | 1,61 | 0,57 | 4,3 | 0,21 | 0,5 | 0,57 | 1,34 | PUNTUAL |
| 11550 | 12255 | 705 | 1 | Fracturación | 0,21 | 1,61 | 1,51 | 11,35 | 0,21 | 0,5 | 1,51 | 3,53 | DIFUSO |
| 12255 | 12305 | 50 | 1 | *Falla* | 0,21 | 1,59 | 0,11 | 0,8 | 0,21 | 0,5 | 0,11 | 0,25 | PUNTUAL |
| 12305 | 12750 | 445 | 1 | | 0,21 | 0,21 | 0,95 | 0,95 | 0,21 | 0,21 | 0,95 | 0,95 | DIFUSO |
| 12750 | 12800 | 50 | 1 | *Falla* | 1,61 | 1,61 | 0,81 | 0,81 | 0,5 | 0,5 | 0,25 | 0,25 | PUNTUAL |
| 12800 | 13748 | 948 | 1 | | 0,22 | 0,22 | 2,05 | 2,05 | 0,22 | 0,22 | 2,05 | 2,05 | DIFUSO |
| 13748 | 13798 | 50 | 1 | *Falla* | 0,21 | 1,61 | 0,11 | 0,81 | 0,21 | 0,5 | 0,11 | 0,25 | PUNTUAL |
| PORTAL OCCIDENTAL | | | | | | | | | | | | | |
| 13798 | 14423 | 625 | 1 | | 0,21 | 0,21 | 1,31 | 1,31 | 0,21 | 0,21 | 1,31 | 1,31 | DIFUSO |
| 14423 | 14503 | 80 | 1 | *Falla* | 0,21 | 1,56 | 0,17 | 1,25 | 0,21 | 0,5 | 0,17 | 0,4 | PUNTUAL |

| K | | I | CI | F | CAUDAL ESTABILIZADO SIN PRE-INYECCIONES | | | | CAUDAL ESTABILIZADO CON PRE-INYECCIONES | | | | Tipo de flujo |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Pi | Pf | Longitud | Complejo Hidrogeológico | Grado de fracturación | Caudal específico con 1 tubo | | Caudal total con 1 tubo | | Caudal específico con 1 tubo | | Caudal total con 1 tubo | | |
| | | | | | MIN | MAX | MIN | MAX | MIN | MAX | MIN | MAX | |
| m | m | m | - | - | l/s/100 m | l/s/100 m | l/s | l/s | l/s/100 m | l/s/100 m | l/s | l/s | - |
| 14503 | 14790 | 287 | 1 | | 0,21 | 0,21 | 0,6 | 0,6 | 0,21 | 0,21 | 0,6 | 0,6 | DIFUSO |
| 14790 | 15124 | 334 | 4b | Fracturación | 12,28 | 20,47 | 41,02 | 68,37 | 0,5 | 0,5 | 1,67 | 1,67 | DIFUSO |
| 15124 | 15174 | 50 | 4b | *Falla* | 11,95 | 19,92 | 5,97 | 9,96 | 0,5 | 0,5 | 0,25 | 0,25 | PUNTUAL |
| 15174 | 15234 | 60 | 4b | Fracturación | 11,6 | 19,33 | 6,96 | 11,6 | 0,5 | 0,5 | 0,3 | 0,3 | DIFUSO |
| 15234 | 15528 | 294 | 4a | | 2,89 | 2,89 | 8,5 | 8,5 | 2,89 | 2,89 | 8,5 | 8,5 | DIFUSO |
| 15528 | 15578 | 50 | 4a | *Falla* | 2,78 | 10,44 | 1,39 | 5,22 | 0,5 | 0,5 | 0,25 | 0,25 | PUNTUAL |
| 15578 | 16158 | 580 | 4a | | 2,55 | 2,55 | 14,77 | 14,77 | 2,55 | 2,55 | 14,77 | 14,77 | DIFUSO |
| 16158 | 16208 | 50 | 4a | *Falla* | 2,42 | 9,07 | 1,21 | 4,54 | 0,5 | 0,5 | 0,25 | 0,25 | PUNTUAL |
| 16208 | 16736 | 528 | 4a | | 2,14 | 2,14 | 11,3 | 11,3 | 2,14 | 2,14 | 11,3 | 11,3 | DIFUSO |
| 16736 | 17001 | 265 | 4a | *Falla* | 1,65 | 6,2 | 4,38 | 16,42 | 0,5 | 0,5 | 1,33 | 1,33 | PUNTUAL |
| 17001 | 17312 | 311 | 4b | Fracturación | 6,85 | 6,85 | 21,29 | 21,29 | 0,5 | 0,5 | 1,56 | 1,56 | DIFUSO |
| 17312 | 17482 | 170 | 1 | | 0,25 | 0,25 | 0,42 | 0,42 | 0,25 | 0,25 | 0,42 | 0,42 | DIFUSO |
| PORTAL OCCIDENTAL | | | | | | | | | | | | | |
| 17482 | 17614 | 132 | 1 | *Falla* | 0,24 | 1,81 | 0,32 | 2,4 | 0,24 | 0,5 | 0,32 | 0,66 | PUNTUAL |
| 17614 | 17932 | 318 | 1 | | 0,26 | 0,26 | 0,83 | 0,83 | 0,26 | 0,26 | 0,83 | 0,83 | DIFUSO |
| 17932 | 17982 | 50 | 1 | *Falla* | 0,28 | 2,08 | 0,14 | 1,04 | 0,28 | 0,5 | 0,14 | 0,25 | PUNTUAL |
| 17982 | 18227 | 245 | 1 | | 0,29 | 0,29 | 0,71 | 0,71 | 0,29 | 0,29 | 0,71 | 0,71 | DIFUSO |
| 18227 | 18472 | 245 | 1 | | 0,28 | 2,09 | 0,68 | 5,11 | 0,28 | 2,09 | 0,68 | 5,11 | DIFUSO |
| 18472 | 18513 | 41 | Q5 | Fracturación | 1,96 | 3,14 | 0,81 | 1,29 | 0,5 | 0,5 | 0,21 | 0,21 | DIFUSO |
| PORTAL ORIENTAL | | | | | | | | | | | | | |

| K | | I | CI | F | CAUDAL ESTABILIZADO SIN PRE-INYECCIONES | | | | CAUDAL ESTABILIZADO CON PRE-INYECCIONES | | | | Tipo de flujo |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Pi | Pf | Longitud | Complejo Hidrogeológico | Grado de fracturación | Caudal específico con 1 tubo | | Caudal total con 1 tubo | | Caudal específico con 1 tubo | | Caudal total con 1 tubo | | |
| | | | | | MIN | MAX | MIN | MAX | MIN | MAX | MIN | MAX | |
| m | m | m | - | - | l/s/100 m | l/s/100 m | l/s | l/s | l/s/100 m | l/s/100 m | l/s | l/s | - |
| | | 8180 | | | | | 132 | 221 | | | 53 | 63 | |

Fuente: Geodata 2013

#### *3.2.7.6.2.2 Escenario constructivo: dos tubos con y sin pre-inyecciones*

Considerando la construcción con dos tubos, los caudales específicos y totales estabilizados calculados mediante el enfoque analítico descrito al inicio del presente capítulo, son los siguientes.

- Sin considerar la aplicación de tratamientos de impermeabilización de las zonas de falla y zonas fracturadas a través de pre-inyecciones, los resultados son los siguientes:
  - *Los caudales específicos* oscilan 0,25 y 2,6 l/s l/s/100 m de túnel, para las Anfibolitas del Complejo 1 y entre 2 y 25 l/s l/s/100 m de túnel para los complejos hidrogeológicos 4a y 4b.
  - *El caudal total* acumulado esperado en el portal occidental del túnel Seminario oscila entre 159 y 266 l/s.
- Considerando la aplicación de tratamientos de impermeabilización de las zonas de falla y zonas fracturadas a través de pre-inyecciones, los resultados son los siguientes:
  - *Los caudales específicos* oscilan entre 0,25 a 0,5 l/s/100m de túnel, para las Anfibolitas del Complejo 1 y entre 0,50 a 3,47 l/s/100m de túnel, para los complejos hidrogeológicos 4a y 4b.
  - *El caudal total* esperado en el portal occidental del túnel Seminario oscila entre 159 y 266 l/s.

La amplitud del intervalo entre valores mínimos y máximos se debe al intervalo de permeabilidad máximo y mínimo utilizado en el cálculo el cual determina el caudal que será drenado a lo largo de las zonas de falla y tramos más fracturados. Este intervalo de permeabilidad ha sido deducido de las pruebas de permeabilidad ejecutadas, cuyos resultados han sido reportados en capítulos precedentes.

En la siguiente tabla se muestran los valores de caudales estabilizados tramo por tramo a lo largo de todo el túnel Santa Elena. Los valores indican el caudal acumulado relacionado con el drenaje de los dos tubos que conforman el túnel.

Los datos de caudal total drenado por los dos tubos en ausencia de tratamientos de impermeabilización del macizo rocoso, obtenidos mediante la aplicación de un método analítico, son coherentes con los caudales medios totales infiltrados en las cuencas, calculados con el método del balance inverso medio (ver Anexo 3-3- – Estudio Hidrogeológico). Este hecho ratifica la validez de los datos y métodos utilizados.

Tabla 3-124 - Caudal estabilizado tramo por tramo drenado por el túnel Santa Elena con y sin pre-inyecciones y considerando la presencia de dos tubos

| K | | l | CI | F | CAUDAL ESTABILIZADO SIN PRE-INYECCIONES | | | | CAUDAL ESTABILIZADO CON PRE-INYECCIONES | | | | Tipo de flujo |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Pi | Pf | Longitud | Complejo Hidrogeológico | Grado de fracturación | Caudal específico con 2 tubos | | Caudal total con 2 tubos | | Caudal específico con 2 tubos | | Caudal total con 2 tubos | | |
| | | | | | MIN | MAX | MIN | MAX | MIN | MAX | MIN | MAX | |
| m | m | m | - | - | l/s/100 m | l/s/100 m | l/s | l/s | l/s/100 m | l/s/100 m | l/s | l/s | - |
| PORTAL OCCIDENTAL | | | | | | | | | | | | | |
| 10333 | 10361 | 28 | Q3 | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | - |
| 10361 | 10428 | 67 | Q5 | Fracturación | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | DIFUSO |
| 10428 | 10484 | 56 | Q5 | Fracturación | 2,74 | 4,39 | 1,54 | 2,46 | 0,5 | 0,5 | 0,28 | 0,28 | DIFUSO |
| 10484 | 10719 | 235 | 1 | Fracturación | 0,34 | 2,58 | 0,8 | 6,05 | 0,34 | 0,5 | 0,8 | 1,18 | DIFUSO |
| 10719 | 10959 | 240 | 1 | Fracturación | 0,3 | 0,3 | 0,73 | 0,73 | 0,3 | 0,3 | 0,73 | 0,73 | DIFUSO |
| 10959 | 11009 | 50 | 1 | *Falla* | 0,29 | 2,21 | 0,15 | 1,1 | 0,29 | 0,5 | 0,15 | 0,25 | PUNTUAL |
| 11009 | 11283 | 274 | 1 | Fracturación | 0,28 | 2,1 | 0,76 | 5,74 | 0,28 | 0,5 | 0,76 | 1,37 | DIFUSO |
| 11283 | 11550 | 267 | 1 | *Falla* | 0,26 | 1,93 | 0,69 | 5,16 | 0,26 | 0,5 | 0,69 | 1,34 | PUNTUAL |
| 11550 | 12255 | 705 | 1 | Fracturación | 0,26 | 1,93 | 1,81 | 13,62 | 0,26 | 0,5 | 1,81 | 3,53 | DIFUSO |
| 12255 | 12305 | 50 | 1 | *Falla* | 0,25 | 1,91 | 0,13 | 0,95 | 0,25 | 0,5 | 0,13 | 0,25 | PUNTUAL |
| 12305 | 12750 | 445 | 1 | | 0,26 | 0,26 | 1,14 | 1,14 | 0,26 | 0,26 | 1,14 | 1,14 | DIFUSO |
| 12750 | 12800 | 50 | 1 | *Falla* | 1,93 | 1,93 | 0,97 | 0,97 | 0,5 | 0,5 | 0,25 | 0,25 | PUNTUAL |
| 12800 | 13748 | 948 | 1 | | 0,26 | 0,26 | 2,46 | 2,46 | 0,26 | 0,26 | 2,46 | 2,46 | DIFUSO |
| 13748 | 13798 | 50 | 1 | *Falla* | 0,26 | 1,93 | 0,13 | 0,97 | 0,26 | 0,5 | 0,13 | 0,25 | PUNTUAL |
| PORTAL OCCIDENTAL | | | | | | | | | | | | | |
| 13798 | 14423 | 625 | 1 | | 0,25 | 0,25 | 1,57 | 1,57 | 0,25 | 0,25 | 1,57 | 1,57 | DIFUSO |
| 14423 | 14503 | 80 | 1 | *Falla* | 0,25 | 1,87 | 0,2 | 1,5 | 0,25 | 0,5 | 0,2 | 0,4 | PUNTUAL |

| K | | l | CI | F | CAUDAL ESTABILIZADO SIN PRE-INYECCIONES | | | | CAUDAL ESTABILIZADO CON PRE-INYECCIONES | | | | Tipo de flujo |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Pi | Pf | Longitud | Complejo Hidrogeológico | Grado de fracturación | Caudal específico con 2 tubos | | Caudal total con 2 tubos | | Caudal específico con 2 tubos | | Caudal total con 2 tubos | | |
| | | | | | MIN | MAX | MIN | MAX | MIN | MAX | MIN | MAX | |
| m | m | m | - | - | l/s/100 m | l/s/100 m | l/s | l/s | l/s/100 m | l/s/100 m | l/s | l/s | - |
| 14503 | 14790 | 287 | 1 | | 0,25 | 0,25 | 0,72 | 0,72 | 0,25 | 0,25 | 0,72 | 0,72 | DIFUSO |
| 14790 | 15124 | 334 | 4b | Fracturación | 14,74 | 24,56 | 49,22 | 82,04 | 0,5 | 0,5 | 1,67 | 1,67 | DIFUSO |
| 15124 | 15174 | 50 | 4b | *Falla* | 14,34 | 23,9 | 7,17 | 11,95 | 0,5 | 0,5 | 0,25 | 0,25 | PUNTUAL |
| 15174 | 15234 | 60 | 4b | Fracturación | 13,92 | 23,2 | 8,35 | 13,92 | 0,5 | 0,5 | 0,3 | 0,3 | DIFUSO |
| 15234 | 15528 | 294 | 4a | | 3,47 | 3,47 | 10,2 | 10,2 | 3,47 | 3,47 | 10,2 | 10,2 | DIFUSO |
| 15528 | 15578 | 50 | 4a | *Falla* | 3,34 | 12,52 | 1,67 | 6,26 | 0,5 | 0,5 | 0,25 | 0,25 | PUNTUAL |
| 15578 | 16158 | 580 | 4a | | 3,06 | 3,06 | 17,73 | 17,73 | 3,06 | 3,06 | 17,73 | 17,73 | DIFUSO |
| 16158 | 16208 | 50 | 4a | *Falla* | 2,9 | 10,89 | 1,45 | 5,44 | 0,5 | 0,5 | 0,25 | 0,25 | PUNTUAL |
| 16208 | 16736 | 528 | 4a | | 2,57 | 2,57 | 13,56 | 13,56 | 2,57 | 2,57 | 13,56 | 13,56 | DIFUSO |
| 16736 | 17001 | 265 | 4a | *Falla* | 1,98 | 7,44 | 5,26 | 19,71 | 0,5 | 0,5 | 1,33 | 1,33 | PUNTUAL |
| 17001 | 17312 | 311 | 4b | Fracturación | 8,22 | 8,22 | 25,55 | 25,55 | 0,5 | 0,5 | 1,56 | 1,56 | DIFUSO |
| 17312 | 17482 | 170 | 1 | | 0,3 | 0,3 | 0,5 | 0,5 | 0,3 | 0,3 | 0,5 | 0,5 | DIFUSO |
| PORTAL OCCIDENTAL | | | | | | | | | | | | | |
| 17482 | 17614 | 132 | 1 | *Falla* | 0,29 | 2,18 | 0,38 | 2,87 | 0,29 | 0,5 | 0,38 | 0,66 | PUNTUAL |
| 17614 | 17932 | 318 | 1 | | 0,31 | 0,31 | 0,99 | 0,99 | 0,31 | 0,31 | 0,99 | 0,99 | DIFUSO |
| 17932 | 17982 | 50 | 1 | *Falla* | 0,33 | 2,5 | 0,17 | 1,25 | 0,33 | 0,5 | 0,17 | 0,25 | PUNTUAL |
| 17982 | 18227 | 245 | 1 | | 0,35 | 0,35 | 0,85 | 0,85 | 0,35 | 0,35 | 0,85 | 0,85 | DIFUSO |
| 18227 | 18472 | 245 | 1 | | 0,33 | 2,5 | 0,81 | 6,13 | 0,33 | 2,5 | 0,81 | 6,13 | DIFUSO |
| 18472 | 18513 | 41 | Q5 | Fracturación | 2,36 | 3,77 | 0,97 | 1,55 | 0,5 | 0,5 | 0,21 | 0,21 | DIFUSO |
| PORTAL | | | | | | | | | | | | | |

| K | | l | CI | F | CAUDAL ESTABILIZADO SIN PRE-INYECCIONES | | | | CAUDAL ESTABILIZADO CON PRE-INYECCIONES | | | | Tipo de flujo |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Pi | Pf | Longitud | Complejo Hidrogeológico | Grado de fracturación | Caudal específico con 2 tubos | | Caudal total con 2 tubos | | Caudal específico con 2 tubos | | Caudal total con 2 tubos | | |
| | | | | | MIN | MAX | MIN | MAX | MIN | MAX | MIN | MAX | |
| m | m | m | - | - | l/s/100 m | l/s/100 m | l/s | l/s | l/s/100 m | l/s/100 m | l/s | l/s | - |
| ORIENTAL | | | | | | | | | | | | | |
| | | 8180 | | | | | 159 | 266 | | | 63 | 72 | |

#### 3.2.7.7 Vulnerabilidad intrínseca del acuífero superficial (Método God)

En éste capítulo se ilustra la valoración de la susceptibilidad del acuífero superficial a la contaminación debido a la potencial interferencia que sobre el mismo pudiera ejercer la excavación de los túneles Seminario y Santa Elena.

Para el caso del túnel Santa Elena, el proyecto prevé que los dos tubos que lo conforman se construirán bajo coberturas elevadas, factor que limita las posibilidades de contaminación del acuífero superficial únicamente a la zona de los portales. Sin embargo, para tener una visión completa de la situación, se ha decidido extender el análisis a lo largo de todo el túnel.

Para el caso específico del túnel Seminario, como se ha indicado anteriormente, no se ha identificado un acuífero superficial, sin embargo se hace una estimación de la vulnerabilidad con base en los datos disponibles y asumiendo la presencia de napas colgadas localizadas en la parte más profunda de la zona de cobertura.

A lo largo de los dos túneles la eventual interferencia de las actividades de excavación con los cursos de aguas superficiales y subterráneas ha sido valorada de manera puntual aplicando la metodología del DHI (*Drawdown Hazard Index*), explicada más adelante.

##### 3.2.7.7.1 Cálculo de la vulnerabilidad con el Método God

En función de las características geológicas del área de influencia de los túneles, a cada uno de los tres parámetros se le asignó un valor comprendido entre 0 y 1, para un total de tres valores. La puntuación obtenida y relacionada con las características de los parámetros considerados por el método G.O.D, se reportan en la tabla 36.

El índice de vulnerablidad se obtiene del producto de los tres valores siguientes:

$$I = G \times O \times D$$

El valor del índice (I) varía también entre 0 (vulnerabilidad baja) y 1 (vulnerabilidad elevada). El método prevé 5 (cinco) clases de vulnerabilidad:

- Despreciable I = 0 – 0,1
- Baja I = 0,1 – 0,3
- Moderada I = 0,3 – 0,5
- Alta I = 0,5 – 0,7
- Elevada I = 0,7 – 1,0

Como se ha indicado anteriormente, los parámetros utilizados para determinar el valor del índice (I) son los siguientes:

- (G) Tipo de agua subterránea
- (O) Tipo de acuífero
- (D) Profunidad del agua subterránea

Para determinar los valores correspondientes a los tres parámetros antes indicados, se llevó a cabo un análisis específico en ambiente GIS, representando cada uno de ellos en forma de raster con resolución de 10m x 10m. A cada una de las celdas de los diferentes “raster” se le asignó un valor comprendido entre 0 y 1, de acuerdo a los criterios indicados en la tabla a continuación

relacionada. En la siguiente Figura se muestra un diagrama que ilustra los pasos seguidos para el cálculo G.O.D.; en los parágrafos siguientes se describe con detalle el procedimiento seguido.

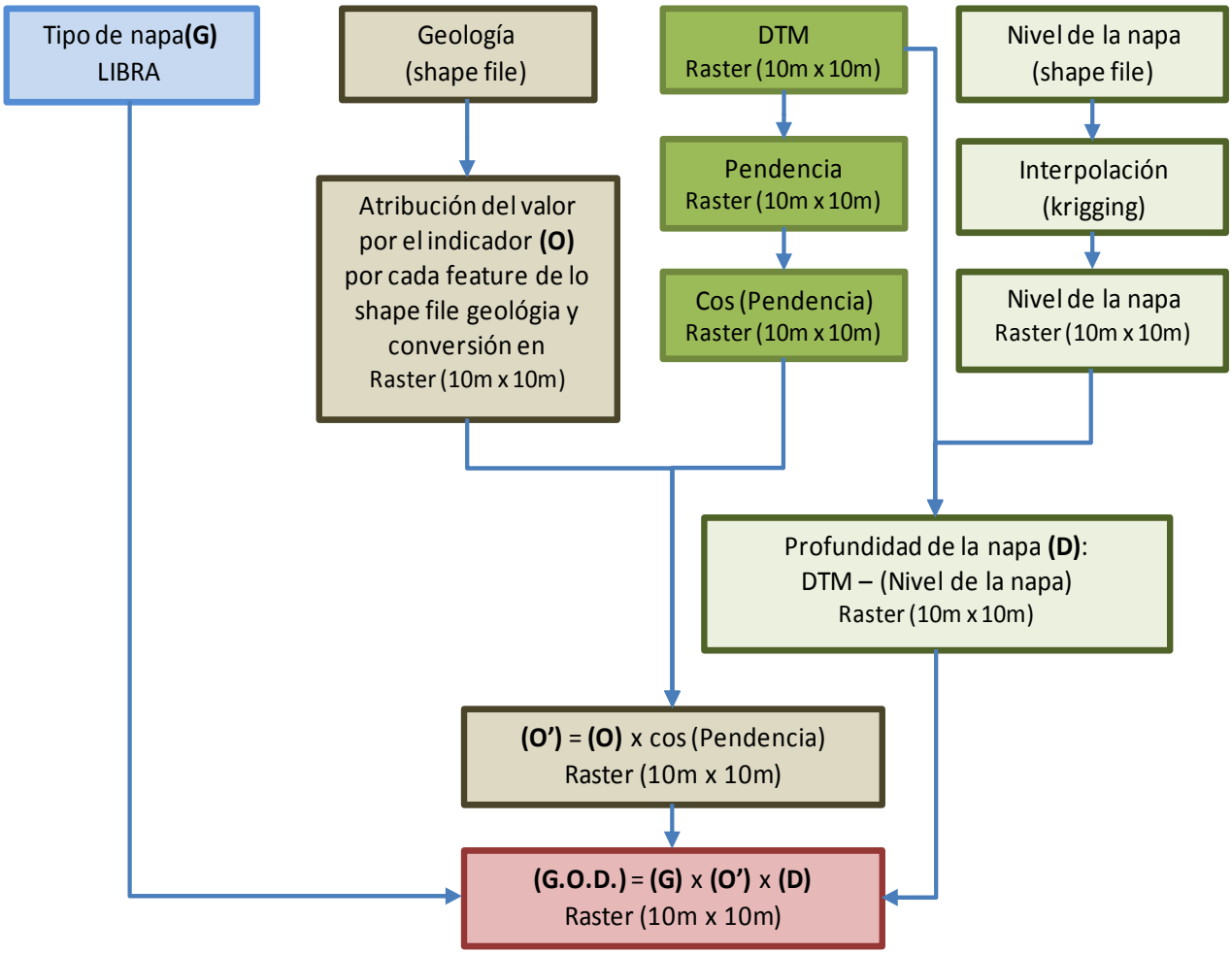



Figura 3-269 - Pasos operativos para el cálculo de los tres parámetros empleados por el método G.O.D. para el cálculo del índice de vulnerabilidad del acuífero.

Fuente: Consorcio Geodata

Tabla 3-125 - Lista de los tres parámetros considerados en el método G.O.D. para la valoración de la vulnerabilidad del agua subterránea. Para cada uno de los tres parámetros se indican las clases consideradas y su respectiva puntuación

| Parámetro | Clases del parámetro | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| (G) Tipo de agua subterránea | Ausente | Saltante o confinada | Confinada | Semi-confinada | Semi-libre | Libre | - |
| Puntuación | 0 | 0,1 | 0,2 | 0,3 | 0,5 | 1 | - |
| (O) Tipo de acuífero | Terrenos residuales | Limos aluvionalesi - Loess | Arena eólica | Arenas aluvionales o fluvio- | Gravas | Sedimentos no consolidados | - |

| Parámetro | Clases del parámetro | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| (roca meteorizada) | | | | glaciares | | | |
| Puntuación | 0,4 | 0,5 | 0,6 | 0,7 | 0,8 | 0,9 – 1,0 | - |
| (D) Profundidad del agua subterránea | >100m | 50 – 100 m | 20 – 50 m | 10 – 20 m | 5 – 10 m | 2 – 5 m | <2m |
| Puntuación | 0,4 | 0,5 | 0,6 | 0,7 | 0,8 | 0,9 | 1 |

Fuente: Foster et al, 2002.

#### *3.2.7.7.1.1 (G) Tipo de agua subterránea*

A los fines del presente estudio y teniendo en cuenta las condiciones ambientales dominantes en el área de influencia de los túneles Seminario y Santa Elena, puestas en evidencia ya sea por los estudios previos como por investigaciones complementarias relacionadas con el componente hidrogeológico realizadas por Geodata, es clara la presencia dominante de un acuífero no confinado, localizado en correspondencia con los depósitos cuaternarios que sirven de cobertura al basamento rocoso en el cual se desarrolla el túnel Santa Elena. En consecuencia el valor del parámetro (G) es igual a 1.

#### *3.2.7.7.1.2 (O) Tipo de Acuífero*

La identificación del tipo de acuífero se ha hecho de acuerdo al siguiente procedimiento:

1. Correlación de las unidades litológicas presentes en el área de influencia de los túneles con los tipos de depósitos considerados por el método G.O.D.;
2. Aplicación de los valores indicados en la tabla anterior para el parámetro (O) de un factor de corrección para tener en cuenta de las pendientes de las laderas;
3. Creación de la temática relacionada con el parámetro (O).

**Correlación de las formaciones geológicas con las clases de materiales considerados por método G.O.D.**

La correlación entre las formaciones que afloran en el área de influencia de los túneles y los depósitos considerados por el método G.O.D. ha sido hecha con base en los siguientes criterios:

Para los depósitos cuaternarios se ha hecho una correlación directa entre el tipo de material indicado en la cartografía geológica y la categoría indicada en la siguiente tabla:

Tabla 3-126. Valor de parámetro G para depósitos cuaternarios

| Depósito | Categoría del método G.O.D. | Valor del parámetro (G) |
|---|---|---|
| Depósitos antrópicos | Suelos residuales | 0,4 |
| Depósitos cuaternarios detríticos y gravitacionales | Limos aluvionales - Loess | 0,5 |
| Depósitos aluvionales y aluvionales/torrenciales | Arenas aluvionales o fluvioglaciares | 0,7 |

Fuente: Consorcio Geodata

Para los sectores de ladera caracterizados por la presencia de depósitos coluviales la correlación ha sido hecha con los materiales de alteración de la roca "in situ" en términos de granulometría dominante, comparando esta última con la categoría indicada en la siguiente Tabla. Esta valoración se ha basado en los datos del perfil hidrogeológico de los túneles Seminario y Santa Elena.

Tabla 3-127. Valor del parámetro G para macizos alterados

| Litotipo | Producto de alteración | Categoría del metodo G.O.D. | Valor del parámetro (G) |
|---|---|---|---|
| Batolito Antioqueño<br>Stock de Las Estancias<br>Stock di Samarcanda | Saprolito (arena, arena limosa y limo arenoso) | Arena eólica | 0,6 |
| Anfibolitas de Medellín<br>Migmatitas de Puente Peláez<br>Gneis de la Ceja<br>Dunitas de Medellín<br>Metabasitas del Picacho<br>Gneis milonitico de Sajonia<br>Zonas de cabalgamiento<br>Gabro de San Diego<br>Gabro de San Diego fracturado | Suelos residuales/transición suelo-saprolito (limos y limos arcillosos) | Limos aluvionales - Loess | 0,5 |

Fuente: Consorcio Geodata

En este sentido se ha definido un factor de corrección calculado como el coseno de las pendientes de las laderas expresado en grados. Tal cálculo ha sido hecho en ambiente GIS. A partir del "raster"del modelo digital del terreno (DTM) se ha generado el "raster" relacionado con las pendientes de las laderas. El área de influencia de los túneles se caracteriza por presentar pendientes comprendidas entre 0° y 70°, con una prevalencia de celdas con pendientes comprendidas entre 0° y 14° (50% de las celdas del DTM). Las celdas con mayores inclinaciones (>30°) representan el 4% del total de las celdas del DTM. El restante 46% de las celdas se caracterizan por presentar una pendiente comprendida entre 14° y 30°.

Sucesivamente, para cada celda del raster de la pendiente se ha calculado el coseno del ángulo de inclinación. El valor obtenido permite corregir el valor del parámetro (O), que se redujo en el caso de celdas de mayor inclinación. La magnitud de la corrección se reduce al disminuir el valor de inclinación de la celda.

El parámetro (O) corregido es por lo tanto dado por la siguiente fórmula:

(O') = (O) x cos(pendiente de la celda)

El resultado del procedimiento aplicado se muestra en la siguiente figura:

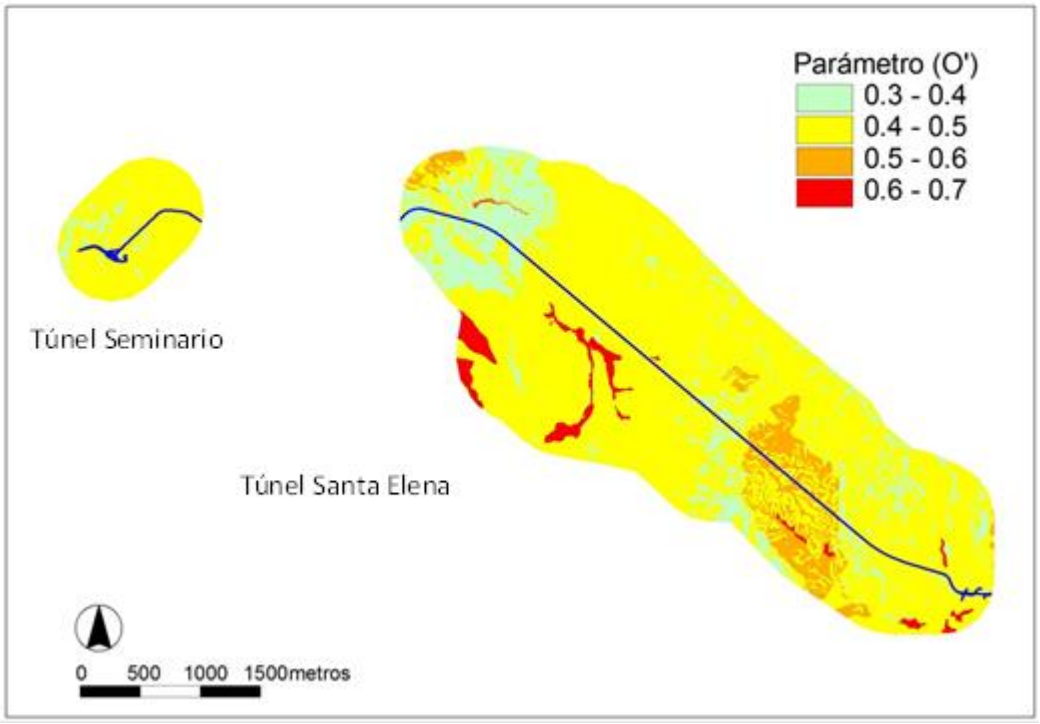



Figura 3-270 - Valores calculados para el parámetro (O') para los sectores del área de influencia de los túneles. La línea azul indica el trazado de los túneles Seminario y Santa Elena

Como se puede observar en la figura anterior, los sectores caracterizados por valores más altos del parámetro (O') son aquellos localizados en correspondencia con el fondo de los valles (valores comprendidos entre 0,6 y 0,7) y en los sectores donde afloran las formaciones correspondientes al Batolito Antioqueño, al stock de Las Estancias y al Stock de Samarcanda (con valores comprendidos entre 0,5 y 0,6), cuya alteración genera un depósito más arenoso que el derivado de las rocas metamórficas (Anfibolitas, Gneis milonítico). Los sectores que representan una mayor inclinación como por ejemplo el portal occidental del túnel Santa Elena, se caracterizan por presentar valores más bajos del parámetro (O'), comprendidos entre 0,3 y 0,4.

#### *3.2.7.7.1.3 (D) Profundidad del Agua Subterránea*

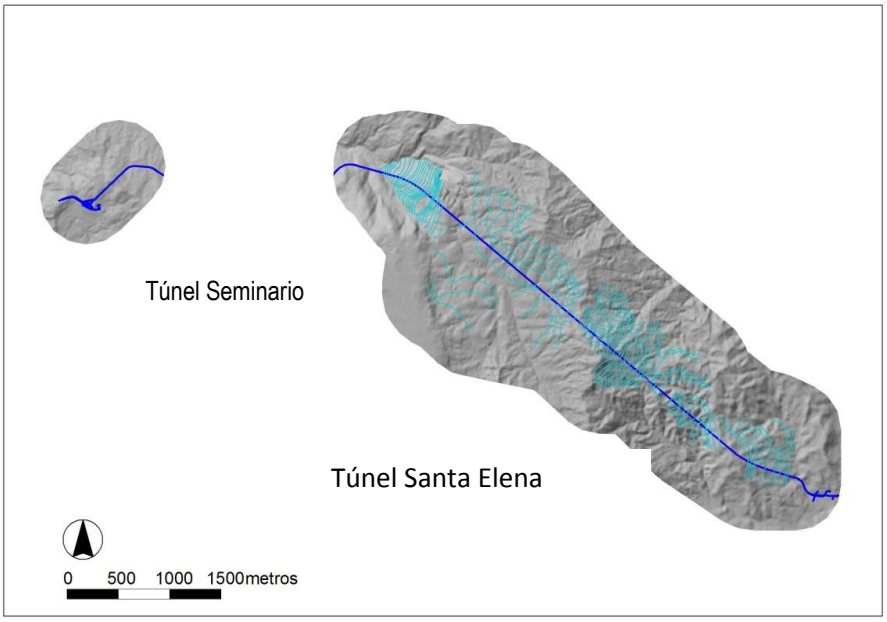
Los valores de la profundidad del agua subterránea (D) o dicho de otra manera la distancia entre la superficie topográfica del terreno y la tabla de agua en profundidad, han sido obtenidos a partir de los siguientes datos:

- Carta de niveles del agua subterránea: Mapa piezométrico primera lectura (Ver Anexo – Estudio Hidrogeológico). La carta no presenta datos para el Túnel Seminario, dado que para esta área los piezómetros construidos a profunidades de 30 y 40 m no evidenciaron presencia de la napa y por lo tanto, para este sector el valor del parámetro (D) fue considerado igual a 0,5 (profundidad comprendida entre 50 m y 100 m).
- Carta del retículo hidrográfico
- Modelo digital del terreno (raster 10m x 10m)

El nivel del agua subterránea se ha obtenido interpolando los valores de las isopiezas del nivel del agua subterránea, elaborado como "shape file" en ambiente GIS (Figura 74A). En el proceso de

interpolación se han considerado también las cotas de los cursos de agua superficiales presentes en el proyecto, asumiendo la existencia de condiciones de equilibrio entre el agua superficial y el agua subterránea. El proceso de interpolación ha permitido obtener un "raster" con resolución de 10m x 10m, para el que a cada celda le corresponde un valor de la cota absoluta del agua subterránea.

En la siguiente figura se puede observar las (A) Líneas isopiezométricas tomadas de la carta piezométrica y reportada como shape file en ambiente GIS (líneas azul claro) para el Túnel Seminario no se ha elaborado una carta piezométrica y el nivel de la napa se ha asumido ha profundidades mayores a 50 m desde superficie (B) Raster del nivel piezométrico del agua subterránea (metros sobre el nivel del mar: m.s.n.m.). La línea azul indica el trazado de los túneles en los dos casos (A y B).



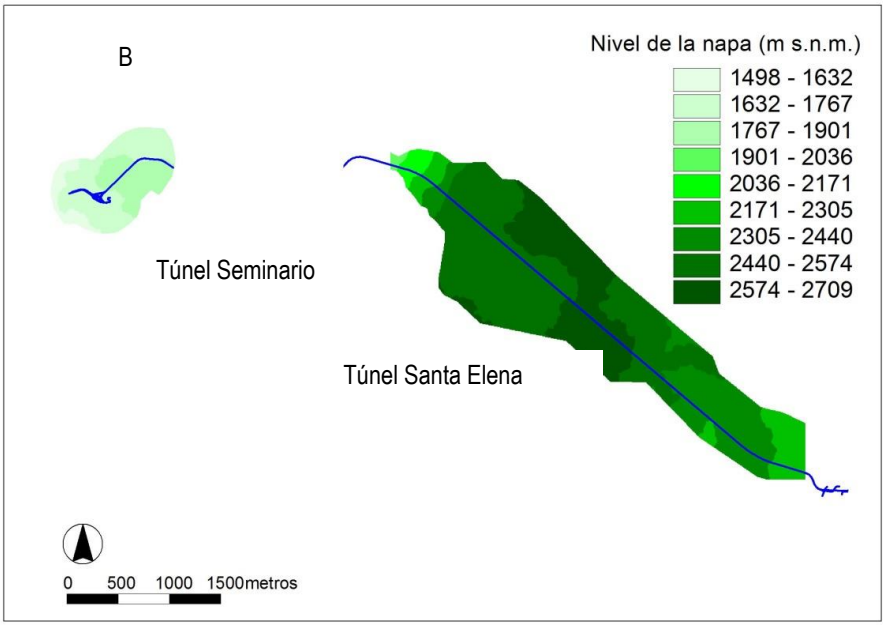



Figura 3-271 - Líneas piezométricas
Fuente: Consorcio Geodata

Mediante algebra raster, al valor de la celda del modelo digital del terreno se le ha sustraído el valor raster relacionado con la cota absoluta del agua subterránea. El resultado obtenido (también en forma raster), corresponde a la profundidad en metros del agua subterránea. Los valores en metros han sido convertidos en las clases de valores mostrados en la Tabla anterior, obteniendo un raster de 10m x 10m con los valores del parámetro de profundidad (D) (Ver siguiente figura).

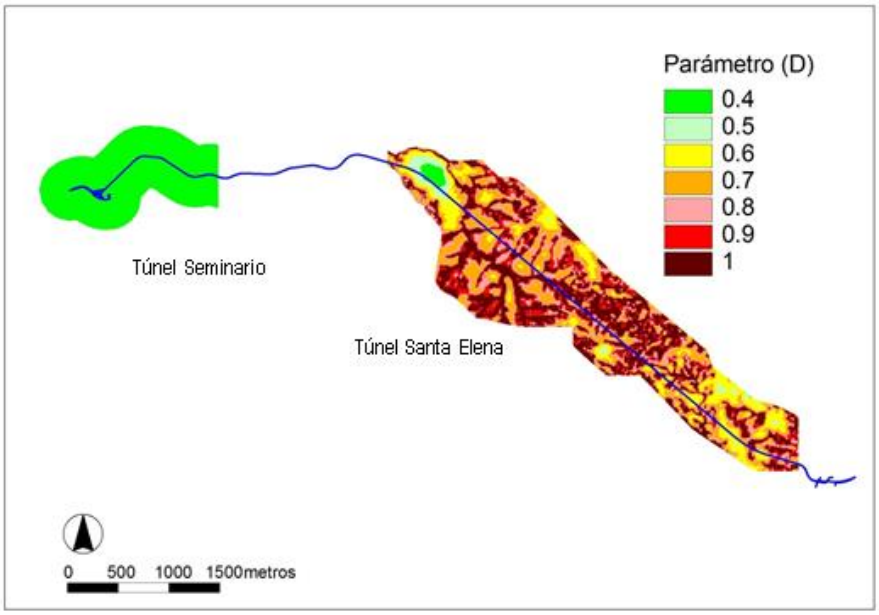



Figura 3-272 - Valores calculados para el parámetro D para los sectores localizados en el área de influencia de los túneles. La línea azul oscuro indica la traza de los túneles
Fuente: Consorcio Geodata

En primer lugar se hace notar, para el túnel Seminario, que los datos tomados en correspondencia con los dos piezómetros construidos en inmediaciones de sus portales no indicaron presencia de agua subterránea. Por esta razón se ha decidido considerar para todo este sector la presencia de una hipotética napa a una profundidad mayor a 50 m (valor del parámetro D igual a 1, como se indica en las tablas anteriores). En lo que respecta al túnel Santa Elena, los valores más bajos del parámetro de profundidad (D) fueron identificados en correspondencia con el área del portal occidental.

#### *3.2.7.7.1.4 Cáculo del Nivel de Vulnerabilidad del Acuifero Superficial (I)*

Para el cálculo del parámetro de vulnerabilidad del acuífero superficial (I) fueron utilizados los siguientes datos raster:

a) Raster relacionado con los valores del parámetro "Tipo de acuífero (O')"
b) Raster relacionado con los valores del parámetro "Profundidad al agua subterránea (D)"

Dado que para el tipo de agua subterránea se asume la presencia continua de una superficie libre para toda el área de estudio, el valor del respectivo parámetro (G), expresado de acuerdo con las especificaciones del método G.O.D., resulta ser igual a 1 y por lo tanto se omite en el cálculo.

Los resultados del procedimiento aplicado para calcular la vulnerabilidad del acuífero superficial se muestra en la siguiente figura:

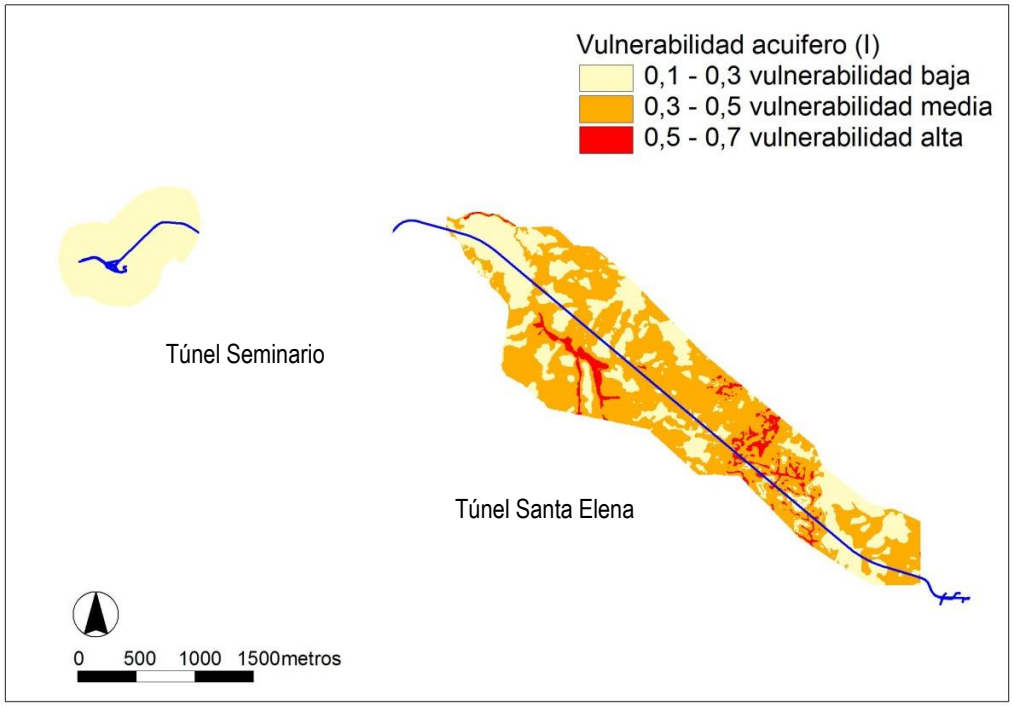



Figura 3-273 - Cálculo de los valores del índice de vulnerabilidad del acuífero superficial (I) para los sectores dentro del área de influencia aledaños a los túneles. La línea de color azul indica el trazado de los túneles Seminario y Santa Elena. Fuente: Consorcio Geodata

Los valores obtenidos para el índice de vulnerabilidad (I) oscilan entre 0,1 y 0,7. Por lo tanto, fueron identificados tres niveles de vulnerabilidad[23]:

**Vulnerabilidad Baja** (0,1-0,3): vulnerabilidad evidenciada en el largo plazo en el caso que los contaminantes sean vertidos o lixiviados de manera amplia y continua.

**Vulnerabilidad Media** (0,3-0,5): vulnerabilidad evidenciada a algunos contaminantes, pero sólo se son vertidos o lixiviados de manera continua.

**Vulnerabilidad Alta** (0,5-0,7): vulnerabilidad a muchos contaminantes (excepto aquellos fuertemente absorbidos o velozmente transformados) con rápido impacto en todos los escenarios de contaminación.

Como resulta del análisis de la figura anterior, los sectores caracterizados por un nivel alto de vulnerabilidad del acuífero se localizan en el área del fondo de los valles, en particular en el área donde afloran las formaciones cuya alteración produce un sedimento más arenoso que el derivado de las rocas metamórficas (Batolito Antioqueño, Stock de Las Estancias y Stock de Samarcanda). El área dentro de la cual se localiza la zona del portal occidental del túnel Santa Elena presenta un nivel de vulnerabilidad baja (principalmente debido a la mayor inclinación de la ladera), mientras que la zona del portal oriental del mismo túnel presenta un nivel de vulnerabilidad medio. En el Anexo 11 del Estudio Hidrogeológico encontrado en el Anexo 3-3 se presenta el mapa de vulnerabilidad en detalle.

Para el túnel Seminario el nivel consiguiente de vulnerabilidad del acuífero resultaría ser bajo.

#### 3.2.7.7.2 Escenario del riesgo de contaminación del acuífero superficial

En este parágrafo se describen brevemente las principales fuentes de peligro de contaminación para el acuífero superficial, las fuentes de contaminación y la modalidad de transporte de los contaminantes, así como las contramedidas a adoptar para reducir los riesgos conexos. La gestión adecuada de esta componente permitirá cumplir con el standard previsto por las normas ambientales.

Se hace notar que para una correcta valoración de los riesgos ligados al acuífero superficial es necesario tener un conocimiento previo de los materiales que serán utilizados en la construcción de los túneles y de la eventual presencia de centro de peligro (p.e. áreas urbanizadas, industriales, etc.).

Los únicos sectores potencialmente expuestos a la contaminación del acuífero superficial corresponden a las zonas de los portales de los dos túneles, donde la excavación podría efectivamente interceptar el agua subterránea (falda). Del cálculo de la vulnerabilidad del acuífero superficial, resulta que para el túnel Seminario la zona del portal occidental del túnel Santa Elena presenta un nivel de vulnerabilidad bajo (esencialmente debido a la mayor profundidad del agua subterránea), mientras que la zona del portal oriental presenta un nivel de vulnerabilidad medio.

A igual número de manantiales en peligro potencial, los riesgos conexos a la contaminación del agua subterránea, serán bajos para el túnel Seminario y portal occidental del túnel Santa Elena. Los riesgos serán medios en el portal oriental del túnel Santa Elena; a los que se deberá prestar mayor atención durante la fase de excavación.

[23] Foster, et.al 2012

En líneas generales, en relación con las áreas de construcción en los cuatro portales, el riesgo a la contaminación está representado esencialmente por el vaciado de sustancias peligrosas, que pueden ser posteriormente conducidas al agua subterránea a través de las aguas de lluvias, el agua de plataforma y el agua proveniente del túnel.

Con el fin de prevenir estos escenarios de riesgo existen medidas la calidad del agua y su reutilización que comprenden:

- Agua lluvias: Se implementará un sistema de drenaje y de recolección del agua de plataforma para conducirlo a plantas de tratamiento especiales antes de su vertimiento, para cada área de la obra; tal como se puede ver en detalle en el Plan de Manejo Ambiental.
- Aguas residuales de la obra: Durante la excavación se recolectarán mediante tubería específica y se conducirán a plantas de tratamiento específicas, para su respectiva sedimentación y depuración, con el fin que las mismas puedan ser reutilizadas, tal como se puede observar en el Plan de Manejo Ambiental.

Dado que las áreas de transferencia de residuos y materiales peligrosos son fuentes potenciales de contaminación, se han diseñado en el Plan de Manejo Ambiental medidas especiales que prevendrán dichas situaciones.

### 3.2.7.8 Probabilidad de afectación de los puntos de agua en superficie

Este subcapítulo ilustra la previsión, expresada en términos probabilísticos, del potencial de afectación de las fuentes de aguas localizadas en el área de influencia de los túneles Seminario y Santa Elena debido a la excavación de estas obras subterráneas.

El análisis de la probabilidad de afectación se ha llevado a cabo sobre 275 puntos de agua subterránea, representados en manantiales, pozos y aljibes, así como en 143,30 km de cursos de agua superficial (considerando todos los grados de jerarquía indicados anteriormente). Tanto los puntos de agua subterránea como los cursos de agua superficial fueron identificados durante los dos inventarios realizados en épocas de verano e invierno respectivamente y constituyen una muestra completa y suficiente de los recursos hídricos presentes en las cuencas interceptadas por el trazado de los túneles.

El análisis y los resultados obtenidos fueron hechos bajo las siguientes condiciones constructivas:

- Análisis considerando la excavación de dos tubos por cada túnel, **sin considerar** la aplicación de revestimientos y tratamientos con **pre-inyecciones** de consolidación e impermeabilización.
- Análisis considerando la excavación de dos tubos por cada túnel, **considerando** la presencia de revestimientos y tratamientos con **pre-inyecciones** de consolidación e impermeabilización.

La metodología de cálculo utilizada para este análisis es conocida como *Drawdown Hazard Index* (DHI, Dematteis et al., 2001, Torri & Dematteis, 2007[24]), fue presentada en el congreso mundial de túneles organizado por AITES ITA 2001, celebrado en Milano-Italia, y provee una definición

[24] Dematteis, A., Kalamaras, G., Eusebio, A. (2001). "A systems approach for evaluating springs drawdown due to Túnelling", AITES-ITA 2001 World Túnel Congress, Milano, Italy 10-13 june, II, pp. 257-264.
Torri, R., Dematteis, A. (2007). "Drawdown hazard of springs and wells in Túneling: predictive model and verification" Proc. XXXV IAH Congress, Groundwater and Ecosystems, Lisbon 17-21 Sept. 2007, 10 pp.

probabilística acerca de la ocurrencia del fenómeno de afectación de los recursos hídricos. En el parágrafo siguiente se describe en detalle la metodología DHI.

En la literatura existente, el tema relacionado con la probabilidad de afectación de puntos de agua en superficie debido a la construcción de obras subterráneas es tratado generalmente mediante enfoques cualitativos y subjetivos o mediante la aplicación de modelos numéricos de flujo aplicados a casos específicos. El método DHI utilizado en el presente estudio complementario para valorar la probabilidad de afectación de las fuentes de aguas superficiales debido a la construcción de los túneles Seminario y Santa Elena, representa el único método, según el conocimiento de los autores, que permite obtener un resultado mediante un proceso estandarizado y verificable. A manera de ejemplo se cita la valoración que algunos autores reconocidos han hecho del método en cuestión, como por ejemplo Vincenzi et al. (2010) quien ilustra una comparación del método DHI con el modelo numérico de flujo (ver Estudio Hidrogeológico Anexo 3-3).

Por las razones antes expuestas se concluye que el método DHI aplicado en el estudio, constituye el método idóneo para llevar a cabo la valoración de afectación aquí relacionada, dado que fue concebido específicamente para este fin y el mismo ha sido aplicado con éxito en estudios análogos realizados para túneles como por ejemplo túnel del Perthus (España-Francia), túnel Torino-Lyon (Italia-Francia), túnel Villarodaine Bourget (Francia) y túnel Terzo Valico (Italia).

Adicionalmente, el cálculo mediante el método DHI, ha sido verificado a través de los modelos numéricos de flujo realizado en correspondencia con los sectores más críticos del túnel Santa Elena (Ver Estudio Hidrogeológico Anexo 3-3). El cálculo numérico ha sido realizado en correspondencia con las zonas de falla localizadas a lo largo de los contactos del Gneis de Sajonia y Stock de Samarcanda con las Anfibolitas de Medellín. En el lado oriental del Stock de Samarcanda se evidencia el mayor número de manantiales y cursos de agua con probabilidad de afectación. Este sector resulta más crítico que el correspondiente lado occidental debido a la menor cobertura allí presente.

En el Anexo 12 del Estudio Hidrogeológico encontrado en el Anexo 3-3 se presentan las tablas con los valores atribuidos a los diferentes parámetros que determinan el índice DHI, cada punto analizado tanto del agua subterránea, así como de los cursos de aguas superficiales, son representados en forma gráfica en la carta de probabilidad de impacto.

#### 3.2.7.8.1 Método de cálculo

A continuación se presenta la descripción del método para la valoración del índice de probabilidad de afectación de los puntos de agua subterránea y cursos de agua superficial (DHI). Se omite la parte descriptiva de la teoría de la matriz en la cual se basa el método DHI, dado que esta descripción se encuentra detallada en la bibliografía antes citada (ver Estudio Hidrogeológico Anexo 3-3).

El sistema *acuífero – túnel* es analizado detalladamente por ocho (8) variables, que están relacionadas con el fenómeno de abatimiento del nivel freático y de la afectación de los manantiales y cursos de agua superficial. Entre estas ocho (8) variables, cuatro (4) de ellas se definen como variables fundamentales del sistema, y se refieren a las condiciones hidrogeológicas a cota del túnel en el tramo de proyección del punto de agua en superficie, y las cuatro (4) restantes son considerados como factores claves, y se relacionan con las

características geométricas y geológicas que conectan el punto de agua en superficie con el túnel en profundidad.

Con el fin de realizar el cálculo del índice de la probabilidad de afectación de los puntos de agua (DHI), a cada punto de agua se le asigna un valor numérico para cada una de las variables antes descritas, valores que representan las condiciones hidrogeológicas típicas para aquel punto de agua en particular. La asignación del valor numérico de la variable obedece siempre al siguiente criterio: valores bajos para las condiciones de menor probabilidad de afectación y valores altos para aquella de mayor probabilidad.

#### *3.2.7.8.1.1 Puntos críticos a lo largo de los cursos de agua*

Tal método de atribución de los valores de la variabilidad requiere, obviamente, tratar puntos de agua localizados geográficamente de manera univoca, y para los cuales sea posible una proyección puntual sobre el trazado del túnel.

El método ha sido concebido para la valoración del riesgo de impacto sobre manifestaciones hídricas puntuales de acuíferos subterráneos (manantiales). Para aplicar la metodología sobre la retícula hidrográfica, a lo largo de cada curso de agua superficial en examen, han sido identificados puntos críticos sobre los cuales efectuar el cálculo.

Los puntos críticos identifican situaciones geológicas particulares que pueden determinar un drenaje del curso de agua, como por ejemplo un cambio litológico o el complejo hidrogeológico, presencia de fallas, etc. A lo largo de un curso de agua se establece un punto crítico cuando se presenta por lo menos una de las tres condiciones siguientes:

- Cambio del complejo hidrogeológico que atraviesa el curso de agua
- Presencia de canales preferenciales de permeabilidad que atraviesa el curso de agua
- Cambio de la relación con el agua subterránea (napa)

#### *3.2.7.8.1.2 Sistema de proyección del punto de agua sobre el túnel*

Dado que todas las variables del sistema se relacionan con las condiciones geomecánicas e hidrogeológicas previstas a lo largo del trazado del túnel, es necesario proyectar, en planta, cada punto de agua sobre el trazado mismo, como se indica en la siguiente figura:

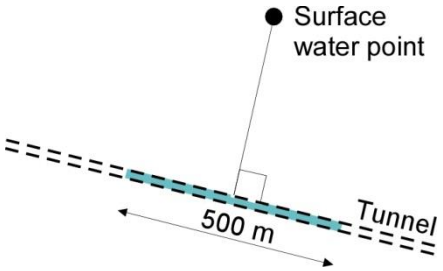



Figura 3-274 - Esquema de la relación geométrica entre la posición del punto de agua considerado y el tramo de túnel de referencia
Fuente: Consorcio Geodata

En presencia de zonas de fallas o de estructuras geológicas permeables particulares, con orientación no perpendicular al túnel, la distancia del túnel ha sido considerada a lo largo de la estructura misma, porque se supone que el hipotético flujo de agua que podría drenar al

manantial o al curso de agua superficial tendrá lugar en esta dirección. En este caso, la proyección del punto recae en correspondencia con la intersección de la zona de falla con el túnel.

En el caso en examen, en el cual se prevé la construcción de dos túneles con tubos adyacentes, la proyección de cada punto se ha hecho sobre la traza del tubo más próximo al punto en análisis. Para los puntos de agua en proximidad de los portales, cuya proyección perpendicular al trazado cae fuera del trazado mismo, la proyección se ha hecho sobre la última progresiva del túnel más cercana al punto.

La proyección en planta de cada punto de agua sobre el trazado ha permitido determinar la progresiva de referencia del punto de agua, y obtener los valores de las variables con base en las condiciones geomecánicas e hidrogeológicas previstas a lo largo el eje del túnel. Los valores han sido asignados considerando una franja de 250 m entorno a la proyección del manantial sobre el eje, porque se considera que las interacciones mayores se manifestarán sobre este intervalo.

#### *3.2.7.8.1.3 Descripción de la variabilidad del sistema*

**Variables fundamentales del sistema**

La interacción entre las cuatro variables fundamentales del sistema *acuífero-túnel* se describe en la matriz de la figura siguiente mediante relación de causa-efecto entre las mismas variables. La interacción entre ellas determina el potencial de drenaje que el tramo de túnel examinado tiene sobre los manantiales o sobre los cursos de agua superficial (PI).

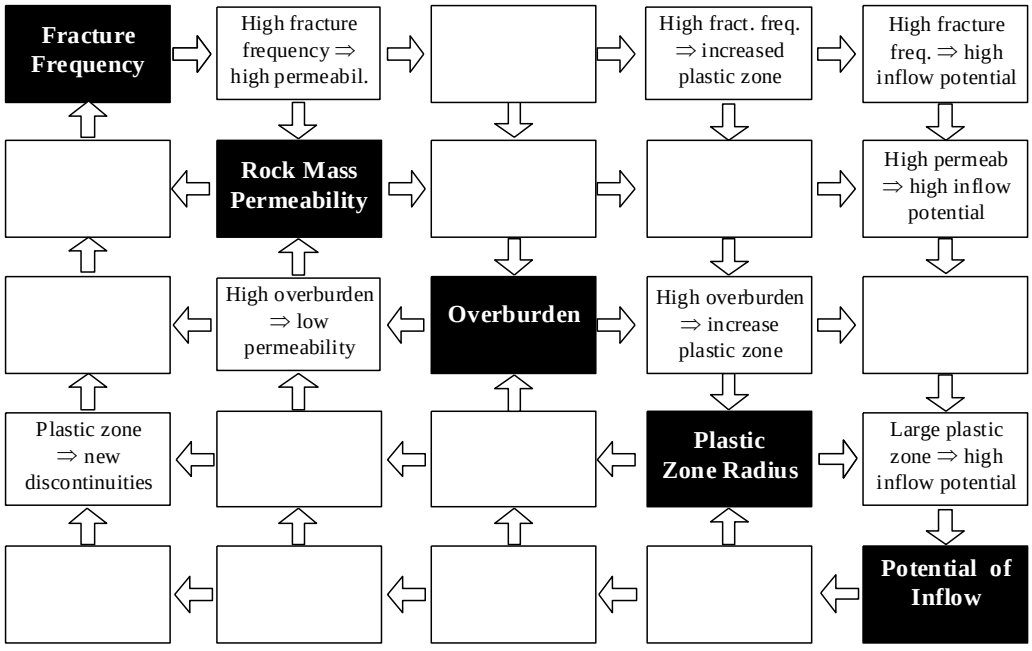



Figura 3-275 - Ejemplo conceptual de la matriz del sistema Acuifero-túnel
Fuente: Consorcio Geodata

**Frecuenca de fracturación (FF):** la presencia de fracturas mayores o menores que interceptan el túnel, condicionan directamente la posibilidad de drenaje que ellas tienen sobre el macizo. De este modo, una mayor fracturación determina una mayor permeabilidad y, en consecuencia, una mayor posibilidad de flujo al interior del túnel. Adicionalmente, la frecuencia de fracturación afecta directamente dos de las variables fundamentales descritas a continuación: la permeabilidad

del macizo y la amplitud de la zona plástica sobre el contorno de la excavación subterránea (que aumenta con la misma).

**Permeabilidad del macizo (MK):** se trata del grado de permeabilidad asignado a los diferentes complejos hidrogeológicos reconocidos en el sistema *acuífero-túnel* e interceptados por el túnel. Tal variable toma en cuenta tanto la permeabilidad debida al componente homogéneo de la fracturación (conductividad de cada fractura en particular), como la permeabilidad intrínseca de la matriz rocosa (sistema de doble porosidad) y describe un grado de permeabilidad equivalente de todo el sistema.

**Espesor de la cobertura (OV):** el espesor de la cobertura influye en el efecto drenante del túnel ya sea en el entorno de la excavación, en la zona plástica, como en el macizo mismo, donde se observa un progresivo cierre de la fractura con la profundidad debido a la variación de las condiciones de esfuerzos locales. En la siguiente figura se muestra un ejemplo del modelo conceptual.

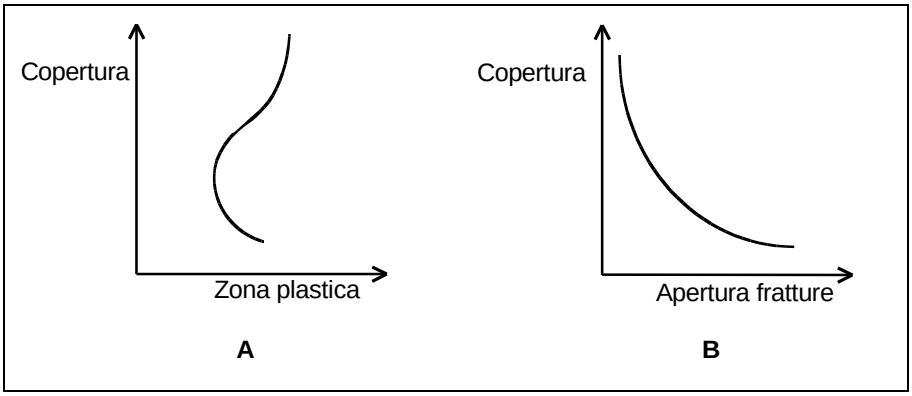



Figura 3-276 - Esquema de la influencia que la cobertura tiene sobre la amplitud de la zona plástica que se forma entorno de una excavación subterránea (A) y, a la escala del macizo, sobre la apertura media de las fracturas (B).
Fuente: Consorcio Geodata

**Amplitud de la zona plástica (PZ):** La zona plástica que se forma en el contorno de la excavación por efecto de la perturbación del campo local de esfuerzos corresponde a una franja de roca intensamente fracturada y por lo tanto de mayor permeabilidad; de amplitud variable entre 0 y 2-3 veces el diámetro de la excavación. La extensión de la zona plástica está en función del diámetro del túnel, del espesor de la cobertura, de la técnica de excavación adoptada y, más en general, de las características geomecánicas del macizo. El valor numérico de la variable PZ ha sido asignado en cada caso considerado a partir de las características geomecánicas del macizo rocoso.

Desde el punto de vista hidrogeológico, la zona plástica puede ser entendida como un volumen de roca donde aumenta el potencial drenante de la excavación, implicando un aumento del efecto drenante del túnel. La variación del efecto drenante al variar las dimensiones de la zona plástica puede ser simulada, en una primera aproximación, con enfoques analíticos tomados de la literatura[25]. Asumiendo, por ejemplo, una conductividad hidráulica del macizo rocoso del orden de $10^{-6}$ m/s y una carga hidráulica al nivel del túnel igual a 100 m, resulta como el radio del túnel influye de manera significativa en la cantidad de agua drenada (ver figura siguiente). Si se asume que en la zona plástica la permeabilidad sea superior en uno o más órdenes de magnitud a aquella

[25] p.e. túnel que drena un acuífero no perturbado infinitamente extenso en un medio homogéneo, GOODMAN et al., 1965, BRUCE et al., 1980, ALBERTS & GUSTAFSON, 1983

del macizo, entonces, al efecto drenante de la excavación se sumara a aquel de la zona plástica circunscrita en su contorno.

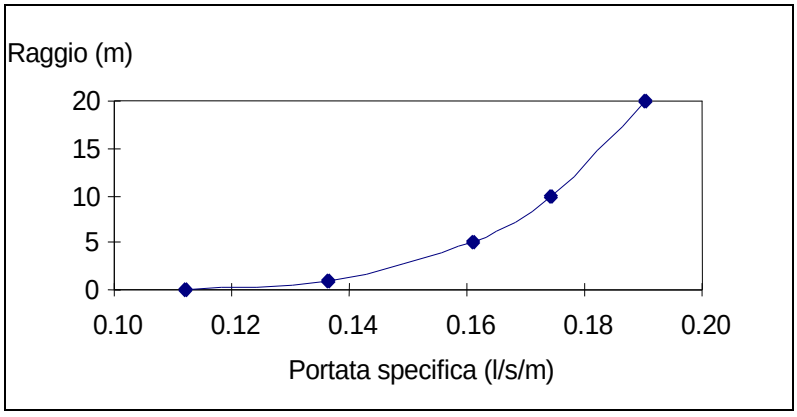



Figura 3-277 - Relación entre el radio del túnel y caudal drenado (aplicando la fórmula de GOODMAN et al., 1965)
Fuente: Consorcio Geodata

En el caso que nos ocupa, en la valoración de la variable PZ se ha considerado, conservadoramente, una zona plástica de amplitud equivalente a dos veces el radio de la excavación.

### Factores claves del sistema

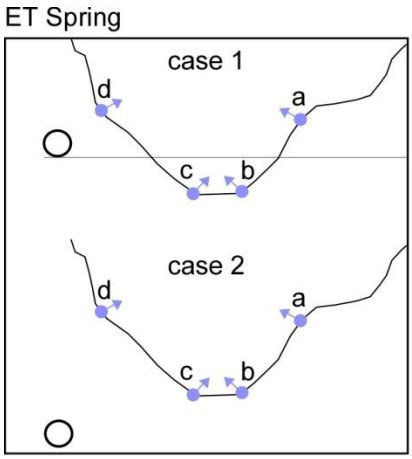
**Distancia del túnel (DT):** esta variable ha sido valorada determinando la distancia entre el punto de agua y el túnel. Para esto se considera la proyección en planta y la diferencia de cota. En presencia de zonas de falla, la distancia al túnel ha sido considerada a lo largo de la zona de falla, porque se supone que el hipotético flujo de agua que podría drenar al manantial o al curso de agua circulará a lo largo de esta dirección. Con base en la experiencia obtenida en contextos hidrogeológicos análogos, han sido asignados valores diversos para clases de distancia DT, asumiendo que para distancias inferiores a 200 m, el efecto es máximo, y para distancias superiores a 5000 m, el efecto es despreciable.

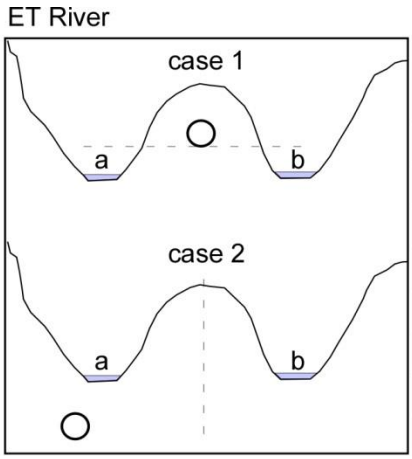
**Intersección con canales de permeabilidad alta (CP):** esta variable toma en consideración la presencia de zonas de elevada conductividad hidráulica entre el punto de agua y el túnel. Desde un punto de vista geológico, este caso puede estar representado por zonas de falla, zonas de intensa fracturación, o por niveles con disolución química, carsismo o pseudo-carsismo, como aquel mencionado en la literatura en relación con el altiplano de Santa Elena y para el caso específico de las dunitas. En el caso en el cual uno de estos canales de alta permeabilidad conecte hidráulicamente un punto de agua en superficie con el túnel, se crea una continuidad ideal entre los dos puntos. En estas condiciones la probabilidad de afectación del punto de agua crece drásticamente.

Para el caso de estudio se ha asumido una conexión punto de agua-túnel para todos aquellos puntos de agua situados a una distancia inferior o igual a 100 m de una zona de falla o pseudo-carstica.

**Efecto topográfico (ET):** se trata de una variable que considera el aspecto morfológico del contexto en el que se sitúa el punto de agua en evaluación. La recíproca posición del punto de agua y el túnel respecto al perfil topográfico de la ladera puede influir en la probabilidad de ocurrencia del fenómeno de drenaje. En particular, se distinguen dos casos, el primero para los

manantiales y el segundo para los cursos de agua superficiales. En el esquema conceptual de la siguiente figura se muestran los casos posibles, valorados numéricamente en la tabla siguiente. El valor asignado a la variable ET asume valor de 1 para las condiciones de menor probabilidad de afectación y un valor de 2 para aquella de mayor probabilidad.




| case | ET Spring | ET River |
|---|---|---|
| 1a | 1 | 1 |
| 1b | 1 | 1 |
| 1c | 1 | - |
| 1d | 2 | - |
| 2a | 1,5 | 2 |
| 2b | 1,5 | 1,5 |
| 2c | 2 | - |
| 2d | 2 | - |

Figura 3-278 - Esquema conceptual del efecto topográfico (ET). En la tabla de la izquierda se muestran los valores que asume ET para manantiales y cursos de agua superficiales.
Fuente: Consorcio Geodata

En el caso de los manantiales, que pueden esta localizados sea sobre la ladera como en su parte inferior (pie), y por lo tanto no en el fondo del valle, se distinguen ocho (8) casos diferentes, que toman en cuenta la ubicación del manantial y el túnel sobre la misma ladera o sobre laderas diferentes y su recíproca posición en cota.

En el caso de los cursos de agua superficiales, esta variable considera la ubicación del curso de agua examinado respecto al túnel, ya sea en lo que respecta a la cota como en relación con la posición de la cuenca que contiene el curso de agua. El efecto de la cota es máximo (valor 2) cuando el túnel subyace la cuenca del curso de agua y es mínimo (valor 1) cuando el túnel es topográficamente más alto que el curso de agua. Existe luego un caso intermedio, en el cual el túnel se encuentra más abajo que el curso de agua, pero en una cuenca limítrofe (valor 1,5).

**Tipo de manantial (TS):** esta variable valora el tipo de relación que el punto de agua tiene con el sistema de flujo hídrico subterráneo. También en este caso, como se ha descrito para la variable ET, se distinguen dos casos, el primero para los manantiales y el segundo para los cursos de agua superficial.

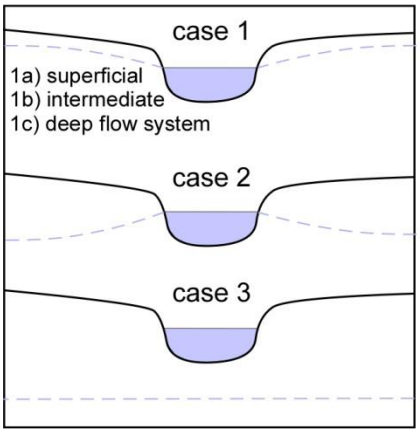
Para los manantiales, se distinguen tres tipos: superficiales, profundos y mixtos. En el caso de los manantiales superficiales la manifestación hídrica es alimentada desde los terrenos de cobertura cuaternaria o desde una variación local de la intensidad de fracturación y alteración de la parte cortical del substrato; la surgencia hídrica en este caso se localiza frecuentemente en correspondencia con fuertes cambios morfológicos de la ladera y es alimentada por sistemas de flujos locales. Los manantiales profundos son generalmente alimentados por sistemas de flujos más extensos, desarrollados al interior del macizo rocoso; los cuales pueden emerger en correspondencia con límites de permeabilidad representados por fallas o por contactos tectónicos

o estratigráficos. Los manantiales mixtos representan un caso intermedio, presentando alimentación ya sea superficial como profunda, con porcentajes variables.

En el caso en examen no se han encontrado casos de manantiales alimentados claramente y exclusivamente por circuitos profundos en el área interceptada por el trazado de los túneles Seminario y Santa Elena. Por lo tanto, todos los manantiales censados han sido clasificados como superficiales y/o mixtos.

Para los cursos de agua superficial, el aspecto relevante es su relación con el nivel freático. Haciendo referencia a la siguiente figura donde se muestra el modelo conceptual adoptado, el curso de agua puede estar en contacto directo con el acuífero (casos 1 y 2), y en este caso puede alimentarlo o ser alimentado por él, o en su defecto el curso de agua puede estar suspendido (caso 3), es decir, no en contacto directo con el acuífero. En el caso 1, en el cual el acuífero alimenta el curso de agua, se han distinguido las tres ulteriores posibilidades de alimentación (como en el caso de los manantiales): superficial (1a), mixta (1b) y profunda (1c).

En el caso de alimentación superficial, el curso de agua es alimentado por los terrenos de cobertura cuaternaria o en su defecto por depósitos superficiales. La surgencia de sistemas de flujo profundos caracteriza aquellos cursos de agua que interceptan el substrato rocoso en correspondencia con límites de permeabilidad, zonas de falla, contactos tectónicos o litológicos. Los cursos de agua con alimentación mixta representan un caso intermedio, contienen alimentación ya sea superficial como profunda, con porcentajes variables.




| case | TS River |
|---|---|
| 1a | 1 |
| 1b | 1,5 |
| 1c | 2 |
| 2 | 1,1 |
| 3 | 1 |

Figura 3-279 - Ejemplo conceptual de la relación entre cursos de agua superficiales y acuíferos. En la tabla de la izquierda se muestran los valores que asume ET para manantiales y cursos de agua.
Fuente: Consorcio Geodata

La valoración de la variable RT utiliza criterios de observación indirecta, de naturaleza geológica, del tramo en el cual discurre el curso de agua. Cuando no es claro el tipo de alimentación el punto es considerado de alimentación mixta.

A diferencia de las demás variables, que relacionan el punto de agua con la condición prevista a lo largo del túnel, el tipo de alimentación (TS) es específico de cada punto de agua examinado, independientemente de la presencia del túnel en análisis.

#### *3.2.7.8.1.4 Definición del índice de las variables*

En la tabla siguiente se definen las ocho (8) variables y su índice correspondiente, necesario para el cálculo del DHI.

Tabla 3-128 - Descripción de las ocho (8) variables del sistema acuífero-túnel y definición de los índices correspondientes

| Código | Descripción | Valor numérico |
|---|---|---|
| FF | Frecuencia de fracturación | 1 = fallas principales y/o zona de fracturación; 0,8 = zona de mayor fracturación y/o alteración hidrotermal; 0,1 = ausencia de fallas principales y/o zonas de fracturación y disolución |
| MK | Permeabilidad del macizo | 0,9 = permeabilidad de alta a muy alta; 0,75 = permeabilidad alta (Roca fracturada); 0,5 = permeabilidad media (Form.: Q2, Q5, 4b, 5); 0,25 = permeabilidad baja (Form.: 1); 0,1 = permeabilidad baja a muy baja |
| OV | Espesor de la cobertura | 0,9 = cobertura < 50 m; 0,5 = 50 m < cobertura < 100 m; 0,2 = 100 m < cobertura < 500 m; 0,1 = cobertura > 500 m |
| PZ | Extensión de la zona plástica | 1 = radio zona plástica > díametro túnel; 0 = radio zona plástica < díametro túnel |
| DT | Distancia del túnel | 1,9 = dist. eje. < 200 m; 1,5 = 200 m < dist. eje. < 500 m; 1,2 = 500 m < dist. eje. < 1000 m; 1,1 = 1000 m < dist. eje. < 5000 m; 0 = dist. eje. > 5000 m |
| CP | Intersección con canales de permeabilidad | 2 = intersección con fallas mayores y/o zone de disolución con desarrollo de régimen hidrodinámico de tipo carsico; 1,5 = presunta intersección (p.e. falla evidenciada en planta pero no en el perfil, o puntos en el tramo de una zona de falla, sin la certeza que esté conectado a ella); 1 = ninguna intersección |
| ET | Efecto topográfico | MANANTIALES Y ALJIBES<br>2 = distancia vertical > 0 y misma ladera; 1 = túnel parietal y otra ladera o distancia vertical < 0 y misma ladera; 1,5 = distancia vertical > 0 y otra ladera<br>CURSO DE AGUA<br>2 = túnel a cota inferior respecto al curso de agua y misma cuenca; 1,5 = túnel a cota inferior respecto al curso de agua y cuenca diferente 1 = túnel a cota superior respecto al curso de agua |
| TS | Tipo de manantial | MANANTIALES Y ALJIBES<br>2 = manantial profunda (alimentada desde el substrato rocoso); 1,5 = manantial mixto; 1 = manantial superficial (alimentada desde depósitos cuaternarios)<br>CURSO DE AGUA<br>2 = curso de agua alimentado por sistemas de flujos profundos; 1,5 = cursos de agua alimentados por sistemas de flujo mixtos; 1,1 = curso de agua que alimenta al acuífero; 1 = curso de agua suspendido de la superficie piezométrica del acuífero. |

Fuente: Consorcio Geodata

#### *3.2.7.8.1.5 Definición del grado de afectación*

El potencial de drenaje (PI), calculado de la matriz anterior, es definido por la siguiente ecuación:

$$PI = (41 \cdot FF + 22 \cdot MK + 17 \cdot OV + 20 \cdot PZ)/100$$

Los factores multiplicativos de las variables fundamentales que aparecen en la ecuación 11 han sido calculados mediante una matriz de interacción binaria y una matriz de interacción global.

El índice de probabilidad de afectación (DHI) es el producto del potencial de drenaje (PI) para los factores claves, normalizados respecto a su valor máximo:

$$DHI = PI \cdot CP \cdot TS \cdot DT \cdot ET \cdot 100 / DHI_{max}$$

El $DHI_{max}$, que se obtiene de la condición teórica de mayor probabilidad de afectación del punto de agua (DT = 1,9; CP = 2; TS = 2; ET = 2; FF = 1; MK = 0,9; OV = 0,9; PZ = 1) es igual a 1460,72.

Con el fin de obtener un valor normalizado entre 0 y 1, se procede a relacionar cada punto de agua en examen con el máximo valor teórico indicado en el párrafo anterior (1460,72).

El valor DHI obtenido de esta manera, teóricamente variable entre 0 y 1, ha sido reagrupado en tres clases de probabilidad de afectación basado en una retroalimentación realizada sobre túneles ya excavados como por ejemplo el Perthus localizado entre España-Francia, túnel Villarodaine Bourget localizado en Francia (Torri & Dematteis, 2007). En la tabla siguiente se indican las tres clases.

Tabla 3-129. Grado de probabilidad de afectación de los manantiales

| DHI | Índice | Probabilidad | Color identificativo |
|---|---|---|---|
| DHI<0.16 | 1 | despreciable | blanco |
| 0.16<DHI<0.24 | 2 | baja | verde claro |
| DHI>0.24 | 3 | de media a alta | verde oscuro |

Fuente: Consorcio Geodata

### 3.2.7.8.2 Resultados

En este capítulo se resumen los resultados correspondientes al estudio de impacto sobre los puntos de agua presentes en el área de influencia de los túneles Seminario y Santa Elena. El método empleado para su valoración corresponde al DHI (*Drawdown Hazard Index)*, antes descrito. Por punto de agua se entiende el agua subterránea (código AST), representada por manantiales, pozos y aljibes, así como el agua superficial, constituida por ríos y quebradas (código ASP).

Han sido analizados uno por uno un total de 275 manantiales y aljibes, de los cuales 8 están relacionados con el túnel Seminario y 267 se ubican a lo largo del trazado del túnel Santa Elena. Para la jerarquización de estos puntos de agua se remite al capítulo del balance hidrogeológico.

Del mismo modo se procedió con el análisis de todos los cursos de aguas superficiales identificados durante los inventarios realizados y fueron seleccionados 41 puntos con posibilidad de afectación localizados a los largo de estos cursos de agua, 39 de estos puntos se ubican a lo largo del trazado del túnel Santa Elena y dos se relaciona con el túnel Seminario. Para la jerarquización de estos puntos de agua se remite al subcapítulo del balance hidrogeológico.

Como fue indicado al inicio del presente capítulo, la valoración de la probabilidad de impacto ha sido realizada dos veces, considerando dos escenarios diferentes:

- Con el tratamiento de pre-inyecciones de las zonas de fallas considerando la presencia de dos tubos,

- Sin el tratamiento de pre-inyecciones de las zonas de fallas considerando la presencia de dos tubos.

El sistema de pre-inyecciones de zonas de falla y/o intensa fracturación tienen como objetivo reducir la permeabilidad global del sistema *acuífero-túnel*.

#### *3.2.7.8.2.1 Escenario con pre-inyecciones de las zonas de fallas Tuneles Seminario y Santa Elena*

La pre-inyección de todas las zonas de fallas que se encuentren a lo largo de los túneles Santa Elena y Seminario que han sido identificadas sea en los diferentes estudios realizados, tiene como objetivo obtener una consolidación de la zona fracturada y reducción de la permeabilidad del macizo inyectado, con la consecuente disminución del flujo de agua al interior de la excavación de los túneles y mejor comportamiento mecánico de la zona plástica.

Se asume que el caudal específico estabilizado en el túnel en los tramos tratados con pre-inyección deberá ser igual o inferior a 0,5l/s/100m, según las especificaciones técnicas noruegas para túneles tratados con pre-inyecciones donde es necesario contener los flujos de agua al interior de las excavaciones subterráneas[26].

En el presente estudio se ha confirmado que una vez alcanzado el objetivo de impermeabilización antes citado, la probabilidad de impacto sobre el agua subterránea y cursos de agua superficiales presentes en la zona de influencia de los túneles Seminario y Santa Elena, desciende drásticamente, resultando despreciable desde el punto de vista probabilístico. La única excepción se evidencia en el manantial AST 241, ubicado en correspondencia del portal de entrada del túnel Seminario, el cual mantiene una probabilidad baja de impacto (ver Estudio Hidrogeológico Anexo).

#### *3.2.7.8.2.2 Escenario sin pre-inyecciones de las zonas de fallas -Túnel Santa Elena*

En el Anexo – Estudio Hidrogeológico, se muestran los mapas de la probabilidad de afectación de los puntos de agua y se presenta la tabla de cálculo del índice DHI.

Análisis de los puntos de agua subterránea

Del análisis de la distribución de las distintas clases de probabilidad de afectación para el agua subterránea representada en manantiales, pozos y aljibes, una vez analizada una cantidad total de 275 puntos, resulta lo siguiente:

- 234 puntos de agua resultan con un índice DHI igual a 1, es decir, en ellos no se prevé afectación o ésta es despreciable desde el punto de vista probabilístico. Estos puntos representan el 85% del total.
- 28 puntos de agua resultan con un índice DHI igual a 2, es decir, en ellos se prevé una probabilidad de afectación baja. Estos puntos representan el 10% del total
- 13 puntos de agua resultan con un índice DHI igual a 3, es decir, en ellos se prevé una probabilidad de afectación media a alta. Estos puntos representan el 5% del total.

De lo indicado anteriormente es claro que en la mayoría de los puntos de agua subterránea analizados y localizados en la zona de influencia del túnel Santa Elena no se prevé afectación o ésta es despreciable desde el punto de vista probabilístico (85%). No obstante, existe un menor

[26] Norwegian Túnelling Society, 2011

porcentaje que se encuentra sujeto a afectación cuando no se aplica ninguna intervención de impermeabilización en las zonas de falla o zonas fracturadas a través de pre-inyecciones (15%). En los parágrafos sucesivos se analizarán en detalle estos puntos de agua considerados críticos desde el punto de vista hidrogeológico identificados con valor DHI clase 2 y 3.

Tabla 3-130 - Probabilidad de impacto de los puntos de agua en el sector del Túnel Santa Elena

| Probabilidad de impacto | | Manantiales | |
|---|---|---|---|
| | | N. | % |
| 1 | Despreciable | 234 | 85% |
| 2 | Baja | 28 | 10% |
| 3 | De media a alta | 13 | 5% |
| *Total* | | *275* | *100%* |

Fuente: Consorcio Geodata

En la tabla siguiente se muestran los puntos de agua subterránea que presentan alguna probabilidad de afectación (bajo a media-alta), especificando el tipo de punto y el caudal medido.

Tabla 3-131 - Lista y caudal de los puntos de agua subterránea con probabilidad de impacto bajo a medio-alto para el Túnel Santa Elena. Para la época de invierno se ha tomado la medición de mayor valor.

| Código | DHI | tipo | Caudal (l/s) | |
|---|---|---|---|---|
| | | | verano | invierno |
| AST-047 | 2 | manantial | 0,02 | 0,06 |
| AST-054 | 2 | manantial | 0,14 | 0,21 |
| AST-092 | 2 | manantial | 0,79 | 2,49 |
| AST-122 | 2 | manantial | 0,43 | 0,64 |
| AST-123 | 2 | manantial | 0,21 | 0,18 |
| AST-124 | 2 | manantial | 0,01 | 0,06 |
| AST-125 | 2 | manantial | 0,3 | 0,47 |
| AST-126 | 2 | manantial | 0,48 | 3,12 |
| AST-131 | 2 | manantial | 0,32 | 0,92 |
| AST-132 | 2 | manantial | 0,09 | 0,2 |
| AST-133 | 3 | aljibe | No medible | No medible |
| AST-156 | 2 | manantial | No medible | 0,03 |
| AST-177 | 3 | manantial | 0,45 | 0,63 |
| AST-187 | 2 | manantial | 0,3 | 0,69 |
| AST-189 | 2 | manantial | 0,35 | 0,62 |
| AST-191 | 3 | manantial | 0,08 | 1,84 |
| AST-192 | 2 | manantial | 0,02 | 0,22 |
| AST-193 | 2 | manantial | 0,13 | 0,17 |
| AST-194 | 2 | manantial | 0,1 | 0,37 |
| AST-197 | 2 | manantial | 0,42 | 0,54 |
| AST-203 | 3 | manantial | 0,15 | 1,02 |

| Código | DHI | tipo | Caudal (l/s) | |
|---|---|---|---|---|
| | | | verano | invierno |
| AST-206 | 2 | manantial | 0,18 | 0,21 |
| AST-211 | 2 | manantial | 0,11 | 0,26 |
| AST-212 | 2 | manantial | 0,04 | 0,43 |
| AST-214 | 3 | manantial | 0,33 | 0,45 |
| AST-220 | 3 | manantial | 0,02 | 0,33 |
| AST-221 | 2 | manantial | 0,22 | 1 |
| AST-222 | 2 | manantial | 0,39 | 0,36 |
| AST-223 | 3 | manantial | 0,26 | 0,23 |
| AST-227 | 2 | manantial | 0,1 | 0,1 |
| AST-245 | 2 | manantial | 0,09 | 0,07 |
| AST-256 | 2 | manantial | | 0,2 |
| AST-257 | 2 | manantial | | 0,34 |
| AST-269 | 3 | manantial | | 0,29 |
| AST-270 | 3 | manantial | | 0,25 |
| AST-271 | 3 | manantial | | 0,03 |
| AST-272 | 3 | manantial | | 0,25 |
| AST-273 | 3 | manantial | | 0,11 |
| Total | | | 6,51 | 19,4 |

Fuente: Consorcio Geodata

Del análisis de los resultados presentados en el anexo 3.3 y resumidos en la tabla anterior, resulta que, para el túnel Santa Elena, el agua de los manantiales y aljibes sujeta a impacto o que puede ser drenada por el túnel (con probabilidad de ocurrencia baja a media-alta), se encuentra comprendida alrededor de los 19 l/s.

### Análisis de los cursos de agua superficial

En lo que respecta a los cursos de agua superficial, como se ilustra en el capítulo 5 del presente Tomo, sobre una longitud total de cursos de agua analizados equivalente a 143,30 km, que constituye la red hídrica presente en la zona de influencia de los túneles considerando todos los grados de jerarquía, resulta lo siguiente:

- Una longitud de cursos de agua de 131,34 km resultan con un índice DHI igual a 1, es decir, en ellos no se prevé afectación o ésta es despreciable desde el punto de vista probabilístico. Lo que es equivalente al 92% del total.
- Una longitud de cursos de agua de 10,18 km resultan con un índice DHI igual a 2, es decir, en ellos se prevé una probabilidad de afectación baja. Lo que es equivalente al 7% del total.
- Una longitud de cursos de 1,58 km resultan con un índice DHI igual a 3, es decir, en ellos se prevé una probabilidad de afectación media a alta. Lo que es equivalente al 1% del total.
- La suma de todos los tramos de cursos de agua con algún riesgo de afectación equivale a 11,77 km, es decir, el 8% del total.

De lo indicado anteriormente se deduce que existe una probabilidad baja a media-alta (clase DHI 2 y 3), que pueda ser sustraída una cantidad de agua en algunos tramos del retículo hidrográfico de las cuencas Santa Elena, La Aguadita y Yarumal. Por lo que se asume que el tramo de curso de agua localizado aguas abajo de los puntos con probabilidad de afectación, pueda sufrir una pérdida de caudal hasta su confluencia con un curso de agua de orden superior.

En la siguiente tabla se muestra una lista de los puntos críticos que, de acuerdo a los análisis realizados, presentan alguna probabilidad de afectación debido a la excavación del túnel Santa Elena cuando no se aplican tratamientos de impermeabilización a través de pre-inyecciones. Estos puntos se localizan en sectores específicos del retículo hidrográfico de las cuencas Santa Elena, La Aguadita y Yarumal.

Tabla 3-132 - Impacto sobre los puntos críticos del retículo hidrográfico presente en la zona de influencia del túnel Santa Elena en ausencia de pre-inyecciones

| Impacto | | Cursos de agua | |
|---|---|---|---|
| | | N. | % |
| 1 | Despreciable | 19 | 49% |
| 2 | Bajo | 17 | 44% |
| 3 | De medio a alto | 3 | 7% |
| *Total* | | *39* | *100%* |

Fuente: Consorcio Geodata

Los puntos con probabilidad de afectación localizados en la cuenca Santa Elena se encuentran ligados a los cursos de agua que interceptan los contactos tectónicos, al oriente y occidente del Gneis Milonítico de Sajonia con las Anfibolitas. Las zonas de fallas subverticales presentes en este sector han sido consideradas como potenciales canales de flujo, que pueden conectar hidráulicamente los cursos de agua con el túnel.

Los puntos críticos SE10, SE4, SE11 y SE12 se encuentran en la parte alta de la cuenca Santa Elena, los puntos SE6, SE7, SE8 se ubican sobre afluentes menores localizados a la derecha de la misma cuenca, el punto SE2 se encuentra sobre un afluente menor situado a la izquierda, mientras que los puntos SE9 y SE39 se encuentran a lo largo del curso de agua principal de Santa Elena. El punto SE41 se encuentra en la parte alta del curso de agua conocido como La Aguadita (Ver Anexo – Estudio Hidrogeológico).

### Valoración del caudal de los cursos de agua sujetos a riesgo

Una vez obtenido el valor del índice DHI de los puntos críticos sobre los cursos de agua superficial y su respectiva ubicación en planta, ilustrados en el mapa de la probabilidad de afectación de los puntos de agua (ver Anexo – Estudio Hidrogeológico), se ha valorado la cantidad de agua que puede ser drenada por el túnel.

Con este propósito se ha considerado que la cantidad de agua que se pierde en el curso de agua, en correspondencia con un punto crítico con índice DHI mayor a 1, es igual a la cantidad de agua que se prevé drenar en el túnel cuando este intercepta la falla o discontinuidad sobre la cual se ubica este punto crítico en superficie. El caudal drenado en el túnel tramo por tramo, y falla por falla, se describe en el capítulo 7 del presente informe.

En las siguientes tablas, se reportan los valores de caudal de los cursos de agua antes de la excavación, así como la cantidad de agua que se prevé drenar en el túnel.

El caudal de los cursos de agua, como se ve en las siguientes tablas, ha sido medido en diferentes estaciones de control del caudal que el Concesionario monitorea desde el 2010 y que han sido medidos también durante el desarrollo del presente estudio. Tales medidas han sido realizadas en posiciones cercanas a los puntos críticos y por lo tanto se consideran significativas para colocarlas como referencia del caudal sujeto a riesgo.

En los casos en los cuales no se realizó una medida directa del caudal en el curso de agua, este ha sido calculado considerando la cuenca en la que se encuentra el punto con probabilidad de afectación y los datos se obtuvieron a partir del balance hidrológico realizado en ambiente GIS.

Tabla 3-133 - Caudales de los cursos de agua en los puntos críticos con clases de DHI 2 y 3 y caudales previstos en el túnel. Escenario considerado: un tubo sin pre-inyecciones

| Cuenca | Punto crítico | DHI | Estación de medida del caudal | Medida del caudal del curso de agua (l/s) | | | Zona de falla | Caudal previsto en el túnel, en ausencia de pre-inyecciones, en correspondencia con la zona de falla (l/s) | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | max | med | min | km | min | max |
| Santa Elena | SE2 | 2 | 38C | 44 | 11,4 | 1,4 | 11+283-11+550 | 0,6 | 4,3 |
| | SE39 | 2 | 10C+11C | 1375 | 527 | 100 | | | |
| | SE40 | 2 | 49C | 134,3 | 32,8 | 3,2 | | | |
| | SE7 | 2 | 24C | 20 | 1,7 | 0,2 | 12+275 | 0,1 | 0,8 |
| | SE6 | 2 | 72C | 0,8 | 0,3 | 0,1 | | | |
| | SE8 | 2 | 12C | 72,9 | 26 | 0,8 | | | |
| | SE9 | 2 | 11C | 1318,8 | 507 | 95,3 | | | |
| | SE4 | 2 | 86C | 135 | 78,5 | 29 | 12+770 | 0,8 | 0,8 |
| | | | 23CB | | | | | | |
| | | | 79C | | | | | | |
| | SE10 | 2 | 86C | 19 | 5,8 | 1,7 | | | |
| | SE 11 | 2 | 79C | 22,6 | 11 | 3,2 | 13+770 | 0,1 | 0,8 |
| | SE12 | 2 | 78C+83C | 31,1 | 14,8 | 8 | | | |
| La Aguadita | SE41 | 2 | - | 7,2 | 6 | 5,1 | 10+984 | 0,1 | 0,9 |
| Yarumal | SE 28 | 3 | | 3,9 | 3,2 | 2,8 | 15+555 | 1,4 | 5,2 |
| | SE20 | 2 | 7C | 373 | 105,6 | 25 | 16+736-17+001 | 4,4 | 16,4 |
| | SE26 | 3 | - | 29 | 24 | 21 | | | |
| | SE29 | 3 | | 18,6 | 15,4 | 13,3 | | | |
| | SE30 | 2 | 6C | 26 | 2,3 | 0 | | | |
| | SE31 | 2 | - | 0,71 | 0,59 | 0,5 | | | |
| | SE32 | 2 | - | 0,51 | 0,42 | 0,36 | | | |
| | SE35 | 2 | - | 2,27 | 1,89 | 1,62 | | | |

Fuente: Consorcio Geodata

Tabla 3-134 - Caudales de los cursos de agua en los puntos críticos con clases de DHI 2 y 3 y caudales previstos en el túnel. Escenario considerado: dos tubos sin pre-inyecciones

| Cuenca | Punto crítico | DHI | Estación de medida del caudal | Medida del caudal del curso de agua (l/s) | | | Zona de falla | Caudal previsto en los dos túnel, en ausencia de pre-inyecciones, en correspondencia con la zona de falla (l/s) | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | Max | Med | Min | km | Min | Max |
| Santa Elena | SE2 | 2 | 38C | 44 | 11,4 | 1,4 | 11+283-11+550 | 0,7 | 5,2 |
| | SE39 | 2 | 10C+11C | 1375 | 527 | 100 | | | |
| | SE40 | 2 | 49C | 134,3 | 32,8 | 3,2 | | | |
| | SE7 | 2 | 24C | 20 | 1,7 | 0,2 | 12+275 | 0,1 | 1 |
| | SE6 | 2 | 72C | 0,8 | 0,3 | 0,1 | | | |
| | SE8 | 2 | 12C | 72,9 | 26 | 0,8 | | | |
| | SE9 | 2 | 11C | 1318,8 | 507 | 95,3 | | | |
| | SE4 | 2 | 86C | 135 | 78,5 | 29 | 12+770 | 1 | 1 |
| | | | 23CB | | | | | | |
| | | | 79C | | | | | | |
| | SE10 | 2 | 86C | 19 | 5,8 | 1,7 | | | |
| | SE 11 | 2 | 79C | 22,6 | 11 | 3,2 | 13+770 | 0,1 | 1 |
| | SE12 | 2 | 78C+83C | 31,1 | 14,8 | 8 | | | |
| La Aguadita | SE41 | 2 | - | 7,2 | 6 | 5,1 | 10+984 | 0,2 | 1,1 |
| El Yarumo | SE 28 | 3 | | 3,9 | 3,2 | 2,8 | 15+555 | 1,7 | 6,3 |
| | SE20 | 2 | 7C | 373 | 105,6 | 25 | 16+736-17+001 | 5,3 | 19,7 |
| | SE26 | 3 | - | 29 | 24 | 21 | | | |
| | SE29 | 3 | | 18,6 | 15,4 | 13,3 | | | |
| | SE30 | 2 | 6C | 26 | 2,3 | 0 | | | |
| | SE31 | 2 | - | 0,71 | 0,59 | 0,5 | | | |
| | SE32 | 2 | - | 0,51 | 0,42 | 0,36 | | | |
| | SE35 | 2 | - | 2,27 | 1,89 | 1,62 | | | |

Fuente: Consorcio Geodata

En las tablas anteriores, se ha indicado también la progresiva kilométrica aproximada de la zona de falla prevista en el túnel, con indicación del caudal estimado al interior del mismo. Este dato se reporta para localizar los sectores críticos en el túnel y el caudal previsto en correspondencia con estas zonas de falla. Para mayores detalles se remite al perfil hidrogeológico (ver Anexo Estudio Hidrogeológico).

En la siguiente tabla se muestra el cálculo del balance realizado en las cuencas en las cuales se localizan los puntos críticos en donde no se realizó una medida directa del caudal.

Tabla 3-135 - Cálculo del balance realizado en las cuencas en las cuales se localizan los puntos críticos en donde no se realizó una medida directa del caudal

| | Lluvia | CK | Superficie | Q | Q |
|---|---|---|---|---|---|
| | m/a | - | m2 | (m3/s) | (l/s) |
| SE 26 | | | | | |
| Min | 2,119 | 0,29 | 1056774,1 | 0,0205923 | 20,59 |
| Max | 2,966 | 0,29 | 1056774,1 | 0,0288234 | 28,82 |
| Med | 2,459 | 0,29 | 1056774,1 | 0,0238964 | 23,9 |
| SE 28 | | | | | |
| Min | 2,119 | 0,29 | 142627,17 | 0,0027792 | 2,78 |
| Max | 2,966 | 0,29 | 142627,17 | 0,0038901 | 3,89 |
| Med | 2,459 | 0,29 | 142627,17 | 0,0032252 | 3,23 |
| SE 29 | | | | | |
| Min | 2,119 | 0,29 | 681183,13 | 0,0132735 | 13,27 |
| Max | 2,966 | 0,29 | 681183,13 | 0,0185792 | 18,58 |
| Med | 2,459 | 0,29 | 681183,13 | 0,0154033 | 15,4 |
| SE 31 | | | | | |
| Min | 2,119 | 0,29 | 25913,56 | 0,000505 | 0,5 |
| Max | 2,966 | 0,29 | 25913,56 | 0,0007068 | 0,71 |
| Med | 2,459 | 0,29 | 25913,56 | 0,000586 | 0,59 |
| SE 32 | | | | | |
| Min | 2,119 | 0,29 | 18559,81 | 0,0003617 | 0,36 |
| Max | 2,966 | 0,29 | 18559,81 | 0,0005062 | 0,51 |
| Med | 2,459 | 0,29 | 18559,81 | 0,0004197 | 0,42 |
| SE 35 | | | | | |
| Min | 2,119 | 0,29 | 83156,99 | 0,0016204 | 1,62 |
| Max | 2,966 | 0,29 | 83156,99 | 0,0022681 | 2,27 |
| Med | 2,459 | 0,29 | 83156,99 | 0,0018804 | 1,88 |
| Cuenca Santa Elena SE 39 | | | | | |
| Min | 2,119 | 0,54 | 8186627 | 0,2970456 | 297,05 |
| Max | 2,966 | 0,54 | 8186627 | 0,4157797 | 415,78 |
| Med | 2,459 | 0,54 | 8186627 | 0,3447075 | 344,71 |
| Cuenca La Aguadita SE 41 | | | | | |
| Min | 2,119 | 0,54 | 141776 | 0,0051442 | 5,14 |
| Max | 2,966 | 0,54 | 141776 | 0,0072005 | 7,2 |

| | Lluvia | CK | Superficie | Q | Q |
|---|---|---|---|---|---|
| | m/a | - | m2 | (m3/s) | (l/s) |
| Med | 2,459 | 0,54 | 141776 | 0,0059696 | 5,97 |

Fuente: Geodata

De las tablas anteriores se observa que la cantidad de agua que permanecería en los cursos de agua superficial en el caso de verificarse el impacto identificado. Esta estimación resulta de la sustracción de los valores mostrados anteriormente, o la cantidad de agua presente en el curso de agua menos el caudal máximo esperado en el túnel. Cuando el valor de caudal es obtenido utilizando los datos del balance hidrogeológico, se toma el caudal promedio anual.

En el caso en el que se considera la excavación de un solo tubo se observa que:

- Sin la ejecución del tratamientos de impermeabilización a través de pre-inyecciones, los puntos identificados en la siguiente tabla con código SE4, SE9, SE10, SE11, SE12, SE20, SE26, SE39 y SE41 no resultan sujetos a afectación total, dado que se ubican a lo largo del fondo del valle principal donde la jerarquización fluvial es de orden 4 y su caudal es por lo tanto uno de los más importantes. No obstante, en el periodo de mínima pluviosidad, existe la posibilidad que los demás puntos de agua reportados en la **¡Error! No se encuentra el origen de la eferencia.** e identificados con código SE2, SE7, SE6, SE8, SE40, SE28, SE29, SE30, SE31, SE32 y SE35 sean drenados completamente (Ver Anexo 3-3 – Estudio Hidrogeológico).
- Con la ejecución de los tratamientos de impermeabilización a través de pre-inyecciones, de acuerdo con la metodología de cálculo aplicada (DHI), no se prevé afectación de los cursos de agua en superficie o ésta se considera despreciable desde el punto de vista probabilístico (Ver Anexo 3-3 – Estudio Hidrogeológico).

Tabla 3-136 - Cantidad de agua que permanecería en los cursos de agua superficial en el caso que ocurra el drenaje a través del túnel previsto en la Tabla 3-133 (un tubo sin pre-inyecciones)

| Cuenca | Punto crítico | DHI | Cuantificación del agua que permanecería en los cursos de agua superficiales identificados en la Tabla 46. Caso: 1 tubo sin pre-inyecciones | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | Max | Med | Min |
| Santa Elena | SE2 | 2 | 39,7 | 7,1 | seco |
| | SE4 | 2 | 134,2 | 77,7 | 28,2 |
| | SE10 | 2 | 18,2 | 5 | 0,9 |
| | SE11 | 2 | 21,8 | 10,2 | 2,4 |
| | SE12 | 2 | 29,3 | 14 | 7,2 |
| | SE7 | 2 | 19,2 | 0,9 | seco |
| | SE6 | 2 | seco | seco | seco |
| | SE8 | 2 | 72,1 | 25,2 | seco |
| | SE9 | 2 | 1318 | 506,2 | 94,5 |
| | SE39 | 2 | 1370,7 | 522,7 | 95,7 |
| | SE40 | 2 | 130 | 28,5 | seco |
| La Aguadita | SE 41 | 2 | 6,3 | 5,1 | 4,2 |

| Cuenca | Punto crítico | DHI | Cuantificación del agua que permanecería en los cursos de agua superficiales identificados en la Tabla 46. Caso: 1 tubo sin pre-inyecciones | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | Max | Med | Min |
| Yarumal | SE20 | 2 | 356,6 | 89,2 | 8,6 |
| | SE26 | 3 | 12,6 | 7,6 | 4,6 |
| | SE 28 | 3 | seco | seco | seco |
| | SE 29 | 3 | 2,2 | seco | seco |
| | SE30 | 2 | 9,6 | seco | seco |
| | SE 31 | 2 | seco | seco | seco |
| | SE 32 | 2 | seco | seco | seco |
| | SE 35 | 2 | seco | seco | seco |

En el caso en el que se considera la excavación de los dos tubos se observa que:

- Sin la ejecución de tratamientos de impermeabilización a través de pre-inyecciones los puntos identificados con código SE4, SE9, SE10, SE 11, SE12, SE20, SE26, SE39 y SE41 no resultan sujetos a afectación total, dado que se ubican a lo largo del fondo del valle principal donde la jerarquización fluvial es de orden 4 y su caudal es por lo tanto uno de los más importantes. No obstante, en el periodo de mínima pluviosidad, existe la posibilidad que los demás puntos de agua reportados en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** e identificados con ódigo SE2, SE7, SE6, SE8, SE40, SE28, SE29, SE30, SE31, SE32 y SE35 sean drenados completamente (ver Anexo 3-3 – Estudio Hidrogeológico).

- Con la ejecución de los tratamientos de impermeabilización a través de pre-inyecciones, de acuerdo con la metodología de cálculo aplicada (DHI), no se prevé afectación de los cursos de agua en superficie o ésta se considera despreciable desde el punto de vista probabilístico (Ver Anexo 3-3 – Estudio Hidrogeológico).

Tabla 3-137 - Cantidad de agua que permanecería en los cursos de agua superficial en el caso que ocurra el drenaje a través del túnel previsto en la Tabla 3-134 (2 tubos con y sin pre-inyecciones)

| Cuenca | Punto crítico | DHI | Cuantificación del agua que permanecería en los cursos de agua superficial identificados en la **¡Error! o se encuentra el origen de la referencia.**. Caso: 2 tubos sin pre-inyecciones | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | Max | Med | Min |
| Santa Elena | SE2 | 2 | 38 | 6,2 | seco |
| | SE4 | 2 | 134 | 77,5 | 28 |
| | SE10 | 2 | 18 | 4,8 | 0,7 |
| | SE7 | 2 | 19 | 0,7 | seco |
| | SE6 | 2 | seco | seco | seco |
| | SE11 | 2 | 21,6 | 10 | 2,2 |
| | SE12 | 2 | 29,1 | 13,8 | 7 |

| Cuenca | Punto crítico | DHI | Cuantificación del agua que permanecería en los cursos de agua superficial identificados en la **¡Error! o se encuentra el origen de la referencia.**. Caso: 2 tubos sin pre-inyecciones | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | Max | Med | Min |
| | SE8 | 2 | 72 | 25 | seco |
| | SE9 | 2 | 1318 | 506 | 94,3 |
| | SE39 | 2 | 1370 | 522 | 94,8 |
| | SE40 | 2 | 129 | 27,6 | seco |
| La Aguadita | SE 41 | 2 | 6 | 4,9 | 4 |
| Yarumal | SE20 | 2 | 353 | 85,6 | 5 |
| | SE26 | 3 | 9 | 4 | 1 |
| | SE 28 | 3 | seco | seco | seco |
| | SE 29 | 3 | seco | seco | seco |
| | SE30 | 2 | 6 | seco | seco |
| | SE 31 | 2 | seco | seco | seco |
| | SE 32 | 2 | seco | seco | seco |
| | SE 35 | 2 | seco | seco | seco |

Fuente: Consorcio Geodata

### *3.2.7.8.2.3 Escenario sin pre-inyecciones de las zonas de falla - Túnel Seminario*

En los Anexos del Estudio Hidrogeológico, se muestran los mapas de la probabilidad de afectación de los puntos de agua y la tabla de cálculo del índice DHI.

**Análisis de los puntos de agua subterránea**

De los ocho (8) puntos de agua subterránea analizados y localizados en el área de influencia del túnel Seminario, resulta lo siguiente:

- Cinco (5) puntos de agua resultan con un índice DHI igual a 1, es decir, en ellos no se prevé afectación o ésta es despreciable desde el punto de vista probabilístico. Estos puntos representan el 63% del total.
- Dos (2) puntos de agua resultan con un índice DHI igual a 2, es decir, en ellos se prevé una probabilidad de afectación baja. Estos puntos representan el 25% del total.
- Un (1) punto de agua resultan con un índice DHI igual a 3, es decir, en él se prevé una probabilidad de afectación media a alta. Estos puntos representan el 12% del total.

Tabla 3-138 - Impacto sobre los puntos de aguas subterráneas en el sector del Túnel Seminario

| Probabilidad | | Manantiales | |
|---|---|---|---|
| | | N. | % |
| 1 | Despreciable | 5 | 63% |
| 2 | Baja | 2 | 25% |
| 3 | De media a alta | 1 | 12% |

Fuente: Consorcio Geodata

En la siguiente tabla se muestran los puntos de agua que presentan probabilidad de impacto bajo hasta media-alta, especificando el tipo de punto y el caudal medido.

Tabla 3-139 - Ubicación y tipo de punto de agua con valor de DHI bajo a medio-alto para el Túnel Seminario

| Código | DHI | Tipo | Caudal (l/s) | |
|---|---|---|---|---|
| | | | verano | invierno |
| AST-239 | 2 | Manantial | 0,63 | 0,63 |
| AST-240 | 2 | Manantial | 0,13 | 0,23 |
| AST-241 | 3 | Manantial | 0,30 | 0,30 |
| Total | | | 1,06 | 1,16 |

Fuente: Consorcio Geodata

En el Anexo – Estudio Hidrogeológico, se reporta la puntuación asignada a los diferentes parámetros que determinan el índice DHI para la totalidad de los puntos de agua identificados en el área de influencia del túnel Seminario.

El punto AST-241, con probabilidad de afectación de media a alta, se encuentra en correspondencia con el portal de entrada y es probable que sea influenciado por los trabajos de construcción del portal.

Para los otros dos puntos de agua (AST-239 y AST-240), la probabilidad de impacto es baja, aunque existe una remota posibilidad de afectación debido a la presencia de zonas de fallas o zonas de intensa fracturación identificadas con la tomografía eléctrica (ver Tomo II). En estos dos casos, si se llegase a verificar el impacto, la pérdida de agua en total estaría comprendidos entre 1,0 y 1,2 l/s.

### Análisis de los cursos de agua superficial

En lo que respecta a los cursos de agua superficial, no se prevén impactos importantes, dado que la red hidrográfica presente no está bien desarrollada y por lo tanto los escurrimientos superficiales son escasos. Sin embargo, ha sido evidenciada una posible criticidad en el curso de agua localizada en inmediaciones del portal de salida del túnel Seminario, en correspondencia con el punto con probabilidad de afectación baja, identificado con código SM37, donde, no obstante la baja permeabilidad del suelo, existe una posibilidad de impacto dada la cercanía del punto al portal del túnel. Se aclara que durante el inventario realizado sea en época de verano como en época de invierno, no se evidencio presencia de agua en este curso de agua. No obstante, el mismo es relacionado en el presente informe porque se encuentra identificado en la red hidrográfica nacional y resultó con una probabilidad de impacto baja dada su cercanía al portal de salida del túnel Seminario. Por estos motivos se consideró correcto mencionarlo y valorarlo.

El caudal sujeto a riesgo en este curso de agua no es conocido, aunque si existen dos puntos de medida en un curso de agua limítrofe, que pueden ser tomados como referencia. Se trata del punto de monitoreo 76C (caudal máximo 0,74 l/s, medio 0.06 l/s, mínimo 0 l/s) y 76CA (caudal máximo 2,65 l/s, medio 1,35 l/s, mínimo 0 l/s). Estos dos cursos de agua son intermitentes o estacionales. Con base en esta evidencia, considerando que el curso de agua en cuestión se seque en algún periodo del año, y que la estación 76C sea comparable, la pérdida de agua previsible puede estar comprendida entre 0 a 1 l/s en el periodo más lluvioso.

En el Anexo 3-3 – Estudio Hidrogeológico del presente tomo, relacionado con los inventarios realizados en el área de influencia del proyecto, se ha incluido la ficha FUNIAS en la que se relaciona el estado actual del curso de agua sobre el cual se localiza el punto SM37.

#### *3.2.7.8.2.4 Evaluación de la potencial afectación para la etapa de construcción y operación*

El método aplicado prevé que los puntos de agua sean susceptibles de afectación cuando se encuentran ubicados a distancias menores a 5000 m de la excavación. El cronograma elaborado por el Concesionario, específicamente el documento relacionado con el programa de obra para la fase II, indica que la excavación se hará contemporáneamente entre los dos portales del túnel Santa Elena, mientras que se procederá desde un solo portal para el túnel Seminario. Esto significa que a menos que se presenten eventuales desfases y/o interrupciones de las fases de excavación, todos los puntos de agua se encuentran potencialmente a riesgo a partir del momento en que se da inicio a los trabajos de excavación. Claramente esta posibilidad se concreta a medida que la excavación se acerca a las zonas de falla y/o zonas fracturadas con el consecuente posible drenaje del agua hasta la cota del túnel.

Los tiempos o rendimientos de excavación, deducidos de lo indicado en el cronoprograma, indican una velocidad media de avance de aproximadamente 5,6 m/día para el Túnel Santa Elena y 1,8 m/día para el Túnel Seminario. La evolución temporal con la cual los puntos de agua se verán progresivamente sujetos a riesgo, se resume en la siguiente tabla. Se hace notar que se trata de estimaciones indicativas variables en función del avance real de la excavación durante la fase constructiva.

Tabla 3-140 - Estimación del tiempo de intercepción de las fallas conexas con los puntos de agua con índice DHI iguales a 2 y 3 durante la excavación del Túnel Santa Elena desde el portal Occidental, de las PK 10+330 hasta la PK14+423

| Código | DHI | pK falla | distancia desde el portal (m) | tiempo desde el portal (días) |
|---|---|---|---|---|
| AST-047 | 2 | 11283-11550 | 953 | 167 |
| AST-054 | 2 | 12770 | 2440 | 428 |
| AST-092 | 2 | 13135 | 2805 | 492 |
| AST-122 | 2 | 13770 | 3440 | 604 |
| AST-123 | 2 | 13135 | 2805 | 492 |
| AST-124 | 2 | 13135 | 2805 | 492 |
| AST-125 | 2 | 12980 | 2650 | 465 |
| AST-126 | 2 | 12980 | 2650 | 465 |
| AST-131 | 2 | 12275 | 1945 | 341 |
| AST-132 | 2 | 12275 | 1945 | 341 |
| AST-133 | 3 | 12275 | 1945 | 341 |
| AST-227 | 2 | 12770 | 2440 | 428 |
| AST-245 | 2 | 10984 | 654 | 115 |

Fuente: Consorcio Geodata

Tabla 3-141 - . Estimación del tiempo de intercepción de las fallas conexas con los puntos de agua con índice DHI iguales a 2 y 3 durante la excavación del Túnel Santa Elena desde el portal oriental, de las PK 18+517 hasta la PK 14+424

| Código | DHI | pK Falla | Distancia desde el portal (m) | Tiempo desde el portal (días) |
|---|---|---|---|---|
| AST-156 | 2 | 14790-15124 | 3393 | 617 |
| AST-177 | 3 | 15150 | 3367 | 612 |
| AST-187 | 2 | 15555 | 2962 | 539 |
| AST-189 | 2 | 16736-17001 | 1516 | 276 |
| AST-191 | 3 | 15555 | 2962 | 539 |
| AST-192 | 2 | 14790-15124 | 3393 | 617 |
| AST-193 | 2 | 14790-15124 | 3393 | 617 |
| AST-194 | 2 | 14790-15124 | 3393 | 617 |
| AST-197 | 2 | 16736-17001 | 1516 | 276 |
| AST-203 | 3 | 17482-17614 | 903 | 164 |
| AST-206 | 2 | 17482-17614 | 903 | 164 |
| AST-211 | 2 | 16736-17001 | 1516 | 276 |
| AST-212 | 2 | 16736-17001 | 1516 | 276 |
| AST-214 | 3 | 16736-17001 | 1516 | 276 |
| AST-220 | 3 | 16736-17001 | 1516 | 276 |
| AST-221 | 2 | 16736-17001 | 1516 | 276 |
| AST-222 | 2 | 16736-17001 | 1516 | 276 |
| AST-223 | 3 | 16736-17001 | 1516 | 276 |
| AST-256 | 2 | 17482-17614 | 903 | 164 |
| AST-257 | 2 | 17482-17614 | 903 | 164 |
| AST-269 | 3 | 15555 | 2962 | 539 |
| AST-270 | 3 | 15555 | 2962 | 539 |
| AST-271 | 3 | 15555 | 2962 | 539 |

| Código | DHI | pK Falla | Distancia desde el portal (m) | Tiempo desde el portal (días) |
|---|---|---|---|---|
| AST-272 | 3 | 15555 | 2962 | 539 |
| AST-273 | 3 | 15555 | 2962 | 539 |
| AST-239 | 2 | 5510 | 356 | 198 |
| AST-240 | 2 | 5370 | 496 | 276 |
| AST-241 | 3 | portal | - | - |

Fuente: Consorcio Geodata

## 3.2.8 Atmósfera

### 3.2.8.1 Clima

El comportamiento general del clima en el área del proyecto está determinado, al igual que en la mayor parte de la región andina colombiana, por el Frente Intertropical de Convergencia (FIC), que interactúa con los factores orográficos y las circulaciones locales de las áreas montañosas (vientos de valle y de montaña, influencia de la circulación general y circulación de valle montañoso de la vertiente occidental del río Magdalena en la meseta de Rionegro).

Según la latitud y altitud, el área de estudio da como resultado entre las cotas 1 400 y 2 000 msnm, se tiene una temperatura entre los 17 y 24°C y una precipitación anual de 1 744 mm, identificándose la zona de vida bosque húmedo Premontano (bh-PM); y entre las cotas 2 000 y 2 700 msnm, con una temperatura media que oscila entre los 12 y 17°C y una precipitación de 2 067 mm al año, se tiene la zona de vida bosque muy húmeda Montano Bajo (bmh-MB). El comienzo y la mitad del año son estaciones secas, de resto el clima es variable, lluvioso en algunas épocas y medianamente seco en otras.

La adquisición de los datos de temperatura y lluvias analizados, provienen en parte de las estaciones meteorológicas pertenecientes a la base de datos del IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales), y en parte de la base de datos de EPM (Empresas Públicas de Medellín). Además, como complemento de los datos antes indicados, a partir de enero del 2012 el Concesionario ha implementado una red local dedicada exclusivamente al proyecto vial.

Con el fin de caracterizar las lluvias y la temperatura media mensual y anual del área de influencia del proyecto, se han recopilado unas series históricas de veinte años provenientes de ocho estaciones de medición (A.J.M. Córdova, Olaya Herrera, Selva, Mazo, Santa Elena, Manantiales, Ayura 1 y Vasconia), de las cuales se han obtenido datos pluviométricos. Adicionalmente, para las estaciones A.J.M Córdova, Santa Elena y Vasconia se han obtenido datos de temperatura.

Las otras cinco estaciones analizadas (Olaya Herrera, Selva, Mazo, Manantiales y Ayura 1), no se incluyen en el análisis por considerarse menos significativas, ya que se encuentran localizadas en posiciones más distantes y en contextos geográficamente diferentes del área de estudio.

Específicamente los datos de la estación de Santa Elena han sido considerados válidos para la cuenca de Santa Elena y la Aguadita; y los datos promedios de las estaciones de A.J.M. Córdova y Vasconia han sido utilizados para las cuencas restantes conocidas como Yarumal, La Cascada, La Honda y Salazar.

En la siguiente tabla se reportan las tres estaciones meteorológicas utilizadas, con indicación de la cota de la estación y el periodo de registro de los parámetros de precipitación y temperatura. Como se puede observar en esta tabla, la serie histórica de las estaciones cubren un intervalo de 20 años.

Tabla 3-142 - Estaciones termo-pluviométricas tomadas como referencia para el área de estudio

| Estación | X | Y | Cota m s.n.m. | Periodo de observación | Parámetros medidos |
|---|---|---|---|---|---|
| A.J.M. Córdova | 851550 | 1173980 | 2073 | 1993-2012 | Lluvia, temperatura |
| Santa Elena | 840667 | 1175760 | 2550 | 1993-2012 | Lluvia |
| Vasconia | 844505,4 | 1172480 | 2503 | 1993-2012 | Lluvia |

Fuente: Consorcio Geodata

En la siguiente figura se reporta la posición de las estaciones indicadas en la tabla anterior:

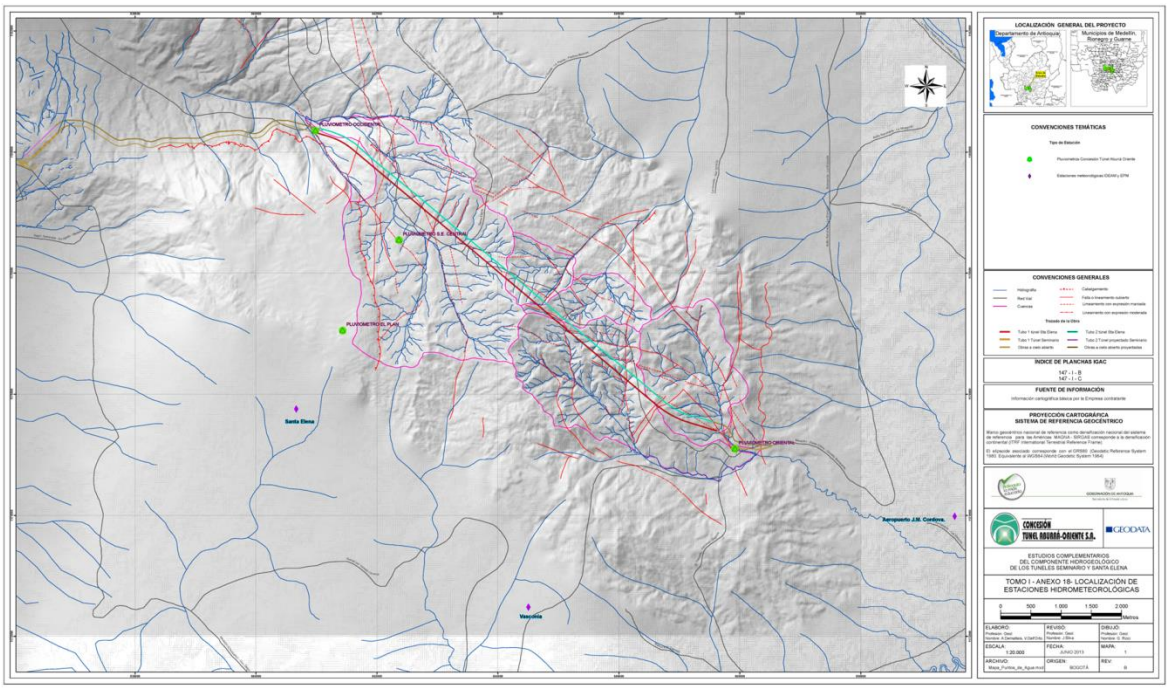



Figura 3-280 - Localización de las estaciones climáticas consideradas para el balance hidrogeológico, las cuales forman parte de la red del IDEAM y EPM

Como se ha indicado anteriormente, a partir del año 2012 se dispone de lecturas pluviométricas diarias de tres estaciones dedicadas al proyecto vial y localizadas a lo largo del Túnel Santa Elena. Estas estaciones se ubican en correspondencia con el Portal Occidental, Portal Oriental y la zona del Plan. El mes de febrero del 2013 ha sido instalada una cuarta estación denominada S. E. Central. En la figura anterior se muestra la localización en planta de estas cuatro estaciones pluviométricas.

Estos datos, al provenir del área limítrofe al túnel Santa Elena, son claramente más representativos de la situación climática del área en estudio, pero cubren un periodo de tiempo muy breve para poder considerarlos en el cálculo del balance hidrológico. Por este motivo para la definición de los parámetros hidrológicos se hace referencia exclusivamente a la serie histórica de veinte años antes descrita.

#### 3.2.8.1.1 Vientos:

Por su ubicación entre montañas, Medellín es una ciudad de vientos suaves provenientes del valle, que ascienden hasta chocar con los vientos regionales del alto de Santa Elena, esto obliga a que se eleven aún más, permitiendo el enfriamiento, condensación y posterior precipitación en el área del centro de la ciudad. El régimen de vientos lo determinan los alisios dominantes del nordeste y las masas de aire cálido que suben desde los valles bajos de los ríos Cauca y Magdalena, con predominio de movimiento en la zona norte del Valle de Aburrá, lo que origina que el viento sople en dirección norte-sur.

#### 3.2.8.1.2 Temperatura y Precipitación:

En la siguiente tabla se indican los valores medios mensuales del veintenio para la lluvia y la temperatura.

Tabla 3-143 - Valores de precipitación y temperatura registrados en las estaciones meteorológicas de referencia

| ESTACIÓN | | ENE | FEB | MAR | ABR | MAY | JUN | JUL | AGO | SEPT | OCT | NOV | DIC | AÑO |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| A.J.M. Córdova | Pm | 82,51 | 95,51 | 150,04 | 232,39 | 258,79 | 189,72 | 172,49 | 171,23 | 202,48 | 240,84 | 205,25 | 117,43 | 2118,97 |
| Cota 2073 | Tm | 16,6 | 17 | 17 | 17,1 | 17,4 | 17,3 | 17,3 | 17,2 | 17 | 16,6 | 16,5 | 16,6 | 17 |
| Vasconia | | | | | | | | | | | | | | |
| Cota 2503 | Pm | 97,33 | 108,61 | 187,03 | 257,21 | 267,21 | 187,09 | 171,14 | 164,83 | 215,4 | 280,62 | 219,31 | 136,07 | 2291,84 |
| | Tm | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Santa Elena | | | | | | | | | | | | | | |
| Cota 2550 | Pm | 132,02 | 141,81 | 191,35 | 344,15 | 363,05 | 237,71 | 225,95 | 223,7 | 295,51 | 370,53 | 288,3 | 161,3 | 2966,37 |
| | Tm | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |

Fuente: Datos base del IDEAM y EPM

La precipitación media anual durante el veintenio varía en las tres estaciones de referencia entre 2119 mm/año en la estación A.J.M. Córdova y 2966 mm/ año en Santa Elena, con una media igual a 2459 mm/año.

Los gráficos siguientes muestran la precipitación mensual promedio para cada estación. Se observa una homogeneidad en el comportamiento de la precipitación local en todas las estaciones. Es evidente la presencia de dos máximos lluviosos en los meses de abril-mayo (máximo absoluto) y octubre (máximo relativo) y dos mínimo en los meses de enero-febrero (mínimo absoluto) y julio-agosto (mínimo relativo).

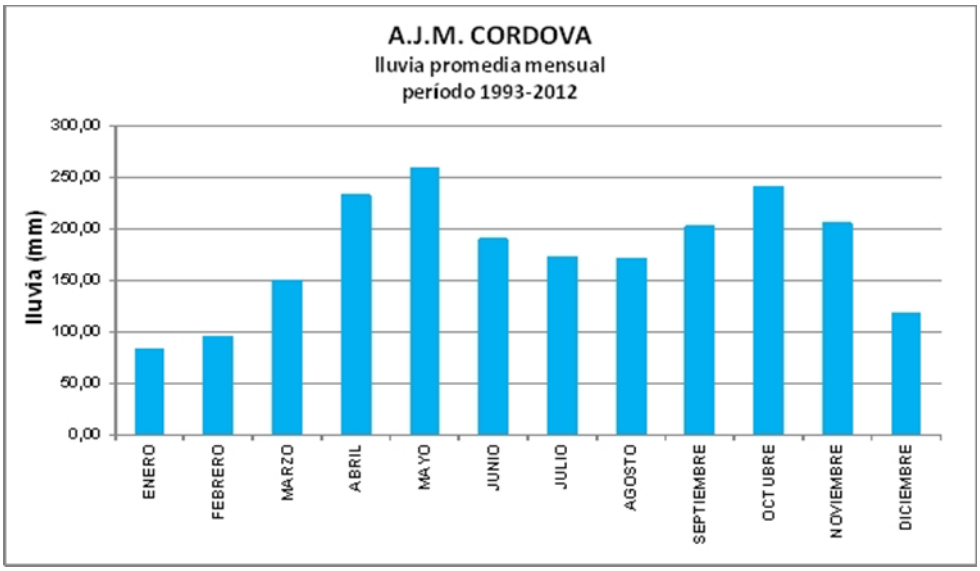



Figura 3-281 - En la siguiente tabla se relaciona el tipo de vertimiento, el caudal estimado, las coordenadas de la fuente receptora y si se cuenta con permiso de vertimientos anteriormente otorgado-

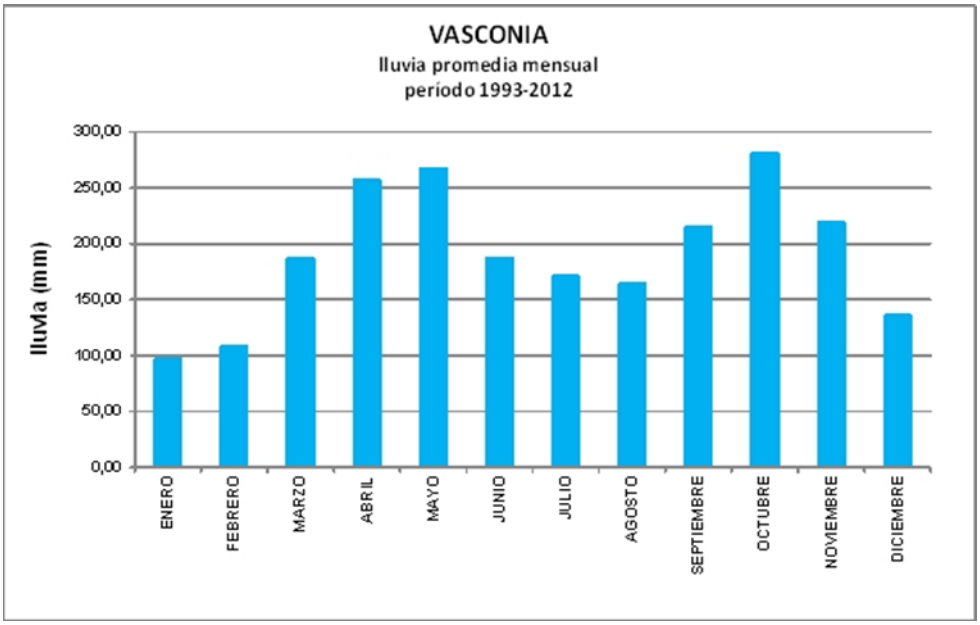



Figura 3-282 - Precipitación media mensual multianual en la estación Vasconia (Periodo 1993-2012)

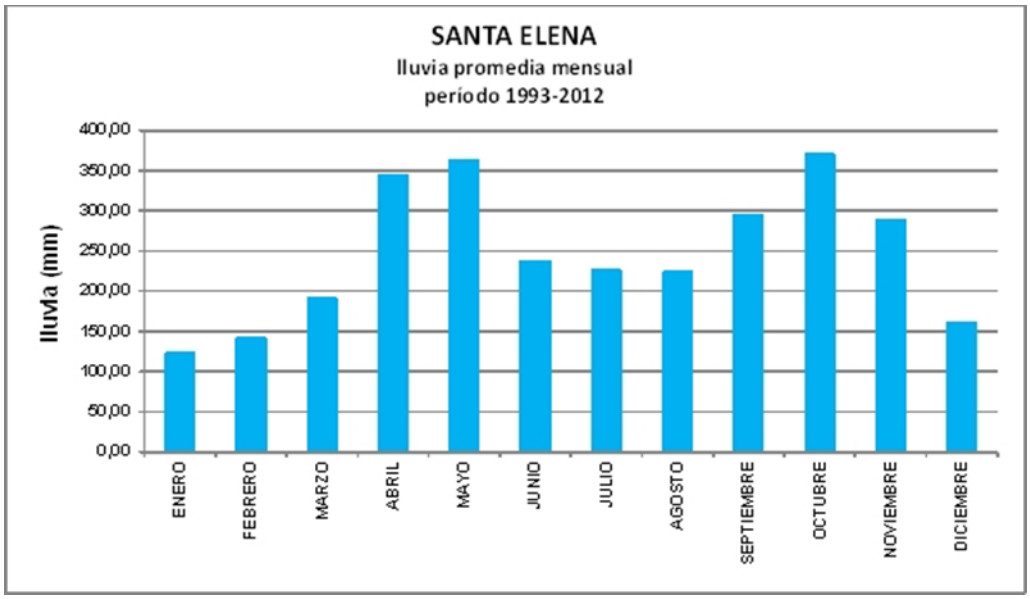



Figura 3-283. Precipitación media mensual multianual en la estación Santa Elena (Periodo 1993-2012).

En la siguiente figura se muestra la relación entre la cota y la precipitación media anual multianual en las tres estaciones de referencia. Resulta una relación directamente proporcional entre los dos parámetros que confirma la mayor pluviosidad en correspondencia con la estación de mayor altitud, es decir, la estación Santa Elena. Sin embargo, se debe considerar el hecho que esta estación se encuentra en la vereda el Plan, muy cerca a la ladera que separa el altiplano atravesado por el túnel Santa Elena, del Valle de Aburrá. Esta posición podría influir en el régimen pluviométrico medio anual.

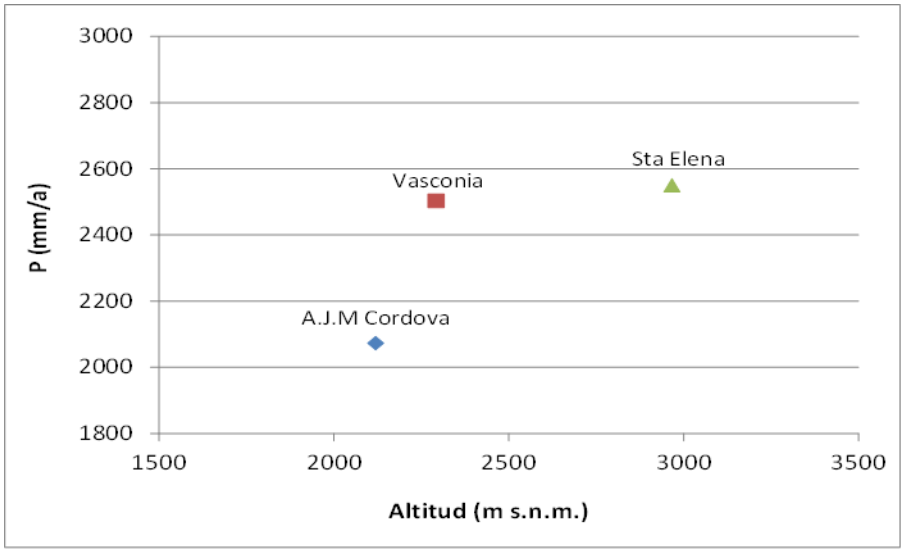



Figura 3-284 - Cota y precipitación media anual en las tres estaciones de referencia.

El parámetro de temperatura se encuentra disponible sólo para la estación el A.J.M. Córdova. A continuación se muestra el gráfico que la representa.

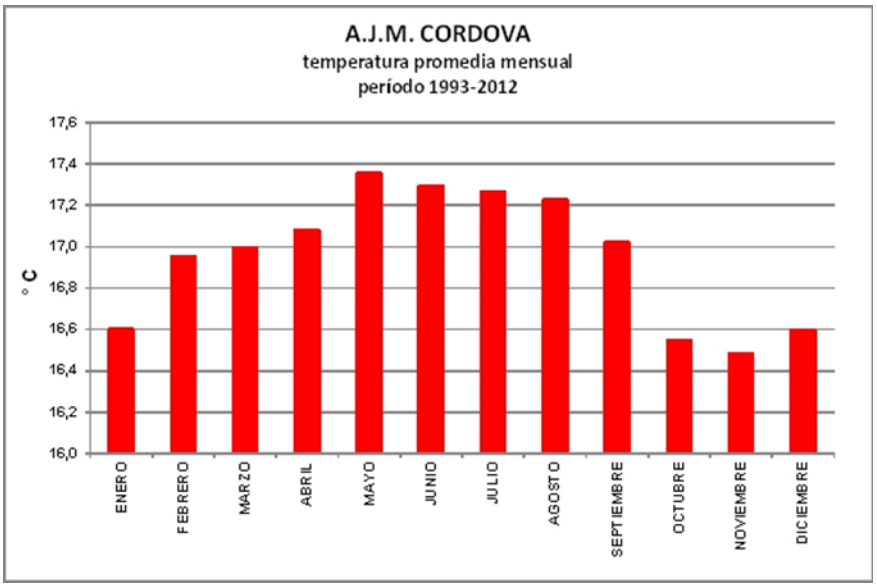



Figura 3-285. Temperatura media mensual multianual en la estación A.J.M. Córdova (Periodo 1993-2012).

La estación registra un valor máximo de temperatura en el mes de junio y un valor mínimo en el mes de noviembre.

Finalmente, se muestra un gráfico de los datos de las estaciones pluviométricas del IDEAM y EPM con los datos de los pluviómetros instalados por el Concesionario. En particular, se comparan los valores medios anuales registrados durante veinte años en las estaciones de referencia (A.J.M. Córdova, Vasconia y Santa Elena), con los datos medidos entre mayo del 2012 y abril del 2013 en las tres estaciones instaladas por el Concesionario (Portal Occidental, Portal Oriental y El Plan).

Tabla 3-144 - Comparación de la precipitación media medida durante veinte años en las estaciones de referencia y la media obtenida entre mayo/2012 y abril/2013 para las tres estaciones instaladas por el Concesionario

| Mes | P.OCCIDENTAL | P. ORIENTAL | EL PLAN | Promedio Concesionario | AJ.M. Córdova | Vasconia | Santa Elena | Promedio EPM, IDEAM |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| May | 222,1 | 306,9 | 255,7 | 261,5 | 258,8 | 267,2 | 363,1 | 296,3 |
| Jun | 71,2 | 48,2 | 129,5 | 82,9 | 189,7 | 187,1 | 237,7 | 204,8 |
| Jul | 77,7 | 116,5 | 142,6 | 112,2 | 172,5 | 171,1 | 225,9 | 189,9 |
| Ago | 155,7 | 171,5 | 231,2 | 186,1 | 171,2 | 164,8 | 223,7 | 186,6 |
| Sep | 66,2 | 83,3 | 111,0 | 86,8 | 202,5 | 215,4 | 295,5 | 237,8 |
| Oct | 295,1 | 331,5 | 396,9 | 341,2 | 240,8 | 280,6 | 370,5 | 297,3 |
| Nov | 190,2 | 109,8 | 227,8 | 175,9 | 205,6 | 219,3 | 288,3 | 237,7 |
| Dic | 63,1 | 77,3 | 40,5 | 60,3 | 117,4 | 136,1 | 161,3 | 138,3 |
| Ene | 14,0 | 22,4 | 35,1 | 23,8 | 82,5 | 97,3 | 123,0 | 101,0 |
| Feb | 120,3 | 179,1 | 186,7 | 162,0 | 95,5 | 108,6 | 141,8 | 115,3 |
| Mar | 148,4 | 225,1 | 207,1 | 193,5 | 150,0 | 187,0 | 191,4 | 176,1 |
| Abr | 138,9 | 134,4 | 141,7 | 138,3 | 232,4 | 257,2 | 344,2 | 277,9 |
| | 1562,6 | 1805,7 | 2105,4 | 1824,6 | 2119,0 | 2291,8 | 2966,4 | 2459,1 |

Fuente: Consorcio Geodata

Según la tabla y figuras anteriores se observa que:

La tendencia de los máximos y mínimos de lluvia del último año (mayo 2012–abril 2013) es coherente con la media obtenida de los datos del veinteno, con la excepción del mínimo de invierno que en el 2012 se presentó anticipadamente (en junio en lugar de julio-agosto)

El período 2012-2013 es en general menos lluvioso respecto a la media del periodo de veinte años, con excepción de los meses más lluviosos de octubre y marzo. La cantidad total de lluvia caída desde mayo/2012 a abril/2013 es inferior en aproximadamente ¼ respecto a aquella del periodo de veinte años (1825 mm respecto a 2459 mm). No obstante se recomienda que una vez se obtenga el reporte del IDEAM se proceda a realizar esta comparación en el mismo periodo hidrológico.

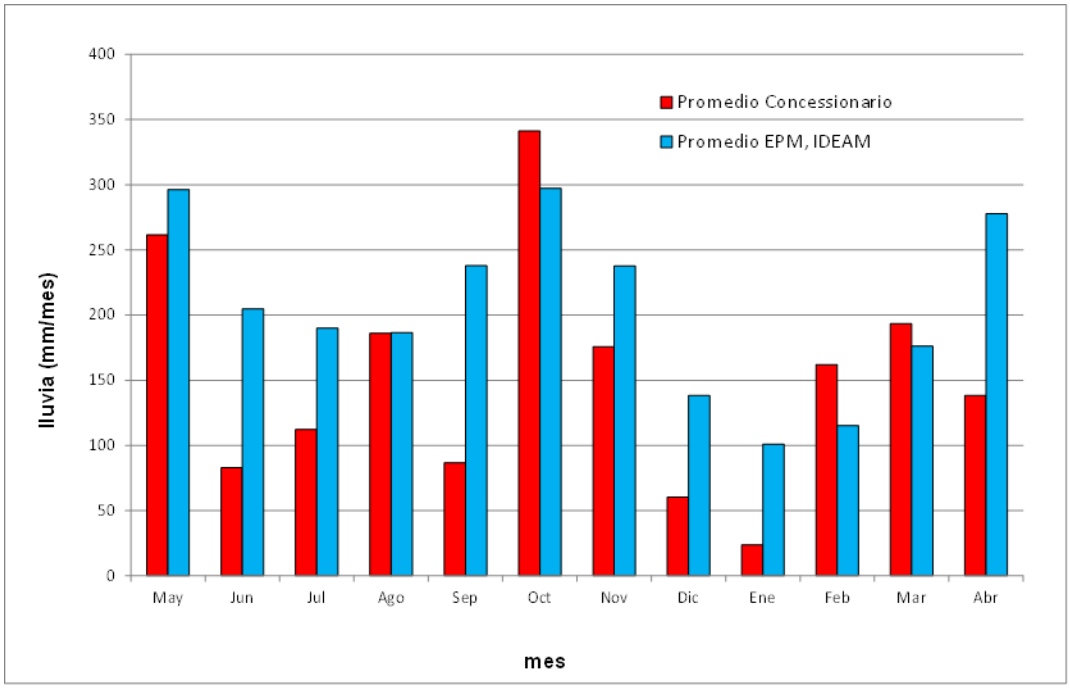



Figura 3-286 - Comparación entre los datos pluviométricos de las estaciones del IDEAM y EPM 1993-2012 (color azul) versus los datos obtenidos de los pluviómetros instalados por el Concesionario desde mayo/2012 a abril/2013 (color rojo).

### 3.2.8.1.3 Evapotranspiración

Tal como se sugiere en el "*Marco conceptual y metodológico para las evaluaciones regionales de agua*", redactado por el IDEAM (2011); la evapotranspiración ha sido calculada mediante la fórmula propuesta por TURC (1954), la cual se indica a continuación. Este documento esta en borrador y no ha sido publicado, pero se toma como referencia para el desarrollo del estudio tal como lo solicita el ANLA.

$$ETR = Pm / \sqrt{(0.9 + Pm^2 / coeff^2)}$$

Donde:

Pm = precipitación media anual (m);

coef = $300+25 \cdot Tm+0.05 \cdot Tm^3$

Tm = temperatura media anual (°C)

El cálculo de la evapotranspiración se ha hecho sin contar con los datos de temperatura de la estación de Santa Elena y Vasconia, se ha asumido que estos son comparables con la temperatura registrada en la estación del A.J.M. Córdova, que se encuentra en una zona altimétricamente similar, razón por la cual no se ha considerado necesario aplicar un gradiente de correlación térmico.

En la siguiente tabla se muestran los valores calculados.

Tabla 3-145 - Evapotranspiración media anual en las estaciones de referencia

| Estación | Cota m s.n.m. | Evapotranspiración media anual (mm/a) |
|---|---|---|
| A.J.M. Córdoba | 2073 | 889 |
| Santa Elena | 2550 | 929 |
| Vasconia | 2503 | 902 |

Fuente: Consorcio Geodata

### 3.2.8.1.4 Síntesis de los parámetros climáticos de referencia

En la siguiente tabla se muestran los parámetros climáticos de referencia promedio utilizados para el cálculo del balance hidrogeológico descrito en el comoponente hidrogeolñogico de este documento, los cuales han sido tomados de los datos obtenidos de las tres estaciones de referencia (A.J.M. Córdova, Vasconia y Santa Elena).

Tabla 3-146. Precipitación y evapotranspiración real media anual

| Valores utilizados para el balance | Precipitación media anual (mm/a) | Evapotranspiración media anual (mm/a) |
|---|---|---|
| Mínimo | 2119 | 889 |
| Máximo | 2966 | 929 |
| Medio | 2459 | 911 |

Fuente: Consorcio Geodata

### 3.2.8.1.5 Humedad relativa:

Una característica importante del clima tropical lo constituyen las variaciones regulares de la humedad relativa durante el día, haciéndose mínima en las horas del medio día.

En los últimos 20 años, la humedad relativa promedio en la estación Olaya Herrera fue del 67%, siendo los meses más húmedos los de invierno, y en la estación Miguel de Aguinaga fue del 66%.

La humedad relativa promedio en la estación climatológica del aeropuerto José María Córdova es del 77%, presentándose valores extremos de 60% mínima y del 90% máxima.

#### 3.2.8.1.6 Brillo solar:

El brillo solar se define como el número de horas durante el día, en las cuales los rayos solares llegan directamente hasta la superficie terrestre. Este tiene relación directa con la temperatura, evaporación y nubosidad del medio.

En el Valle del Aburrá, el promedio de horas de brillo solar anual fue de 1 891, lo que equivale a 5,2 horas diarias. Los meses con mayor y menor número de horas fueron julio y abril con 204 y 124 respectivamente.

Para la zona del Valle de San Nicolás, los meses con más horas de brillo solar son junio, julio y agosto, y los de menos noviembre, abril y mayo (meses lluviosos). Según el valor medio anual (1787,5 horas) el valor promedio diario de brillo solar es 4,89 horas.

### 3.2.8.2 Calidad del aire

La caracterización de la calidad del aire se basa en los análisis de los estudios realizados por la empresa Gestión y Servicios Ambientales S.A.S (GSA S.A.S) en octubre de 2011, para el diagnóstico de la contaminación ambiental en los sitios definidos como los más propensos de presentar alteración en la calidad del aire, durante la construcción del proyecto Conexión Vial Aburrá-Oriente.

Se efectuaron monitoreos de calidad del aire según las Resolución 610 y 650 de marzo de 2010, expedidas por el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, para la determinación de concentraciones de material particulado (PST y PM10), dióxido de nitrógeno ($NO_2$), dióxido de azufre ($SO_2$) y monóxido de carbono (CO) e identificación de la Rosa de Vientos durante 10 días en dos estaciones, ubicadas en el portal oriental del túnel de Santa Elena en la finca Cístico (Municipio de Rionegro) y en el portal occidental en la finca San Jorge (Municipio de Medellín).

A continuación se describen los resultados obtenidos en los estudios de calidad de aire:

#### 3.2.8.2.1 Concentración de material particulado PST

Las concentraciones obtenidas de material particulado para ambas estaciones de muestreo son menores a los niveles máximos permisibles para contaminantes según la Resolución 610 de marzo de 2010. Según lo determinado en la norma referente en el Artículo 2, las mediciones que se realicen durante un período de muestreo de 12 meses no podrán sobrepasar los cien microgramos por metro cúbico (100µg/$m^3$), de igual forma el promedio geométrico de las concentraciones obtenidas de PST durante un período de 24 horas no podrá sobrepasar los trescientos microgramos por metro cúbico (300µg/$m^3$), siendo éstos los límites permisibles según aplique.

El valor máximo registrado para el punto de muestreo ubicado en el portal oriental (Municipio de Rionegro) equivale a 25,18 µg/$m^3$ y el valor máximo para el portal occidental (Municipio de Medellín) equivale a 51,79 µg/$m^3$, registros menores a 300 µg/$m^3$ que corresponden a los valores máximos en un tiempo de exposición diaria. Y en el caso de la exposición anual, los valores de la media geométrica para el portal oriental es de 17,57 µg/$m^3$ y 28,69 µg/$m^3$ para el occidental, lo cual indica que para ambos son menores a 100 µg/$m^3$, es decir, el máximo permitido en un tiempo de exposición anual.

De lo anterior se concluye que la concentración de material particulado presentada en los dos sitios de muestreo, se encuentran por debajo del límite permisible, indicando una adecuada calidad del aire en términos de concentración de partículas con diámetro menor a 100 µm.

En la siguiente tabla se presentan los datos obtenidos y en el Anexo 3-4 los resultados del informe elaborado por GSA S.A.S 2011.

Tabla 3-147 - Concentración de material particulado PST.

| Portal Oriental: Finca Cístico | | | | | Portal Occidental: Finca San Jorge | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Fecha | Lectura manométrica ($H_2O$) | | | Concentración PST (µg/m³) | Fecha | Lectura manométrica ($H_2O$) | | | Concentración PST (µg/m³) |
| | Inicial | Final | Promedio | | | Inicial | Final | Promedio | |
| 06/10/2011 | 14,6 | 14,4 | 14,5 | 19,81 | 18/10/2011 | 13,2 | 14,5 | 13,85 | 51,19 |
| 07/10/2011 | 17,9 | 15,3 | 16 | 19,79 | 19/10/2011 | 13,6 | 14,3 | 13,95 | 46,83 |
| 08/10/2011 | 14 | 13,7 | 13,85 | 25,18 | 20/10/2011 | 14,2 | 15,1 | 14,65 | 46,23 |
| 09/10/2011 | 12,1 | 12,5 | 12,3 | 15,85 | 21/10/2011 | 13,7 | 14,4 | 14,05 | 18,67 |
| 10/10/2011 | 12,8 | 14 | 13,4 | 16,22 | 22/10/2011 | 13,3 | 14,2 | 13,75 | 25,66 |
| 11/10/2011 | 15,4 | 15,5 | 15,45 | 15,66 | 23/10/2011 | 14,4 | 14,8 | 14,6 | 21,53 |
| 12/10/2011 | 13,5 | 14,3 | 13,9 | 18,95 | 24/10/2011 | 13,8 | 14,5 | 14,15 | 51,79 |
| 13/10/2011 | 12,2 | 12,8 | 12,5 | 13,04 | 25/10/2011 | 14,8 | 15,4 | 15,1 | 10,22 |
| 14/10/2011 | 12,7 | 13,9 | 13,3 | 15,61 | 26/10/2011 | 14,5 | 15,5 | 15 | 36,54 |
| 15/10/2011 | 13,1 | 13 | 13,05 | 18,25 | 27/10/2011 | 14,3 | 15,1 | 14,7 | 17,1 |
| Prom | | | | 17,57 | Prom | | | | 28,69 |
| Máximo | | | | 25,18 | Máximo | | | | 51,79 |

Fuente: Tomado de informes de GSA S.A.S para la Concesión túnel Aburrá-Oriente, 2011.

### 3.2.8.2.2 Concentración de material particulado PM10

En las dos estaciones se obtuvo que las concentraciones de material particulado PM10 son menores a los niveles máximos permitidos por la norma para este tipo de contaminantes. Según el Artículo 2 de la Resolución 610 de marzo de 2010, las mediciones que se realicen durante un período de muestreo de 12 meses no podrán sobrepasar los cincuenta microgramos por metro cúbico (50µg/m$^3$), de igual forma el promedio aritmético de las concentraciones obtenidas durante un período de tiempo igual a 24 horas no podrá sobrepasar los cien microgramos por metro cúbico (100µg/m$^3$), siendo éstos los límites permisibles según aplique.

En el portal oriental se registró una concentración de PM10 igual a 10,5 µg/m$^3$ y en el portal occidental igual a 15,53 µg/m$^3$, resultados inferiores a 100 µg/m$^3$ que corresponden a los valores máximos en un tiempo de exposición diaria. Y para el caso de la exposición anual. Para el portal oriental la media aritmética PM10 es igual a 8,92 µg/m$^3$ y para el occidental es igual a 12,42 µg/m$^3$. Los resultados indican que las concentraciones de material particulado PM10 son inferiores a 50 µg/m$^3$, es decir, que están por debajo del límite permisible, presentando una adecuada calidad del aire en términos de concentración de partículas con diámetro a 10 µm.

En la siguiente tabla, se presentan los resultados del monitoreo efectuado en octubre de 2001 por la empresa GSA S.A.S.

Tabla 3-148 - Concentración de material particulado PM10.

| Portal Oriental: Finca Cístico | | Portal Occidental: Finca San Jorge | |
|---|---|---|---|
| Fecha | Concentración PM10 (µg/m³) | Fecha | Concentración PM10 (µg/m³) |
| 06/10/2011 | 10,5 | 18/10/2011 | 15,53 |

| Portal Oriental: Finca Cístico | | Portal Occidental: Finca San Jorge | |
|---|---|---|---|
| Fecha | Concentración PM10 (µg/m³) | Fecha | Concentración PM10 (µg/m³) |
| 07/10/2011 | 5,25 | 19/10/2011 | 10,35 |
| 08/10/2011 | 10,49 | 20/10/2011 | 15,53 |
| 09/10/2011 | 1,5 | 21/10/2011 | 10,35 |
| 10/10/2011 | 10,46 | 22/10/2011 | 15,53 |
| 11/10/2011 | 10,5 | 23/10/2011 | 10,35 |
| 12/10/2011 | 5,25 | 24/10/2011 | 15,53 |
| 13/10/2011 | 10,5 | 25/10/2011 | 5,18 |
| 14/10/2011 | 10,5 | 26/10/2011 | 15,53 |
| 15/10/2011 | 5,25 | 27/10/2011 | 10,35 |
| Promedio | 8,92 | Promedio | 12,42 |
| Máximo | 10,5 | Máximo | 15,53 |

Fuente: Datos tomados de informes de GSA S.A.S para la Concesión túnel Aburrá-Oriente, 2011

### 3.2.8.2.3 Concentración de óxidos de azufre

El artículo 2 de la Resolución 610 de marzo de 2010, establece la Norma de Calidad del Aire o Nivel de Inmisión, determinando que las mediciones que se realicen durante un período de muestreo de 12 meses no podrán sobrepasar los ochenta microgramos por metro cúbico (80 µg/m$^3$). Así mismo, los promedios aritméticos de las concentraciones obtenidas durante un período de tiempo igual a un día, es decir, 24 horas no podrán sobrepasar los doscientos cincuenta microgramos por metro cúbico (250 µg/m$^3$ anual). En la siguiente tabla, se presentan las concentraciones de óxidos de azufre obtenidos en el monitoreo realizado en Octubre de 2011.

Tabla 3-149 - Concentración de óxidos de azufre.

| Portal Oriental: Finca Cístico | | | | Portal Occidental: Finca San Jorge | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Fecha | Caudal | | Concentración $SO_2$ (µg/m³) | Fecha | Caudal | | Concentración $SO_2$ (µg/m³) |
| | Inicial | Final | | | Inicial | Final | |
| 06/10/2011 | 189 | 186 | 3,29 | 18/10/2011 | 209 | 207 | 2,88 |
| 07/10/2011 | 187 | 184 | 3,33 | 19/10/2011 | 186 | 207 | 3,05 |
| 08/10/2011 | 206 | 184 | 3,16 | 20/10/2011 | 208 | 201 | 2,94 |
| 09/10/2011 | 206 | 183 | 3,17 | 21/10/2011 | 210 | 212 | 2,83 |
| 10/10/2011 | 199 | 195 | 3,14 | 22/10/2011 | 211 | 216 | 2,79 |
| 11/10/2011 | 195 | 192 | 3,17 | 23/10/2011 | 200 | 238 | 2,75 |
| 12/10/2011 | 201 | 212 | 2,94 | 24/10/2011 | 209 | 210 | 2,86 |
| 13/10/2011 | 213 | 216 | 2,86 | 25/10/2011 | 208 | 1406 | 0,74 |
| 14/10/2011 | 216 | 209 | 2,86 | 26/10/2011 | 208 | 200 | 2,96 |
| 15/10/2011 | 215 | 204 | 2,92 | 27/10/2011 | 201 | 772 | 1,23 |
| Promedio | 3,08 | | | Promedio | 2,05 | | |

Fuente: Datos tomados de informes de GSA S.A.S para la Concesión túnel Aburrá-Oriente, 2011

El portal oriental presenta resultados de las concentraciones de dióxido de azufre $SO_2$ diarias iguales a 3,33 µg/m$^3$ y anuales de 3,08 µg/m$^3$; mientras que el portal occidental registró valores de concentraciones diarias de 3,05 µg/m$^3$ y anuales de 2,05 µg/m$^3$. Estos resultados comparados con la norma que admite concentraciones diarias de 250 µg/m$^3$ y anuales de 80 µg/m$^3$, se concluye que todos los registros para ambos puntos de muestreo están por debajo de los niveles máximos permisibles. Igualmente se resalta, que si los valores de concentración de Dióxido de Azufre tienen

el mismo comportamiento en un período de 12 meses, las concentraciones promedio obtenidas al final de dicho período no sobrepasarían la norma anual de calidad del aire.

#### 3.2.8.2.4 Concentración de óxidos de nitrógeno

Lo establecido en el artículo 2 de la Resolución 610 de 2010, determina que las mediciones que se realicen durante un período de muestreo de 12 meses no podrán sobrepasar los cien microgramos por metro cubico (100 µg/m$^3$), mientras que el promedio aritmético de las concentraciones obtenidas en un lapso de tiempo igual a 24 horas no podrá exceder un valor igual a ciento cincuenta microgramos por metro cúbico (150 µg/m$^3$). En la siguiente tabla se presentan los resultados obtenidos en los muestreos efectuados en octubre del año 2011 por la empresa consultora GSA S.A.S.

Tabla 3-150 - Concentración de óxidos de nitrógeno.

| Portal Oriental: Finca Cístico | | | | Portal Occidental: Finca San Jorge | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Fecha | Caudal | | Concentración $NO_2$ (µg/m$^3$) | Fecha | Caudal | | Concentración $NO_2$ (µg/m$^3$) |
| | Inicial | Final | | | Inicial | Final | |
| 06/10/2011 | 191 | 183 | 19,35 | 18/10/2011 | 207 | 201 | 17,19 |
| 07/10/2011 | 190 | 183 | 19,40 | 19/10/2011 | 209 | 207 | 16,91 |
| 08/10/2011 | 205 | 183 | 18,55 | 20/10/2011 | 215 | 207 | 16,7 |
| 09/10/2011 | 205 | 199 | 17,88 | 21/10/2011 | 214 | 214 | 16,34 |
| 10/10/2011 | 198 | 191 | 18,58 | 22/10/2011 | 211 | 850 | 6,58 |
| 11/10/2011 | 213 | 190 | 17,74 | 23/10/2011 | 215 | 147 | 19,44 |
| 12/10/2011 | 213 | 199 | 17,22 | 24/10/2011 | 216 | 183 | 17,59 |
| 13/10/2011 | 207 | 206 | 17,4 | 25/10/2011 | 216 | 216 | 16,16 |
| 14/10/2011 | 213 | 208 | 16,92 | 26/10/2011 | 216 | 215 | 16,36 |
| 15/10/2011 | 209 | 207 | 17,22 | 27/10/2011 | 216 | 204 | 16,65 |
| Promedio | 18,03 | | | Promedio | 15,99 | | |

Fuente: Datos tomados de informes de GSA S.A.S para la Concesión túnel Aburrá-Oriente, 2011

En el portal oriental se obtuvo una concentración diaria igual a 19,40 µg/m$^3$ de óxidos de nitrógeno $NO_2$ y anual de 18,03 µg/m$^3$; mientras que para el portal occidental se presentaron concentraciones diarias iguales a 15,99 µg/m$^3$ y anuales iguales a 19,44 µg/m$^3$. Lo anterior comparado con la norma, indica que todos los registros para ambos puntos de muestreo están por debajo de los niveles máximos permisibles. Igualmente se resalta que si los valores de concentración de Óxido de Nitrógeno tienen el mismo comportamiento en un período de 12 meses, las concentraciones promedio obtenidas al final de dicho período no sobrepasarían la norma anual de calidad del aire.

#### 3.2.8.2.5 Concentración de monóxido de carbono

El artículo 2 de la Resolución 610 de 2010, establece como valor máximo de concentraciones de monóxido de carbono CO para registros horarios igual a 40.000 µg/m$^3$ y como valor máximo para registros octohorarios (8 horas) igual a 10.000 µg/m$^3$. En la siguiente tabla se presentan los resultados obtenidos en los muestreos efectuados en octubre del año 2011 por la empresa consultora GSA S.A.S.

Tabla 3-151 - Concentración de monóxido de carbono.

| Portal Oriental: Finca Cístico | Portal Occidental: Finca San Jorge | Concentración | Concentración |
|---|---|---|---|

| Fecha | Concentración máxima horaria de CO (µg/m$^3$) | Concentración octohoraria de CO (µg/m$^3$) | Fecha | Concentración máxima horaria de CO (µg/m$^3$) | Concentración octohoraria de CO (ug/m3) | Norma 1 Hora - Resolución 610 de 2010 (40000µg/m$^3$) | Octohoraria permitida en Norma - Resolución 610 de 2010 (10000 µg/m$^3$) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 07/10/2011 | 2857 | 1857 | 19/10/2011 | 2571 | 2000 | 40000 | 10000 |
| 08/10/2011 | 3429 | 1929 | 20/10/2011 | 2857 | 2000 | 40000 | 10000 |
| 09/10/2011 | 1714 | 1071 | 21/10/2011 | 2286 | 1857 | 40000 | 10000 |
| 10/10/2011 | 2857 | 1714 | 22/10/2011 | 2286 | 1714 | 40000 | 10000 |
| 11/10/2011 | 2857 | 1750 | 23/10/2011 | 2286 | 1536 | 40000 | 10000 |
| 12/10/2011 | 3429 | 2036 | 24/10/2011 | 2857 | 1750 | 40000 | 10000 |
| 13/10/2011 | 2000 | 1714 | 25/10/2011 | 2286 | 1679 | 40000 | 10000 |
| 14/10/2011 | 2286 | 1714 | 26/10/2011 | 2000 | 1714 | 40000 | 10000 |
| 15/10/2011 | 2286 | 1750 | 27/10/2011 | 1714 | 1393 | 40000 | 10000 |
| 16/10/2011 | 2000 | 1643 | 28/10/2011 | 2286 | 1464 | 40000 | 10000 |

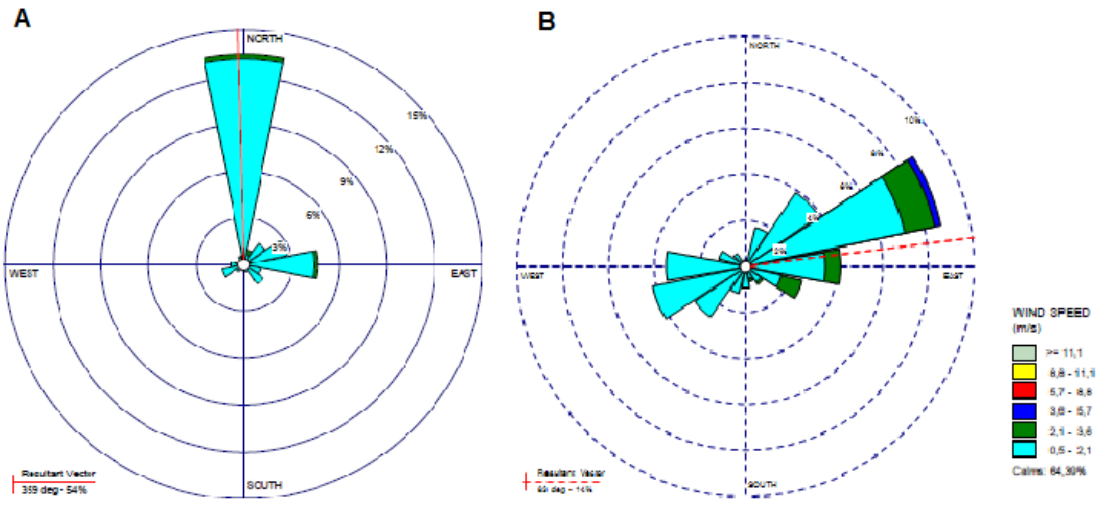
Fuente: Datos tomados de informes de GSA S.A.S para la Concesión túnel Aburrá-Oriente, 2011.

Los resultados obtenidos en los portales oriental y occidental indican, que en ninguna de las estaciones, las mediciones horarias superaron el límite permitido de 40.000 µg/m$^3$ según lo establecido en la norma. Adicionalmente, los valores de concentración octohoraria de CO en ningún caso superó el valor admitido por la norma equivalente a 10.000 µg/m$^3$.

#### 3.2.8.2.6 Rosa de vientos

De acuerdo con los datos generados por los estudios de GSA S.A.S, para períodos de 24 horas incluyendo las noches del 6 al 15 de octubre de 2011, época de desarrollo de los muestreos, se puede concluir que para este período se presentó una predominancia de vientos ingresando por el Norte que viajan al sector Sur.

En la siguiente figura se observa que en el Portal Oriental del Túnel Santa Elena, los vientos predominantes vienen del norte y del este con velocidades entre 0,5 y 2,1 m/s; mientras que en el Portal Occidental del Túnel Santa Elena, predominaron los vientos que ingresan por el noreste que se dirigen al suroeste con velocidades entre 0 y 3,8 m/s. La figura también permite inferir que los vientos provienen de diferentes direcciones.




Fuente: informes de GSA S.A.S para la Concesión túnel Aburrá-Oriente, 2011.

Figura 3-287 - Rosas de viento. A-Portal Oriental Túnel Santa Elena - Finca Cístico y B-Portal Occidental Túnel Santa Elena - Finca San Jorge.

### 3.2.8.3 Ruido

El ruido es definido según la literatura como un sonido no deseado y en la actualidad se encuentra entre los contaminantes más invasivos en cuanto a la calidad atmosférica se refiere.

La línea base de ruido ambiental y por consiguiente, la única forma de establecer el grado de intervención en la etapa de construcción del proyecto Conexión Vial Aburra Oriente, inicia con los muestreos realizados por la empresa Gestión y Servicios Ambientales S.A.S (GSA S.A.S), para diagnosticar el nivel de presión sonora continuo equivalente a ruido ambiental. Este estudio se realizó tres meses antes comenzar la construcción del proyecto (previo a la suspensión), tomando como puntos neurálgicos para el desarrollo de los muestreos dos sitios que cubren el área de los portales oriental (punto1) y occidental (punto 2) del Túnel Santa Elena; teniendo como referencia lo estipulado en la resolución 0627 del 7 de abril de 2006 del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, por la cual se establece la norma nacional de emisión de ruido y ruido ambiental.

Los resultados obtenidos en cada uno de los puntos de muestreo, se analizaron en función de la Tabla 2 del Artículo 17 de la Resolución 0627 de 2006, en la que se establecen los estándares máximos de los niveles de ruido ambiental permitidos, expresados en decibeles ponderados A (db(A)).

Tabla 3-152 - Estándares máximos permisibles de niveles de ruido ambiental, expresados en decibeles DB(A).

| Sector | Subsector | Estándares máximos permisibles de niveles de ruido ambiental en dB(A) | |
|---|---|---|---|
| | | Día | Noche |
| Sector A. Tranquilidad y Silencio | Hospitales, bibliotecas, guarderías, sanatorios, hogares geriátricos. | 55 | 45 |
| Sector B. Tranquilidad | Zonas residenciales o exclusivamente destinadas para desarrollo | 65 | 50 |

| Sector | Subsector | Estándares máximos permisibles de niveles de ruido ambiental en dB(A) | |
|---|---|---|---|
| | | Día | Noche |
| y Ruido Moderado | habitacional, hotelería y hospedajes. | | |
| | Universidades, colegios, escuelas, centros de estudio e investigación | | |
| | Parques en zonas urbanas diferentes a los parques mecánicos al aire libre | | |
| Sector C. Ruido Intermedio Restringido | Zonas con usos permitidos industriales, como industrias en general, zonas portuarias, parques industriales, zonas francas. | 75 | 70 |
| | Zonas con usos permitidos comerciales, como centros comerciales, almacenes, locales o instalaciones de tipo comercial, talleres de mecánica automotriz e industrial, centros deportivos y recreativos, gimnasios, restaurantes, bares, tabernas, discotecas, bingos, casinos. | 70 | 55 |
| | Zonas con usos permitidos de oficinas. | 65 | 50 |
| | Zonas con usos institucionales. | | |
| | Zonas con otros usos relacionados, como parques mecánicos al aire libre, áreas destinadas a espectáculos públicos al aire libre, vías troncales, autopistas, vías arterias, vías principales. | 80 | 70 |
| Sector D. Zona Suburbana o Rural de Tranquilidad y Ruido Moderado | Residencial suburbana. | 55 | 45 |
| | Rural habitada destinada a explotación agropecuaria. | | |
| | Zonas de Recreación y descanso, como parques naturales y reservas naturales. | | |

Fuente: Resolución 0627 de 2007

#### 3.2.8.3.1 Punto 1: Portal Oriental Santa Elena

En el punto 1, se realizaron las evaluaciones de ruido ambiental los días 14 y 16 de octubre de 2011. Esta zona según las características de ubicación de los 6 puntos de muestreo puede ser clasificada según lo indica la siguiente tabla como un Sector D que abarca una Zona Suburbana o Rural de Tranquilidad y Ruido Moderado, y la cual establece para el día un valor máximo de 55 dB(A) y para la noche un valor máximo de 50 dB (A); y/o como un Sector C Ruido Intermedio Restringido, establece un valor máximo para el día de 80 dB(A) y para la noche un valor máximo de 75 dB.

De acuerdo con las características de un sector tipo D, a continuación se relacionan los puntos de muestreo que sobrepasaron los valores máximos permisibles, los cuales en gran medida pueden estar marcados por el frecuente paso de aviones, aumentando así los niveles sonoros detectados.

Tabla 3-153 - Puntos de muestreo que sobrepasan los niveles máximos permisibles para sector D en el Portal Oriental Santa Elena.

| Punto | LRAeq(dBA) | Valor norma (dBA) | dBA que sobre pasa |
|---|---|---|---|
| Día semana nocturno | | | |
| 1 | 53,8 | 50 | 3,8 |
| Día semana diurno | | | |
| 1 | 55,8 | 55 | 0,8 |
| 6 | 55,1 | | 0,1 |
| Día festivo diurno | | | |
| 2 | 55,6 | 55 | 0,6 |

Fuente: Estudio de simulación del ruido de GSA S.A.S 2011.

Los resultados para un sector tipo C, no reportaron mediciones de ruido por encima del valor máximo permitido para el día y la noche.

#### 3.2.8.3.2 Punto 2: Portal Occidental Santa Elena

Para el punto 2, se realizaron las evaluaciones de ruido ambiental los días 25 y 27 de noviembre de 2011. Esta zona al igual que la descrita en el punto 1, puede ser clasificada, según lo indicado en la siguiente tabla como un Sector D que abarca una Zona Suburbana o Rural de Tranquilidad y Ruido Moderado, en la que se establece para el día un valor máximo de 55 dB(A) y para la noche un valor máximo de 50 dB (A); y/o como un Sector C Ruido Intermedio Restringido, que establece como valor máximo para el día 80 dB(A) y para la noche un valor máximo de 75 dB.

De acuerdo con las características de un sector tipo D, a continuación se relacionan los puntos de muestreo que sobrepasaron los valores máximos permisibles, de los cuales se puede determinar que los puntos 1, 2, 4 y 6 registran valores constantes enmarcados por el comportamiento propio de un sistema de agua de tipo lotico (cercanía a la quebrada La Aguadita), para el punto 3 se tiene aproximadamente un retiro al sistema lotico igual a 30 m y por lo general se presentan cantos de aves y el movimiento propio que ocasiona el viento en el follaje, y para el punto 5, su ubicación cercana a la vía de acceso principal al corregimiento de Santa Elena enmarca los niveles de ruido en el paso vehicular.

Tabla 3-154 - Puntos de muestreo que sobrepasan los niveles máximos permisibles para sector D en el Portal Occidental Santa Elena.

| Punto | LRAeq (dBA) | Valor norma (dBA) | dBA que sobre pasa |
|---|---|---|---|
| Día semana nocturno | | | |
| 1 | 70,1 | 50 | 20,1 |
| 2 | 75,6 | | 25,6 |
| Día semana diurno | | | |
| 1 | 70,0 | 55 | 15 |
| 2 | 75,6 | | 20,6 |
| 4 | 74,9 | | 19,9 |
| 5 | 70,6 | | 15,6 |
| 6 | 66,2 | | 11,2 |
| Día festivo nocturno | | | |
| 1 | 68,5 | 50 | 18,5 |
| 2 | 75,0 | | 25 |
| Día festivo diurno | | | |
| 1 | 68,6 | 55 | 13,6 |

| Punto | LRAeq (dBA) | Valor norma (dBA) | dBA que sobre pasa |
|---|---|---|---|
| 2 | 75,1 | | 20,1 |
| 4 | 73,2 | | 18,2 |
| 5 | 71,3 | | 16,3 |
| 6 | 65,7 | | 10,7 |

Fuente: Estudio de simulación del ruido de GSA S.A.S 2011.

Los resultados para un sector tipo C, registraron para los puntos 1 y 2, valores por encima del máximo permisible por la norma e igualmente constates, que permiten inferir, la presencia y comportamiento típico de ecosistemas de tipo lotico cercanos.

Tabla 3-155 - Puntos de muestreo que sobrepasan los niveles máximos permisibles para sector C en el Portal Occidental Santa Elena.

| Punto | LRAeq (dBA) | Valor norma (dBA) | dBA que sobre pasa |
|---|---|---|---|
| Día semana nocturno | | | |
| 1 | 70,1 | 70 | 0,1 |
| 2 | 75,6 | | 5,6 |
| Día festivo nocturno | | | |
| 2 | 75,0 | 70 | 5,0 |

Fuente: Estudio de simulación del ruido de GSA S.A.S 2011.

En el Anexo 3-4 se presenta el estudio con los respectivos soportes, elaborado por GSA S.A.S 2011.

### 3.2.9 Paisaje

Para la caracterización del componente Paisaje, se retomó el trabajo realizado en la Actualización del Estudio de Impacto Ambiental realizada en el 2.009, en la que se actualizó la información levantada en el 2.000 con nuevos estudios e investigaciones, así como las visitas de campo que permitieron confirmar tanto la información secundaria del pasado EIA como la más reciente. De igual manera, se tomó la nueva sectorización del proyecto.

#### 3.2.9.1 Generalidades.

La cobertura vegetal es la expresión del paisaje que más acerca a una región, pues ella resume las costumbres y la forma de vida de los habitantes de un área específica.

La clasificación de la cobertura vegetal del AID y del AII del proyecto, como un componente del paisaje, está basado en la metodología Corine (Coordination of Information of the Environment) Land Cover, tal como fue mencionado anteriormente.

Teniendo en cuenta la sectorización del proyecto, y sabiendo que el paisaje es un componente de una magnitud más holística que otros componentes físicos, sectorizaremos la caracterización del paisaje de la siguiente manera:

- Túnel Baltimore: comprende el Intercambio vial y el techo del Túnel Baltimore.
- Acceso occidental: viaducto que conecta ambos túneles.
- Acceso oriental: comprende la conexión vial desde el portal oriental del Túnel de Santa Elena, hasta la glorieta Sajonia.

Para el sector Túnel Baltimore se distinguen tres grupos de cobertura vegetal, los cuales se presentan en la siguiente tabla, incluyendo las respectivas extensiones.

Tabla 3-156 Coberturas vegetales Túnel Baltimore.

| Cobertura vegetal | Área | |
|---|---|---|
| | (ha) | (%) |
| Tejido urbano discontinuo | 98,13 | 73,07 |
| Pastos limpios | 27,47 | 20,46 |
| Bosque plantado | 7,53 | 5,61 |
| Bosque natural fragmentado (Ra-Rb) | 1,17 | 0,87 |
| TOTAL | 134,29 | 100 |

Fuente: Integral 2.009

Para el acceso occidental se presentan 5 grupos de cobertura vegetal, como se observa en la siguiente tabla:

Tabla 3-157 Coberturas vegetales Acceso occidental

| Cobertura vegetal | Área | |
|---|---|---|
| | (ha) | (%) |
| Bosque plantado | 214,68 | 47,58 |
| Mosaico pastos y espacios naturales | 123,62 | 27,40 |
| Pastos limpios | 67,64 | 14,99 |
| Tejido urbano continuo | 28,10 | 6,23 |
| Mosaico cultivo, pastos y espacios naturales | 17,13 | 3,80 |
| TOTAL | 451,18 | 100 |

Fuente: Integral 2.009

Para el Acceso Oriental encontramos 8 grupos de cobertura vegetal diferente, ver siguiente tabla:

Tabla 3-158 Coberturas vegetales Acceso oriental

| Cobertura vegetal | Área | |
|---|---|---|
| | (ha) | (%) |
| Pastos limpios | 40,67 | 25,43 |
| Bosque natural fragmentado | 28,68 | 17,93 |
| Pastos enmalezados | 23,50 | 14,69 |
| Mosaico cultivos, pastos y espacios naturales | 22,07 | 13,80 |
| Instalaciones recreativas | 19,15 | 11,97 |
| Fincas de recreo-parcelación | 12,14 | 7,59 |
| Bosque plantado | 10,50 | 6,56 |
| Tierras desnudas o degradadas | 3,24 | 2,03 |
| TOTAL | 159,95 | 100 |

Fuente: Integral 2.009

### 3.2.9.2 Historia

#### 3.2.9.2.1 Túnel Baltimore

Una visión del territorio muestra que el paisaje de la zona está influenciado por asentamientos urbanos, establecidos en zona declarada por Planeación Municipal como de alto riesgo. En el Seminario Conciliar de Medellín y en propiedad de la Universidad Pontificia Bolivariana que se hallan en este sector, se observa que el paisaje está influenciado por viejas plantaciones de eucalipto expresadas como regeneración natural. Además resalta en forma particular la cúpula del Seminario Mayor, que durante muchos años ha caracterizado dicho sector.

#### 3.2.9.2.2 Acceso Occidental

Las coberturas vegetales de esta zona muestran que el paisaje está influenciado en su mayor extensión por bosque plantado con coníferas y eucalipto. En el área de influencia, el crecimiento de la malla urbana presenta un patrón de crecimiento más planificado que el de la margen derecha de la cuenca de la quebrada Santa Elena, lo que ha permitido una mayor conservación de áreas bajo cobertura vegetal natural y plantaciones forestales comerciales.

#### 3.2.9.2.3 Acceso Oriental

En este sector existió una cantera de roca, de la cual aún se conserva un talud irregular escalonado en roca, que alcanza alturas de hasta 25 m. Así mismo vale la pena mencionar que un rasgo de gran importancia es el alto grado de humedad de la zona del portal, con varios afloramientos de agua y el cruce (sobre la plazoleta existente) de una quebrada. El desarrollo de la cobertura vegetal de esta zona, muestra una marcada influencia hacia un desarrollo más urbano y/o suburbano que rural.

### 3.2.9.3 Matriz

#### 3.2.9.3.1 Túnel Baltimore

La matriz de la zona de influencia de este sector está representada por tejido urbano discontinuo. Esta matriz ocupa un área de 98,13 ha que corresponde a un 73,07% del total de este sector. Por lo tanto el grado de conectividad para esta matriz es alto.

#### 3.2.9.3.2 Acceso Occidental

La matriz de la zona de influencia se encuentra bajo una cobertura vegetal en bosque de plantación, la cual avanzó por la ejecución del Plan Laderas, programa de Empresas Públicas de Medellín y CORANTIOQUIA.

Ocupa un área de 214,68 ha, observándose áreas plantadas en las vertientes de las quebradas La Pastora, Chupadero y Mediagua.

Esta cobertura genera una serie de beneficios como son la regulación hídrica de los caudales de las diferentes quebradas, la generación de empleo a los habitantes de la zona, la estabilidad de los suelos de ladera, el control de la erosión superficial, la permanencia de la fauna y la conformación de zonas de esparcimiento para los habitantes que disfrutan de caminatas recreativas por los bosques y montañas en las cercanías de la ciudad.

La matriz aísla las áreas en bosque natural y rastrojos con la actual vía a Santa Elena, por lo que crea una barrera que dificulta el aprovechamiento de las especies establecidas allí.

El grado de conectividad es del orden del 47,58%, con una porosidad del 52,42%, lo que la clasifica con un grado de porosidad medio.

#### 3.2.9.3.3 Acceso Oriental

En este sector encontramos como matriz la cobertura denominada como Pastos limpios con un área de 40,67 ha que corresponde al 25,43% del área total. Los pastos observados presentan diferentes tipos de manejo, contrastantes entre sí, que van desde el mantenimiento periódico con la aplicación de herbicidas de hoja ancha, hasta pasto enmalezado. Le sigue en importancia por

área, una zona de bosque natural fragmentado, localizado específicamente hacia el interior del portal oriental del túnel de Santa Elena. Sin embargo, teniendo en cuenta que existen otras dos coberturas de áreas similares, solo podríamos evaluar como matriz la cobertura de pastos limpios.

### 3.2.9.4 Parches

#### 3.2.9.4.1 Túnel Baltimore

Se identificaron en el área de influencia los siguientes parches.

**Pastos limpios.**

Las zonas de pastos limpios (Tabla siguiente) pertenecen básicamente al Seminario Conciliar de Medellín, en las cuales su mantenimiento se basa en conceptos netamente de paisaje y de entorno inmediato. Estas zonas al interior de las propiedades continuarán así, hasta que sus dueños no determinen otros usos.

Tabla 3-159 Parche en Pasto

| Tipo de Parche | Área | |
|---|---|---|
| | ha | % |
| Introducido | 27,47 | 100 |
| Total | 27.47 | 100 |

Fuente: Integral 2.009

**Bosque plantado**

Este sector presenta dos áreas pequeñas y concentradas de plantación de eucalipto, al interior de diversas propiedades que se encuentran aledañas a la vía las Palmas en el punto donde se construirá la interconexión vial Baltimore, dicha cobertura se halla en un estado avanzado de desarrollo pues los individuos allí observados presentan alturas de hasta 26 metros y diámetros normales hasta de 80 cm. Este parche se verá reducido con la construcción del proyecto (Ver siguiente tabla).

Tabla 3-160 Parche en Bosque plantado

| Tipo de Parche | Área | |
|---|---|---|
| | ha | % |
| Introducido | 7,53 | 100 |
| Total | 7,53 | 100 |

Fuente: Integral 2.009

**Bosque natural fragmentado**

Este pequeño parche se encuentra localizado en el ingreso al Seminario Conciliar de Medellín sobre el costado izquierdo de la portería. Esta cobertura presenta una mezcla de rastrojo alto y bajo con vegetación pionera en un estado sucesional poco avanzado. Este parche (Tabla siguiente) desaparecerá en su totalidad con la construcción tanto de la interconexión vial Baltimore como de la plazoleta de entrada para este túnel.

Tabla 3-161 - Parche en Bosque natural fragmentado

| Tipo de Parche | Área | |
|---|---|---|
| | ha | % |
| Perturbación | 1,17 | 100 |
| Total | 1,17 | 100 |

Fuente: Integral 2.009

#### 3.2.9.4.2 Acceso Occidental

Se identificaron en el área de influencia los siguientes parches.

**Mosaico pastos y espacios naturales.**

A continuación, se presentan los parches de este tipo de cobertura:

Tabla 3-162 - Parche en Mosaico pastos y espacios naturales

| Tipo de Parche | Área | |
|---|---|---|
| | ha | % |
| Remanente | 123,62 | 100 |
| Total | 123,62 | 100 |

Fuente: Integral 2.009

Uno de los parches remanentes se encuentra localizado en cercanía del portal de salida del Túnel de Baltimore. Se podría concluir que en esta zona existió anteriormente una plantación de eucalipto que ya fue aprovechada y se ha regenerado naturalemente. En la zona donde se halla el pasto arbolado se evidenció la presencia de unos pocos semovientes. El otro parche se halla localizado cerca al portal occidental del Túnel de oriente y desciende hasta la vía Santa Elena abrazando parte de la quebrada del mismo nombre. Estos parches están constituidos por zonas con rastrojo bajo, pastos enmalezados y pastos arbolados. Esta cobertura continuará así hasta que sus propietarios, determinen un uso diferente.

Hacia la parte alta de la montaña y al interior de los terrenos que anteriormente pertenecieron a CORFORESTAL, dada la ejecución del proyecto Plan Laderas y del Parque Arví, se han generado y conservado algunas unas zonas de protección para los cuerpos de agua que están llamados a servir como hábitat de entomofauna y avifauna, los cuales sirven de control natural de las plagas que potencialmente puedan desarrollarse en las actuales y futuras plantaciones forestales. Estas zonas de retiro presentan un futuro promisorio, cuya filosofía y manejo, les permitirá su permanencia.

Estos rastrojos presentan beneficios ecológicos importantes similares a los que brindan los parches en bosque natural.

La mayor zona presente en rastrojo bajo corresponde a áreas de servidumbre utilizadas para el mantenimiento de las líneas de transmisión de alta tensión que cruzan por el sector, y otras, más pequeñas, a áreas erosionadas sin uso.

Se definió que este parche es de tipo remanente por las siguientes razones:

- No se evidencia hacia el futuro la evolución de la composición florística de estas zonas, a coberturas más especializadas dentro de lo que se considera la sucesión vegetal.
- El mantenimiento de las líneas es constante y por tiempo indefinido.

**Pastos limpios.**

A continuación se presentan los diferentes parches identificados:

Tabla 3-163 - Parche en Pastos limpios

| Tipo de parche | Área | |
|---|---|---|
| | ha | % |

| Tipo de parche | Área | |
|---|---|---|
| | ha | % |
| Remanentes | 50,04 | 73,98 |
| | 15,43 | 22,81 |
| | 2,01 | 2,97 |
| | 0,16 | 0,24 |
| Total | 67,64 | 100 |

Estas zonas presentan las siguientes características:

- En general, los pastos de la zona no están dedicados a la producción por razones de seguridad o por la poca fertilidad y productividad de los suelos.
- Otras zonas de pastos son aquellas que se encuentran en los alrededores de barrios o pequeñas casas aisladas, por lo que su mantenimiento es importante por razones de seguridad y de estética.
- Las zonas de gramas pertenecen a viviendas o construcciones, en las cuales su mantenimiento se basa en conceptos netamente de paisaje y entorno inmediato.
- De la anterior clasificación de parches, se concluye que se podrían presentar tres situaciones:
    - Las zonas que se sustraigan del plan de expansión urbana municipal, y que presenten una extensión que cumpla con los requisitos del Plan laderas, es posible que sean reforestadas.
    - Áreas que se sustraigan del plan de expansión urbana y que no tengan extensiones apropiadas para la reforestación, es posible que se urbanicen, en forma normal o subnormal, según se desenvuelva la historia del sector.
    - Zonas verdes al interior de las propiedades continuarán así, hasta que sus dueños no determinen otros usos.
    - Debiera desestimularse el pastoreo, controlar el sobrepastoreo mediante programas de extensión y fomentarse la reforestación en las zonas actualmente en pastos de la parte media de la microcuenca de la quebrada santa Elena.

### Tejido urbano continúo

En la siguiente tabla se presenta el área correspondiente a este parche:

Tabla 3-164 Parche en Tejido urbano continuo

| Tipo de Parche | Área | |
|---|---|---|
| | ha | % |
| Introducido | 28,10 | 100 |
| Total | 28,10 | 100 |

Fuente: Integral 2.009

A diferencia del tejido urbano discontinuo del sector en Baltimore, en esta zona se encuentran concentradas las zonas urbanas de forma continua: barrio Loreto, Medellín sin Tugurios, Cataluña y varios conjuntos habitacionales entre otros.

El fuerte relieve y la presencia de una capa de alteración de espesor moderado a bajo, junto con el clima húmedo y el uso de la tierra hacen de esta zona la más inestable y con mayores problemas actuales y potenciales de erosión hídrica superficial (erosión por escurrimiento difuso intenso y cárcavas en zonas sin vegetación) y de remoción en masa (desprendimientos en escarpes y deslizamientos en filos y otras unidades).

**Mosaico cultivo, pastos y espacios naturales**

En la siguiente tabla se presenta el área correspondiente a este parche:

Tabla 3-165 Parche en Mosaico cultivo, pasto y espacios naturales

| Tipo de Parche | Área | |
|---|---|---|
| | ha | % |
| Introducido | 17,13 | 100 |
| Total | 17,13 | 100 |

Fuente: Integral 2.009

Este sector clasificado en las coberturas terrestres como Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales se encuentra localizado en la vereda Media luna (zona rural), en el área donde la quebrada de santa Elena cruza la vía de este mismo corregimiento.

La agricultura debería desestimularse totalmente en zonas de pendiente por encima del 50%.

### 3.2.9.4.3 Acceso Oriental

**Bosque natural fragmentado.**

En la siguiente tabla se identifica el siguiente parche:

Tabla 3-166 Parche en Bosque natural fragmentado

| Tipo de parche | Área | |
|---|---|---|
| | ha | % |
| Remanente | 28,68 | 100 |
| Total | 28,68 | 100 |

Este parche incluye un área de 28,68 ha, pertenecientes al 17,93% del área total. No obstante el carácter remanente de este parche, su importancia en el paisaje radica en que forma parte de un gran parche que se localiza por fuera del área de influencia.

Razones como la producción de semillas y plántulas, con potencial de ser utilizadas mediante siembras o plantaciones de enriquecimiento al interior de los rastrojos existentes, hacen de este parche un área de especial interés.

**Pastos enmalezados.**

En la siguiente tabla se detalla el siguiente parche identificado:

Tabla 3-167 Parche en Pasto enmalezado

| Tipo de parche | Área | |
|---|---|---|
| | ha | % |
| Remanente | 23,50 | 100 |
| Total | 23,50 | 100 |

Es un pequeño parche que a pesar de tener vegetación con algún grado de diversidad, no se deben de separar del concepto de parcela bajo uso en ganadería extensiva, ya que hacen parte de una etapa específica del manejo tradicional de los potreros, como es la etapa o período de descanso.

Estos terrenos retornan, en la mayoría de los casos, a la producción ganadera, por lo que pierden la vegetación acumulada durante el período de descanso volviendo a una cobertura de pastos (potreros en general).

### Mosaico cultivos, pastos y espacios naturales.

En la siguiente tabla se presenta el área correspondiente a este parche:

Tabla 3-168 Parche en Mosaico cultivos, pasto y espacios naturales

| Tipo de parche | Área | |
|---|---|---|
| | ha | % |
| Remanente | 22,07 | 100 |
| Total | 22,07 | 100 |

Fuente: Integral 2.009

Este parche tiene una extensión de 22,07 ha que corresponde a un 13,80% del área total del sector. Debido a la importancia que en los últimos años han tomado los cultivos de flores en Colombia para exportación, pequeñas parcelas han implementado este uso del suelo, igualmente en este parche se encuentran pastos y espacios naturales.. A nivel de paisaje, indica estabilidad en la producción al igual que una utilización intensiva y permanente de la tierra.

La agricultura es de tipo minifundista. La ecología del paisaje tiene una tendencia a la mayor fragmentación de la tierra, en parcelas cada vez más pequeñas, debido a la partición de la tierra de padres a hijos por efectos de la conformación de nuevas familias.

### Zonas verdes artificializadas no agrícolas

En la siguiente tabla se presentan las áreas correspondientes a este tipo de parche:

Tabla 3-169 Parche en Zonas verdes artificializadas no agrícolas

| Tipo de parche | Área | |
|---|---|---|
| | ha | % |
| Introducido | 31,29 | 100 |
| Total | 31,29 | 100 |

Fuente: Integral 2.009

Los dos parches correspondientes a: Instalaciones recreativas y Fincas de recreo-parcelación correspondientes al nivel 3 de la Clasificación Corine line (IGAC 2007), pasan a un nivel 2 como zonas verdes artificializadas, no agrícolas y abarcan una extensión de 31,29 ha, que corresponden a 19,56% del área total del sector. Este parche es el único territorio artificializado del sector y tiende a aumentar, debido, a la aparición de foráneos en la zona, cuyo interés es comprar una parcela para construir una finca de recreo.

### Bosque plantado.

Se identificó el parche identificado en la tabla siguiente:

Tabla 3-170 Parche en Bosque plantado

| Tipo de parche | Área | |
|---|---|---|
| | ha | % |
| Introducido | 10,50 | 100 |
| Total | 10,50 | 100 |

Este parche tiene una extensión de 10,50 ha correspondiente al 6,56% del área total del sector.

Este parche se considera introducido porque un parche de plantación forestal no deja de ser una cobertura introducida por la acción del hombre.

Estos bosques están compuestos fundamentalmente por latifoliadas rodeadas por algunas zonas de potreros, rurales nucleadas y rastrojos altos principalmente.

Las plantaciones forestales en esta zona presentan beneficios ecológicos intangibles, como la protección y regulación hídrica que ejercen sobre la quebrada Sajonia.

**Tierras desnudas o degradas.**

Se identificó el parche relacionado en la siguiente tabla:

Tabla 3-171 Parche en Tierras desnudas o degradadas

| Tipo de parche | Área | |
|---|---|---|
| | ha | % |
| Introducido | 3,24 | 100 |
| Total | 3,24 | 100 |

Fuente: Integral 2.009

Esta zona corresponde a una antigua cantera, localizada en el portal oriental del Túnel de Santa Elena, caracterizando el paisaje como un territorio escarpado con afloramiento de roca.

### 3.2.9.5 Corredores

Conformados por vías principales y de penetración, quebradas y caminos presentes en el área de influencia.

#### 3.2.9.5.1 Acceso Occidental

**Santa Elena.**

La vía a Santa Elena es el corredor de mayor influencia en este sector. En sus alrededores se han desarrollado y consolidado asentamientos como los barrios Juan Pablo II, Ocho de Marzo y Santa Lucía de las Estancias. Las influencias de esta vía sobre el desarrollo de la ecología del paisaje son:

- Por su cercanía a Medellín y la disponibilidad de terreno, ha facilitado el asentamiento subnormal de pequeñas comunidades que crecen aceleradamente.
- Deterioro de los bosques naturales, rastrojos y bosques comerciales que no tengan vigilancia adecuada, debido a que éstos tienen maderas que suplen elementos estructurales para la conformación de la casa, y leña para la cocción de alimentos.
- Extracción de musgo, tierra negra, plantas de interior, aves y otros animales para la venta en la ciudad, lo que afecta las áreas de bosques y rastrojos.
- Vías de penetración.

La zona presenta dos vías de penetración, una de ellas sale a la altura del sitio conocido como el Aserradero y la otra a la altura del seminario Arquidiocesano Redentoras Mater.

La vía del Aserradero es un camino forestal, con aproximadamente 1 800 m de longitud, de bajas especificaciones, concebido para la extracción de madera de las plantaciones que se encuentran en ese sector.

La vía que se desprende cerca al Seminario, con aproximadamente 1 200 m de longitud, es el camino de entrada a las instalaciones de éste, por lo que su función está prácticamente reducida y controlada a los quehaceres directos de la institución.

**Caminos indígenas.**

En la margen izquierda de la cuenca de la quebrada Santa Elena, se identificaron estructuras en piedra como caminos, muros y vallados. De los primeros, construidos durante la época prehispánica, se identificaron dos: el "Camino de los Chivos" y el "Camino del Tirabuzón"

El paisaje toma una nueva dimensión, pues además de las bondades escénicas y ecológicas, se incorpora un nuevo recurso, digno de análisis e inversión estatal, como es el de derecho a la conservación del patrimonio histórico y cultural de los pueblos.

**Quebradas.**

Las características generales de la zona son:

- 18 cauces principales con 12.502 m de longitud.
- 14 afluentes para 7 quebradas, con una longitud de 4.131m.
- Longitud total de corrientes de agua de 16.733 m.
- Densidad de drenaje de 3,27 km/km$^2$.

Tal como se ha mencionado anteriormente los cauces de agua localizados en el área de influencia son:

Tabla 3-172 Cauces Sector Occidental

| Quebrada | Longitud (m) | Afluentes (número) | Longitud (m) | Longitud total(m) |
|---|---|---|---|---|
| La Aguada | 461 | | | 461 |
| Bocana | 1 141 | | | 1 141 |
| La Escorrentía | 518 | | | 518 |
| La Espadera | 1 732 | 5 | 2 915 | 4 647 |
| NN1 | 175 | | | 175 |
| NN2 | 260 | | | 260 |
| La Seca | 476 | 1 | 120 | 596 |
| La Salada | 440 | | | 440 |
| Media Agua | 1 584 | 2 | 466 | 2 150 |
| El Chupadero | 1 666 | | | 1 666 |
| El Aserradero | 360 | 2 | 124 | 484 |
| La Pastora | 1 047 | 1 | 107 | 1 154 |
| La Pastorcita | 749 | | | 749 |
| La Pulgarina | 238 | | | 238 |
| Los Caunces | 447 | 1 | 51 | 498 |
| El Cuchillón | 552 | | | 552 |
| Los Caunces 1 | 136 | | | 136 |
| La India | 520 | 2 | 348 | 868 |
| TOTAL | 12 502 | 14 | 4 131 | 16 733 |

### 3.2.9.5.2 Acceso Oriental

**Vías principales.**

Entre el portal Oriental del túnel y la glorieta del aeropuerto existen 6,13 km de vías principales, que corresponden al 63,1% de las vías de la zona.

La distribución de estas vías se presenta en la siguiente tabla:

Tabla 3-173 Vías principales sector Oriental

| Principales | km |
|---|---|
| Santa Elena | 3,80 |
| Aeropuerto - Las Palmas | 0,60 |
| Glorieta aeropuerto - autopista Medellín - Bogotá | 1,34 |
| Aeropuerto - Llano Grande | 0,38 |
| Total | 6,13 |

La anterior cifra corresponde a una densidad vial de 2,34 km/km$^2$ (23,4 m/ha) para las vías principales.

**Vías secundarias.**

Entre el portal Oriental y la glorieta del aeropuerto, se contabilizaron 3,58 km de vías secundarias y penetración, para una densidad vial de 1,37km/km$^2$ (13,7m/ha).

**Quebradas.**

Entre el portal Oriental y la glorieta del aeropuerto se encuentran las siguientes quebradas, ver siguiente tabla:

Tabla 3-174 Cauces Sector Oriental

| Quebrada | Longitud en la zona(m) |
|---|---|
| Sajonia | 3 500 |
| Los Escobares | 980 |
| El Yarumo | 790 |
| Total | 5 270 |

La quebrada Sajonia abastece algunos acueductos veredales. La quebrada El Yarumo sirve como fuente de abastecimiento a los acueductos veredales de Sajonia - Alto Vallejo, el cual tiene capacidad para 400 usuarios, y al acueducto de la Aerocivil y parte de la vereda Yarumal.

La densidad de drenaje es de 2km/km$^2$ (20m/ha).

### 3.2.9.6 La dimensión perceptual del paisaje

El paisaje como recurso se puede definir como el espacio que provoca una serie de sensaciones que tienen que ver con componentes estéticos, culturales o emocionales y en el que existe un amplio sistema de interrelaciones.

El ser humano, analiza e interpreta lo percibido en este espacio, por tal razón para que exista un paisaje deben darse dos requisitos: la existencia de un espacio físico constituido por una porción de terreno o una masa de agua y la percepción de este territorio originada por la alteración de los sentidos.

La imagen del paisaje se forma en la mente de la persona gracias a la información que recibe a través de los sentidos: formas, tamaños, colores, movimientos, sonidos. Otra es la formada por las

relaciones existentes entre los distintos componentes del paisaje y entre seres vivos, otra la percibida por los habitantes de una zona a través de su relación con el territorio que habita.

La memoria como mecanismo de transmisión del conocimiento, permite que la población especialmente los más jóvenes asuman referentes geográficos, históricos y culturales que les identifica con el territorio, y construyan a través del tiempo lazos sociales y territoriales. A pesar de la magnitud de la transformación en el contexto natural y social que nos ocupa, se observa la persistencia de una frágil continuidad en la valoración y uso del territorio; el arraigo de una población que aunque cada vez menos, reconoce en el territorio las huellas de sus anteriores generaciones como identidad y a pesar de los constantes factores externos que la amenazan, se niega a desaparecer.

#### 3.2.9.6.1 Túnel Baltimore y Acceso Occidental

Los principales referentes espaciales para el primer sector son, la vía que conecta a Medellín con Rionegro, via Las Palmas y el seminario mayor con su cúpula emblemática; ellos simbolizan diversos valores suburbanos espaciales relacionados con el límite del territorio, la conectividad y la localización.

El segundo sector no posee referentes espaciales significativos para la escasa población asentada en dicha zona, y los que existen no son de fácil reconocimiento. Se identifican dos marcas longitudinales alineadas de oriente a occidente, las cuales son formadas por el cambio de cobertura vegetal de plantaciones forestales a rastrojo bajo y potrero; el origen de dichas franjas proviene del mantenimiento de la servidumbre para dos líneas de transmisión eléctrica, aun existentes.

La vertiente izquierda de la quebrada Santa Elena se encuentra dividida en dos zonas bien diferenciadas y demarcadas a partir de la forma, el color y la textura que poseen; la vía que conecta a Medellín con Rionegro por Santa Elena, es el eje que articula y separa estas dos zonas.

La primera zona corresponde a la franja existente entre la quebrada Santa Elena y la vía intermunicipal, en donde existen asentamientos de considerable densidad como los barrios Ocho de Marzo, Juan Pablo II y Barrios de Jesús; este sector se extiende desde el cruce de la quebrada Santa Elena con la vía intermunicipal hasta el cruce de esta misma vía con el límite urbano de Medellín. Los barrios, que se consolidaron desde la década de los 70 hasta los 90, ocupan zonas de protección, clasificadas de alto riesgo de deslizamiento.

La forma longitudinal de la zona está marcada por la disposición de las viviendas, las cuales son alineadas siguiendo la topografía. El color y la textura de los materiales empleados en la construcción de las viviendas permiten un fácil reconocimiento y clasificación de los asentamientos, que varían entre viviendas en mampostería con una o dos alcobas y los más precarios, “cambuches”, construidos con diversos materiales de desecho.

La segunda zona va desde la vía intermunicipal hasta la divisoria de la margen izquierda de la quebrada Santa Elena. La forma se enmarca por la silueta que establece la cuchilla y por las disecciones de las microcuencas que generan grandes sombras verticales sobre dicha vertiente.

Debido a los diferentes usos del suelo y a los tipos de coberturas vegetales existentes, los colores y las texturas tienen múltiples variaciones, aún en las zonas de plantación, gracias a las edades de los cultivos y a los diversos estados sucesionales en los bosques naturales; sin embargo, este

aparente equilibrio en la variedad compositiva por el tipo de cobertura, tiene una tendencia de dominio de las plantaciones correspondientes al *Pinus Patula y Cupressus lusitanica*.

Fuera de las plantaciones, los bosques, potreros y rastrojos, existen algunas edificaciones dispersas en cercanías a la vía intermunicipal, donde sobresale el Seminario Redentoras Máter, que se articulan escénicamente como contrapuntos de referencia contra el paisaje de fondo, estableciendo una escala espacial que es difícil de asimilar sólo con la cobertura vegetal.

También se encuentran los parajes naturales como saltos y pequeñas cascadas, localizadas en los diferentes afluentes de la quebrada Santa Elena, que son referentes poco reconocidos, dada las condiciones de inaccesibilidad en que se encuentran; existe además un mirador conocido como el alto de La Paloma, localizado sobre la divisoria de aguas de la vertiente sur de la quebrada Santa Elena, desde donde se puede apreciar el valle del Aburrá con una panorámica que se extiende del municipio de la Estrella hasta el municipio de Bello.

- Edificaciones: Cúpula Seminario Conciliar de Medellín y Seminario Redentoras Máter.
- Zonas verdes: corresponde a los tratamientos dados en los conjuntos residenciales, a la vegetación que existe al borde de la vía a Las Palmas, a una franja sin intervenciones urbanas desde el cruce del proyecto con la vía las Palmas hasta el barrio Loreto, donde existen especies y a una zona final con plantaciones de pinos y eucaliptos en terrenos de la Universidad Potificia Bolivariana. Dichas coberturas ofrecen diversos grados de permeabilidad visual, brindando altos contrastes contra las edificaciones distribuidas a lo largo de la zona de estudio.
- Obras civiles: la vía a Las Palmas y el tanque de almacenamiento de agua de las Empresas Públicas de Medellín.
- Ríos y quebradas: quebradas La Asomadera, La Milagrosa, Los Arados, La India y La Pastora.
- Relieve topográfico: Sobresale la cuchilla sur de la quebrada Santa Elena

#### 3.2.9.6.2 Túnel de Santa Elena

Existen lugares de memoria significativos por el uso que han tenido a través del tiempo. En términos generales en este caso pueden reconocerse varios usos, el asociado al transporte de los materiales extraídos del bosque y de los cultivos, de algunos se sabe que corresponden a lugares actualmente utilizados por el carácter histórico y paisajístico de la zona, como en el caso de los caminos utilizados actualmente por un sin numero de caminantes; otros lugares están asociados a diferentes especialidades, por ejemplo, culinarias demandadas por visitantes quienes desean encontrar en el estilo “típico”, el prototipo paisa, reforzando así una tradición y alimentando un ideal de pertenencia y otra no menos importante corresponde a lugares que ofrecen la belleza de la naturaleza.

Se observa la predilección tanto por los espacios construidos como por los hitos naturales, como referentes construidos se tienen placas polideportivas, escuelas, miradores, tiendas, estaderos, iglesias, el Liceo, el parque central y como hitos naturales que para los jóvenes han contribuido a construir la historia de la región y han sido testigos de los cambios de la zona, se ubican sitios de interés como: Chorro Clarín, La Laguna de Guarne, Charco Hondo, los miradores, Charco Azul y los bosques nativos; igualmente en las veredas algunos referentes particulares son:

- El Mirador del Plan, un atractivo turístico de carácter escénico paisajístico por la visual sobre la ciudad que en términos locales convoca a la población joven tanto por este hecho como por

ser escenario de encuentro de los grupos, el cual utilizan para sus paseos y otras actividades lúdicas.

- En Media Luna la escuela es el epicentro, cumple las funciones educativas propias y también de convocatoria para los asuntos sociales de la vereda, igualmente se reconoce la importancia para la población de figuras como la Capilla y el estadero El Pingüino.
- En la vereda el Plan, la centralidad está configurada por una escuela, un parque recreativo pequeño, un salón comunal y una tienda tradicional denominada El Chispero; la cual aparte de la actividad tradicional de venta de comestibles, legumbres y el billar, es centro de diversiones. A este epicentro llega gente de otras veredas que hacen de este un lugar de rumba, lo cual aumenta en los días de la Feria de las Flores y en las festividades navideñas.
- Santa Elena Central es el punto focal del corregimiento, es una centralidad geográfica y social resultado de la acumulación de sedes fundamentalmente a lo largo del eje formado por la vía Medellín – Rionegro; punto de referencia y encuentro con una apropiación total por parte de la comunidad y un uso intenso del espacio.

#### 3.2.9.6.3 Acceso Oriental

El elemento de composición de esta zona va desde el portal oriental del túnel, localizado arriba del estanquillo de Sajonia, hasta la glorieta del aeropuerto. Entre estos dos puntos se han establecido varios asentamientos destinados al uso residencial, recreacional y comercial, reflejando con sus edificaciones su nivel socioeconómico, en el cual predominan los estratos medio y alto.

Los elementos de composición más reconocibles son:

- Zonas verdes: La cobertura vegetal responde a un diseño que ayuda a conformar diferentes ambientes escénicos y paisajísticos; en algunos casos, y gracias a la cobertura vegetal existente en el lindero hacia la vía, se puede deducir el tipo de relaciones sociales de sus residentes. Sobresalen algunos predios por el aislamiento visual que logran con el bambú y otros tipos de coberturas; también existen los que delimitan sus propiedades con diversas especies arbóreas con una mayor permeabilidad visual.
- Obras civiles: la vía a Medellín.-.Santa Elena, la glorieta Sajonia -variante Las Palmas, la glorieta del aeropuerto y el aeropuerto José María Córdova
- Ríos y quebradas: La quebrada Sajonia
- Relieve topográfico: Sobresale el alto Cerro Verde donde se encuentran las instalaciones de radar y microondas de la AEROCIVIL.
- Otro referente: estanquillo de Sajonia