Proyectos amigables de ingeniería SAS

Taborda Velez & Cia.

Proyecto Hidroeléctrico COCORNÁ III

Río Cocorná, Antioquia

Estudio de Impacto Ambiental

Capítulo 5

Caracterización del Área de Influencia

Medio Abiótico Parte 2

Diciembre de 2020

Calle 33 A # 71 - 83, Medellín • Tel: (57) (4) 448 47 50
Info@praming.com.co • www.praming.com.co

TABLA DE CONTENIDO

LISTADO DE FIGURAS ii
LISTADO DE TABLAS xi
LISTADO DE FOTOS xviii
LISTADO DE ANEXOS xix
5 CARATERIZACIÓN DEL ÁREA DE INFLUENCIA 20
5.1 Medio Abiótico 20
5.1.1 Calidad del agua 20
5.1.1.1 Parámetros in situ 21
5.1.1.2 Parámetros fisicoquímicos y microbiológicos 25
5.1.1.3 Índices de Calidad del Agua (ICA) y Contaminación (ICO) 35
5.1.2 Usos del agua 38
5.1.2.1 Caracterización de los usos del agua 38
5.1.2.2 Vertimientos de aguas residuales 42
5.1.2.3 Usuarios potenciales 45
5.1.2.4 Conflictos actuales y potenciales 47
5.1.3 Atmósfera 48
5.1.3.1 Clima 48
5.1.3.2 Calidad del aire 111
5.1.3.3 Ruido ambiental 157
5.1.4 Hidrología 190
5.1.4.1 Localización del área de influencia del proyecto con respecto a la zonificación hidrográfica del Ideam 190
5.1.4.2 Caracterización morfométrica de las unidades de análisis hidrográficas 193
5.1.4.3 Descripción de los sistemas y patrones de drenaje 201
5.1.4.4 Evaluación de series hidrológicas 204
5.1.4.5 Balance hídrico de largo plazo 215
5.1.4.6 Transferencia del caudal medio diario de una estación de referencia 224
5.1.4.7 Caudales máximos para diferentes períodos de retorno 228
5.1.4.8 Caudal ambiental 268
5.1.4.9 Dinámica fluvial del río Cocorná 290
BIBLIOGRAFÍA 402

LISTADO DE FIGURAS

Figura 5-1. Ubicación de los puntos de monitoreos de calidad del agua 20
Figura 5-2. Comportamiento del pH 23
Figura 5-3. Comportamiento de Temperatura (izquierda), Oxígeno Disuelto y Porcentaje de Saturación de Oxígeno (derecha) 24
Figura 5-4. Comportamiento de Turbiedad, Sólidos Disueltos Totales y Suspendidos Totales 33
Figura 5-5. Comportamiento de DQO y DBO 34
Figura 5-6. Comportamiento de Coliformes Totales y Fecales 35
Figura 5-7.Concesiones registradas en la Cuenca del río Cocorná 39
Figura 5-8. Vertimientos registrados en la Cuenca del río Cocorná 43
Figura 5-9. Vertimientos autorizados en el tramo de caudal reducido del Proyecto . 44
Figura 5-10. Ubicación de las estaciones del IDEAM solicitadas 48
Figura 5-11. Estaciones con registros de nubosidad en la zona de estudio 50
Figura 5-12. Diagramas de masa simple (con meses faltantes) para cada una de las estaciones con registro nubosidad 52
Figura 5-13. Diagramas de masa simple (sin meses faltantes) para cada una de las estaciones con registro de nubosidad 53
Figura 5-14. Diagramas de caja y bigotes para los registros de nubosidad en las estaciones **a)** Mesopotamia, **b)** El Peñol, **c)** San Francisco y **d)** San Carlos 55
Figura 5-15. Nubosidad mínima, media y máxima de las estaciones **a)** Mesopotamia, **b)** El Peñol, **c)** San Francisco y **d)** San Carlos 56
Figura 5-16. Estaciones de con registros de humedad relativa en la zona de estudio. 58
Figura 5-17. Diagramas de masa simple para cada una de las estaciones con registro de humedad relativa 61
Figura 5-18. Diagrama de cajas y bigotes para registros diarios de humedad relativa (%) en las estaciones a) Mesopotamia, b) El Peñol, c) San Francisco y d) San Carlos 63
Figura 5-19. Diagrama de cajas y bigotes para registros mensuales de humedad relativa (%) en las estaciones a) Mesopotamia, b) El Peñol, c) San Francisco y d) San Carlos 64
Figura 5-20. Ciclos anuales de valores medios (verdes), máximos (azules) y mínimos de humedad relativa (%), en las estaciones a) Mesopotamia, b) El Peñol, c) San Francisco y d) San Carlos 66
Figura 5-21. Ubicación estaciones de temperatura en la zona de estudio 67
Figura 5-22. Diagramas de masa simple para cada una de las estaciones con registro de temperatura (°C) 70
Figura 5-23. Diagrama de cajas y bigotes para los registros medios diarios de temperatura (°C) en las estaciones a) Mesopotamia, b) El Peñol, c) San Francisco y d) San Carlos 72
Figura 5-24. Diagrama de cajas y bigotes para los registros medios mensuales de temperatura (°C) en las estaciones a) Mesopotamia, b) El Peñol, c) San Francisco y d) San Carlos 73

Figura 5-25. Valores mínimos (rojos), medios (verdes) y máximos de temperatura en las estaciones **a)** Mesopotamia, **b)** El Peñol, **c)** San Francisco y **d)** San Carlos.....74
Figura 5-26. Distribución espacial de la temperatura diaria promedio anual multianual en la Cuenca del Río Cocorná 75
Figura 5-27. Distribución espacial de la presión atmosférica promedio anual (hPa) en la Cuenca del Río Cocorná 77
Figura 5-28. Ubicación estaciones de evaporación en la zona de estudio.....79
Figura 5-29. Diagrama de cajas y bigotes para los registros acumulados diarios de evaporación (mm) en las estaciones a) Mesopotamia, b) Argelia y c) San Carlos...83
Figura 5-30. Diagrama de cajas y bigotes para los registros acumulados mensuales de evaporación (mm) en las estaciones a) Mesopotamia, b) Argelia y c) San Carlos 84
Figura 5-31. Valores mínimos (rojos), medios (verdes) y máximos (azules) de evaporación acumulada mensual (mm/mes) en las estaciones a) Mesopotamia, b) Argelia y c) San Carlos.....86
Figura 5-32. Ubicación estaciones de precipitación en la zona de estudio 87
Figura 5-33. Diagrama de cajas y bigotes para los registros acumulados diarios de precipitación (mm) en cada una las estaciones disponibles 94
Figura 5-34. Diagrama de cajas y bigotes para los registros acumulados diarios de Precipitación (mm) en las estaciones sobre y cercanas a la Cuenca del Río Cocorná: a) Tafetanes, b) Campo Alegre, c) El Santuario, d) La Linda y e) Cocorná. 96
Figura 5-35. Diagrama de cajas y bigotes para los registros acumulados mensuales de Precipitación (mm) en las estaciones sobre y cercanas a la Cuenca del Río Cocorná: a) Tafetanes, b) Campo Alegre, c) El Santuario, d) La Linda y e) Cocorná. 98
Figura 5-36. Precipitación acumulada mensual promedio multianual en las estaciones usadas para el análisis de esta variable. 99
Figura 5-37. Precipitación mínima acumulada mensual multianual en las estaciones usadas para el análisis de esta variable. 100
Figura 5-38. Precipitación máxima acumulada mensual multianual en las estaciones usadas para el análisis de esta variable. 101
Figura 5-39. Distribución espacial de la precipitación en la Cuenca del Río Cocorná 103
Figura 5-40. Distribución espacial de la precipitación anual acumulada promedio multianual en la Cuenca del Río Cocorná 104
Figura 5-41. Distribución espacial de la radiación solar diaria incidente en la Cuenca del Río Cocorná, promedio anual multianual.....105
Figura 5-42. Ubicación estación Aeropuerto José M. Córdoba respecto a la Cuenca del Río Cocorná 106
Figura 5-43. Rosa de vientos de la estación Aeropuerto J. M. Córdoba, para el periodo de análisis 1981-2010 107
Figura 5-44. Velocidad del viento a escala regional.....108
Figura 5-45. Dirección del viento a escala regional 109
Figura 5-46. Diagramas precipitación vs temperatura en las estaciones: a) Mesopotamia, b) El Peñol, c) San Francisco y d) San Carlos.....110
Figura 5-47. Puntos seleccionados para monitoreo de calidad del aire 121

Figura 5-48. Velocidad del viento durante el monitoreo 2018 130
Figura 5-49. Velocidad del viento durante el monitoreo 2020 130
Figura 5-50 Rosa de viento diurna, Monitoreo 2018 132
Figura 5-51 Rosa de viento nocturna, Monitoreo 2018 132
Figura 5-52. Rosa de viento total, Monitoreo 2018 132
Figura 5-53 Rosa de viento diurna, Monitoreo 2020 133
Figura 5-54 Rosa de viento nocturna, Monitoreo 2020 133
Figura 5-55. Rosa de viento total, Monitoreo 2020 134
Figura 5-56. Temperatura ambiente en Monitoreo 2018 135
Figura 5-57. Temperatura ambiente en Monitoreo 2020 135
Figura 5-58. Temperatura promedio diaria, Monitoreo 2018 136
Figura 5-59 Temperatura promedio multihoraria, Monitoreo 2018 137
Figura 5-60. Temperatura promedio diaria, Monitoreo 2020 137
Figura 5-61. Temperatura promedio multihoraria, Monitoreo 2020 138
Figura 5-62. Precipitación acumulada diaria, monitoreo 2018 139
Figura 5-63. Precipitación acumulada diaria, monitoreo 2020 139
Figura 5-64. Datos de calidad del aire para PM10 144
Figura 5-65. Diagrama de caja y bigotes para PM10 145
Figura 5-66. Datos de calidad del aire para PM2.5 146
Figura 5-67. Diagrama de caja y bigotes para PM2.5 147
Figura 5-68. Datos de calidad del aire para NO_2 148
Figura 5-69 Diagrama de cajas para NO_2 149
Figura 5-70. Datos de calidad del aire para SO_2 150
Figura 5-71. Diagrama de cajas para SO_2 151
Figura 5-72 Registro horario CO 152
Figura 5-73 Registro Octohorario CO 152
Figura 5-74 Registro día a día O3 respecto a la norma octohoraria 153
Figura 5-75. Índices de Calidad del Aire Monitoreo 2018 155
Figura 5-76. Índices de Calidad del Aire Monitoreo 2020 156
Figura 5-77. Puntos de monitoreo de ruido ambiental 169
Figura 5-78. Resultados de ruido ambiental jornada diurna día dominical y ordinario, monitoreo 2018 183
Figura 5-79. Resultados de ruido ambiental jornada diurna día dominical y ordinario, monitoreo 2020 184
Figura 5-80. Resultados de ruido ambiental jornada nocturna día dominical y ordinario, monitoreo 2018 184
Figura 5-81. Resultados de ruido ambiental jornada nocturna día dominical y ordinario, monitoreo 2020 185
Figura 5-82. Interpolación de ruido ambiental, Monitoreo 2018 - jornada diurna ordinaria 186
Figura 5-83. Interpolación de ruido ambiental, Monitoreo 2018 - jornada nocturna ordinaria 186
Figura 5-84. Interpolación de ruido ambiental, Monitoreo 2018 - jornada diurna dominical 187
Figura 5-85. Interpolación de ruido ambiental, Monitoreo 2018 - jornada nocturna dominical 187

Figura 5-86. Interpolación de ruido ambiental, Monitoreo 2020 - jornada diurna ordinaria 188
Figura 5-87. Interpolación de ruido ambiental, Monitoreo 2020 - jornada nocturna ordinaria 188
Figura 5-88. Interpolación de ruido ambiental, Monitoreo 2020 - jornada diurna dominical 189
Figura 5-89. Interpolación de ruido ambiental, Monitoreo 2020 - jornada nocturna dominical 189
Figura 5-90. Zonificación hidrográfica área de estudio 191
Figura 5-91. Principales Subucuencas de la Cuenca del Río Cocorná 192
Figura 5-92. Ubicación de la Cuenca del Río Cocorná con respecto a la Cuenca del Río Samaná Norte 193
Figura 5-93. DEM satélite Alos Palsar I de las agencias espaciales NASA y JAXA. Resolución de 12,5 m 194
Figura 5-94. Curva hipsométrica de la Cuenca del río Cocorná 198
Figura 5-95. Perfil longitudinal del río Cocorná 201
Figura 5-96. Patrón de drenaje de la Cuenca del Río Cocorná 203
Figura 5-97. Estaciones hidrológicas del Ideam usadas en el estudio 207
Figura 5-98. Análisis de masa simple estación Pailania 208
Figura 5-99. Análisis de masa simple estación La Garrucha 208
Figura 5-100. Caudal medio mensual multianual de la estación Pailania (1974-2016) 211
Figura 5-101. Caudal medio mensual multianual de la estación La Garrucha (1974-2016) 213
Figura 5-102. Distribución espacial de la precipitación en la Cuenca del Río Cocorná 216
Figura 5-103. Evapotranspiración potencial en la Cuenca del Río Cocorná. Método de Cenicafé 219
Figura 5-104. Evapotranspiración Real en la Cuenca del Río Cocorná. Método de Budyko 220
Figura 5-105. Evapotranspiración real en la Cuenca del Río Cocorná. Método del Factor Regional 221
Figura 5-106. Curva de Duración de Caudales en el sitio de captación del proyecto 228
Figura 5-107. Cuencas de captación y casa de máquinas proyecto Cocorná III 231
Figura 5-108. Subcuencas intervenidas por las obras del proyecto 232
Figura 5-109. Mapa de coberturas de las cuencas de interés 235
Figura 5-110. Tiempo de concentración en captación por diferentes métodos 241
Figura 5-111. Tiempo de concentración en casa de máquinas por diferentes métodos 241
Figura 5-112. Tiempo de concentración para Subcuenca Q. Sin nombre 2 según diferentes autores 242
Figura 5-113. Tiempo de concentración para Subcuenca Q. Sin nombre 3 según diferentes autores 242
Figura 5-114. Tiempo de concentración para Subcuenca Q. Sin nombre 4 según diferentes autores 243

Figura 5-115. Tiempo de concentración para Subcuenca Q. Sin nombre 5 según diferentes autores 243
Figura 5-116. Tiempo de concentración para Subcuenca Q. Sin nombre 6 según diferentes autores 244
Figura 5-117. Tiempo de concentración para Subcuenca Q. Sin nombre 7 según diferentes autores 244
Figura 5-118. Tiempo de concentración final para las subcuencas en estudio 245
Figura 5-119. Localización de las estaciones de precipitación utilizadas para la realización de las curvas IDF 246
Figura 5-120. Curva Intensidad – Duración – Frecuencia (IDF). Captación Cocorná 3 250
Figura 5-121. Curva Intensidad – Duración – Frecuencia (IDF). Casa de máquinas Cocorná 3 251
Figura 5-122. Caudales máximos para diferentes períodos de retorno. Captación 260
Figura 5-123. Caudales máximos para diferentes períodos de retorno. Casa Máquinas 260
Figura 5-124. Variación del caudal máximo según el periodo de retorno para las subcuencas de interés 267
Figura 5-125. Curva de Duración de Caudales Mensuales. Condición Hidrológica de Año Medio 269
Figura 5-126. Curva de Duración de Caudales Mensuales. Condición Hidrológica Fenómeno de El Niño, fase “Neutra” 271
Figura 5-127. Curva de Duración de Caudales Mensuales. Condición Hidrológica Fenómeno de El Niño, fase “Niña” 273
Figura 5-128. Curva de Duración de Caudales Mensuales. Condición Hidrológica Fenómeno de El Niño, fase “Niño” 275
Figura 5-129. Caudal Medio para diferentes condiciones hidrológicas, m^3/s 276
Figura 5-130. Q95% para diferentes condiciones hidrológicas, m^3/s 277
Figura 5-131. Principales afluentes del tramo con caudal reducido 279
Figura 5-132. Ciclo anual de caudales medios, ecológicos naturales y ambiental para el tramo a intervenir por el proyecto 288
Figura 5-133. Caudal Aprovechable para el proyecto 289
Figura 5-134 Clasificación de una corriente de agua según la pendiente de fondo, la sección transversal y el alineamiento horizontal. Tomado de (Rosgen & Silvey, 1996) 292
Figura 5-135 Planta (arriba) y perfil (abajo) del río Cocorná en el tramo afectado por el Proyecto Hidroeléctrico Cocorná III. 293
Figura 5-136. Perfil longitudinal del río Cocorná desde su nacimiento hasta su desembocadura al río Calderas 293
Figura 5-137 Tipo de cauces y valles asociados a las diferentes formas del terreno. 295
Figura 5-138 Valle tipo I (Rosgen). 296
Figura 5-139. Sección transversal k0+110. Tramo Captación 299
Figura 5-140. Sección transversal k0+120. Tramo Captación 300
Figura 5-141. Sección transversal k0+110. Tramo medio superior 300
Figura 5-142. Sección transversal k0+100. Tramo medio superior 301

Figura 5-143. Sección transversal k0+070. Tramo medio inferior 301
Figura 5-144. Sección transversal k0+80. Tramo medio inferior 302
Figura 5-145. Sección transversal k0+130. Tramo Descarga 302
Figura 5-146. Sección transversal k0+140. Tramo Descarga 303
Figura 5-147. Resumen de los parámetros de la clasificación Nivel II de Rosgen . 304
Figura 5-148. Caudales medios diarios en el sitio de aprovechamiento de la PCH Cocorná III. 305
Figura 5-149. Curva de duración de caudales en el sitio de aprovechamiento de la PCH Cocorná III 306
Figura 5-150. Caudales medios diarios remanentes en el río Cocorná, en el sitio de aprovechamiento de la PCH. 307
Figura 5-151. Caudales medios diarios turbinados en el sitio de aprovechamiento de la PCH Cocorná III. 307
Figura 5-152. Curva de duración de caudales en el sitio de aprovechamiento de la PCH Cocorná III. 308
Figura-5-153 Esquema del tramo de estudio del río Cocorná 312
Figura 5-154. Perfil longitudinal del río Cocorná en el sector de captación, para caudales de diferentes períodos de retorno. Escenario sin proyecto 313
Figura 5-155. Perfil longitudinal del río Cocorná en el sector de captación, para caudales de diferentes períodos de retorno. Escenario con proyecto 314
Figura-5-156 Sección K4+100.00 para un periodo de retorno de 100 años, escenario con proyecto 315
Figura-5-157 Sección K4+171.31 Culv U para un periodo de retorno de 100 años, escenario con proyecto. 315
Figura-5-158 Sección K4+200.00 para un periodo de retorno de 100 años, escenario con proyecto 316
Figura 5-159. Esquema del tramo medio 1 ubicado 700 m aguas abajo de la zona de captación. 321
Figura 5-160. Perfil longitudinal del tramo medio 1 para un periodo de retorno de 100 años, escenario sin proyecto 321
Figura 5-161. Mancha de inundación del tramo medio 1 para un periodo de retorno de 100 años, escenario sin proyecto 322
Figura 5-162. Mapa de velocidades del tramo medio 1 para un periodo de retorno de 100 años, escenario sin proyecto 322
Figura 5-163. Mapa de profundidades del tramo medio 1 para un periodo de retorno de 100 años, escenario sin proyecto 323
Figura1-5-164. Sección K0+110 para un periodo de retorno de 100 años, escenario sin proyecto 323
Figura5-165. Sección K0+100 para un periodo de retorno de 100 años, escenario sin proyecto 324
Figura5-166. Mancha de inundación tramo medio 1 con la proyección de las obras. Tr=100 años 324
Figura 5-167. Esquema del tramo medio 2 ubicado 1900 m aguas abajo de la zona de captación 325
Figura 5-168. Perfil longitudinal del tramo medio 2 para un periodo de retorno de 100 años, escenario sin proyecto 326

Figura 5-169. Mancha de inundación del tramo medio 2 para un periodo de retorno de 100 años, escenario sin proyecto 326
Figura 5-170. Mapa de velocidades del tramo medio 2 para un periodo de retorno de 100 años, escenario sin proyecto 327
Figura 5-171. Mapa de profundidades del tramo medio 2 para un periodo de retorno de 100 años, escenario sin proyecto 327
Figura1-5-172. Sección K0+150 para un periodo de retorno de 100 años, escenario sin proyecto 328
Figura5-173. Sección K0+140 para un periodo de retorno de 100 años, escenario sin proyecto 328
Figura5-174. Mancha de inundación tramo medio 2 con la proyección de las obras. Tr=100 años 329
Figura 5-175. Esquema del subtramo de estudio en la zona de casa de máquinas 329
Figura 5-176.Mancha de inundación en la zona de casa de máquinas para un periodo de retorno de 100 años, escenario sin proyecto 330
Figura 5-177.Mapa de velocidades en la zona de casa de máquinas para un periodo de retorno de 100 años, escenario sin proyecto 330
Figura 5-178.Mapa de profundidades en la zona de casa de máquinas para un periodo de retorno de 100 años, escenario sin proyecto 331
Figura 5-179. Sección K0+180 para un periodo de retorno de 100 años, escenario sin proyecto 331
Figura 5-180. Sección K0+170 para un periodo de retorno de 100 años, escenario sin proyecto 332
Figura 5-181 Mapa de los charcos ubicados en el tramo con caudal reducido. 334
Figura 5-182.Charco del Diablo 335
Figura 5-183.Perfil longitudinal del río Cocorná en el tramo de ubicación del charco del Diablo. Mes de agosto 339
Figura 5-184. Sección transversal 170. Inicio del charco del Diablo. Mes de agosto 339
Figura 5-185.Mancha de inundación charco del Diablo para los caudales medios en operación (Qr) y en condiciones naturales (Qm) 342
Figura 5-186.Mapa de profundidades charco del Diablo con el caudal medio del río para el mes de agosto 343
Figura 5-187. Mapa de profundidades charco del Diablo con el caudal medio del río en operación para el mes de agosto 343
Figura 5-188. Mancha de inundación charco del Diablo para el caudal ecológico natural (Q95%) vs el caudal ambiental en operación (Qamb) del mes de agosto .. 344
Figura 5-189. Mapa de profundidades charco del Diablo con el caudal ecológico natural del río (Q95%) para el mes de agosto 345
Figura 5-190. Mapa de profundidades charco del Diablo con el caudal ambiental en operación (Qamb) para el mes de agosto 345
Figura 5-191.Perfil longitudinal del río Cocorná en el tramo de ubicación del charco del Diablo. Mes de mayo 348
Figura 5-192. Sección transversal 170. Inicio del charco del Diablo. Mes de mayo 348

Figura 5-193.Mancha de inundación charco del Diablo para los caudales medios en operación (Qr) y en condiciones naturales (Qm) 351
Figura 5-194.Mapa de profundidades charco del Diablo con el caudal medio del río para el mes de mayo 352
Figura 5-195. Mapa de profundidades charco del Diablo con el caudal medio del río en operación para el mes de mayo 352
Figura 5-196. Mancha de inundación charco del Diablo para el caudal ecológico natural (Q95%) vs el caudal ambiental en operación (Qamb) del mes de mayo 353
Figura 5-197. Mapa de profundidades charco del Diablo con el caudal ecológico natural del río (Q95%) para el mes de mayo 354
Figura 5-198. Mapa de profundidades charco del Diablo con el caudal ambiental en operación (Qamb) para el mes de mayo 354
Figura 5-199.Charco El Toro 355
Figura 5-200.Perfil longitudinal del río Cocorná en el tramo de ubicación del charco El Toro. Mes de agosto 357
Figura 5-201. Sección transversal 170. Inicio del charco El Toro. Mes de agosto . 358
Figura 5-202.Mancha de inundación charco El Toro para los caudales medios en operación (Qr) y en condiciones naturales (Qm) 360
Figura 5-203.Mapa de profundidades charco El Toro con el caudal medio del río para el mes de agosto 361
Figura 5-204. Mapa de profundidades charco El Toro con el caudal medio del río en operación para el mes de agosto 361
Figura 5-205. Mancha de inundación charco El Toro para el caudal ecológico natural (Q95%) vs el caudal ambiental en operación (Qamb) del mes de agosto 362
Figura 5-206. Mapa de profundidades charco El Toro con el caudal ecológico natural del río (Q95%) para el mes de agosto 363
Figura 5-207. Mapa de profundidades charco El Toro con el caudal ambiental en operación (Qamb) para el mes de agosto 363
Figura 5-208.Perfil longitudinal del río Cocorná en el tramo de ubicación del charco El Toro. Mes de mayo 365
Figura 5-209. Sección transversal 170. Inicio del charco El Toro. Mes de mayo ... 366
Figura 5-210.Mancha de inundación charco El Toro para los caudales medios en operación (Qr) y en condiciones naturales (Qm) 368
Figura 5-211.Mapa de profundidades El Toro con el caudal medio del río para el mes de mayo 369
Figura 5-212. Mapa de profundidades charco El Toro con el caudal medio del río en operación para el mes de mayo 369
Figura 5-213. Mancha de inundación charco El Toro para el caudal ecológico natural (Q95%) vs el caudal ambiental en operación (Qamb) del mes de mayo 370
Figura 5-214. Mapa de profundidades charco El Toro con el caudal ecológico natural del río (Q95%) para el mes de mayo 371
Figura 5-215. Mapa de profundidades charco El Toro con el caudal ambiental en operación (Qamb) para el mes de mayo 371
Figura 5-216.Charco Sin Nombre (CH11) 372
Figura 5-217.Perfil longitudinal del río Cocorná en el tramo de ubicación del charco CH11. Mes de agosto 374

Figura 5-218. Sección transversal 170. Inicio del charco CH11. Mes de agosto....375
Figura 5-219.Mancha de inundación charco CH11 para los caudales medios en operación (Qr) y en condiciones naturales (Qm) 377
Figura 5-220.Mapa de profundidades charco CH11 con el caudal medio del río para el mes de agosto....377
Figura 5-221. Mapa de profundidades charco CH11 con el caudal medio del río en operación para el mes de agosto 378
Figura 5-222. Mancha de inundación charco CH11 para el caudal ecológico natural (Q95%) vs el caudal ambiental en operación (Qamb) del mes de agosto....379
Figura 5-223. Mapa de profundidades charco CH11 con el caudal ecológico natural del río (Q95%) para el mes de agosto....379
Figura 5-224. Mapa de profundidades charco El Toro con el caudal ambiental en operación (Qamb) para el mes de agosto 380
Figura 5-225.Perfil longitudinal del río Cocorná en el tramo de ubicación del charco CH11. Mes de mayo....382
Figura 5-226. Sección transversal 170. Inicio del charco CH11. Mes de mayo....382
Figura 5-227.Mancha de inundación charco CH11 para los caudales medios en operación (Qr) y en condiciones naturales (Qm) 384
Figura 5-228.Mapa de profundidades charco CH11 con el caudal medio del río para el mes de mayo....385
Figura 5-229. Mapa de profundidades charco CH11 con el caudal medio del río en operación para el mes de mayo 385
Figura 5-230. Mancha de inundación charco CH11 para el caudal ecológico natural (Q95%) vs el caudal ambiental en operación (Qamb) del mes de mayo....386
Figura 5-231. Mapa de profundidades charco CH11 con el caudal ecológico natural del río (Q95%) para el mes de mayo....387
Figura 5-232. Mapa de profundidades charco CH11 con el caudal ambiental en operación (Qamb) para el mes de mayo 387
Figura 5-233. Erosión, transporte y depositación de sedimentos en cuencas de montaña....388
Figura 5-234. Capa de erosividad (R) en el área tributaria a la captación del proyecto 390
Figura 5-235. Capa de erodabilidad (K) en el área tributaria a la captación del proyecto 392
Figura 5-236. Capa del factor topográfico (LS) en el área tributaria a la captación del proyecto 394
Figura 5-237. Capa factor coberturas (C) en el área tributaria a la captación del proyecto 397
Figura 5-238. Capa factor coberturas (P) en el área tributaria a la captación del proyecto 398
Figura 5-239. Pérdida de suelo (toneladas/ha/año) en el área tributaria a la captación del proyecto....400

LISTADO DE TABLAS

Tabla 5-1. Puntos de monitoreo de calidad del agua en el Río Cocorná 21
Tabla 5-2. Parámetros medidos in situ 23
Tabla 5-3. Parámetros fisicoquímicos y microbiológicos..... 26
Tabla 5-4. Valores del índice de calidad del agua (ICA) 36
Tabla 5-5. Valores del índice de contaminación por sólidos suspendidos (ICOSUS) 37
Tabla 5-6. Valores del índice de contaminación por mineralización (ICOMI) 37
Tabla 5-7. Valores del índice de contaminación por materia orgánica (ICOMO)..... 37
Tabla 5-8. Valores del índice de contaminación trófica (ICOTRO)..... 38
Tabla 5-9. Usos del agua en la Cuenca del río Cocorná 39
Tabla 5-10. Clasificación del IRCA e implicaciones en el suministro del recurso hídrico 41
Tabla 5-11. IRCA de los acueductos veredales en el área de influencia del Proyecto 42
Tabla 5-12. Índice de riesgo de la calidad del agua para el consumo humano (IRCA) de los acueductos municipales de los municipios de Cocorná y Granada 42
Tabla 5-13. Tipos de vertimiento en el Cuenca del río Cocorná 43
Tabla 5-14. Proyección de la población de las veredas dentro del área de influencia del medio socioeconómico. 45
Tabla 5-15. Crecimiento anual proyectado por sector económico en la cuenca del Río Samaná Norte 46
Tabla 5-16. Características de las estaciones del IDEAM solicitadas 48
Tabla 5-17 Longitud de las series de humedad relativa por estación 58
Tabla 5-18 Datos faltantes en serie de registros diarios de humedad relativa para las estaciones Mesopotamia, El Peñol, San Francisco y San Carlos 59
Tabla 5-19. Longitud de las series de temperatura por estación..... 67
Tabla 5-20 Datos faltantes en serie de registros diarios de temperatura para las estaciones Mesopotamia, El Peñol, San Francisco y San Carlos 68
Tabla 5-21. Ecuaciones para determinar la presión media mensual en la superficie respecto a la altitud en la Región Andina (Zona IV)..... 76
Tabla 5-22. Estadísticos para los promedios espacial de presión atmosférica estimada para la Cuenca del Río Cocorná 78
Tabla 5-23. Longitud de las series de evaporación por estación 79
Tabla 5-24. Datos faltantes en serie de registros diarios de evaporación para las estaciones Mesopotamia, Argelia y San Carlos..... 80
Tabla 5-25. Longitud de las series de precipitación por estación..... 88
Tabla 5-26. Datos faltantes en serie de registros diarios de precipitación para cada una de las estaciones de análisis 90
Tabla 5-27. Datos faltantes en serie de registros diarios de precipitación para cada una de las estaciones de análisis, continuación 92
Tabla 5-28 Límites máximos permitidos para parámetros de calidad de aire en diferentes tiempos de medición para los parámetros evaluados..... 111
Tabla 5-29. Índice de Calidad del Aire, ICA..... 112
Tabla 5-30 Puntos de corte del ICA..... 113

Tabla 5-31.Fecha y Hora de monitoreo. 117
Tabla 5-32 Equipos empleados en el monitoreo de calidad de aire 118
Tabla 5-33. Descripción del entorno y las fuentes de emisión Estación 1 121
Tabla 5-34. Descripción del entorno y las fuentes de emisión Estación 2 122
Tabla 5-35. Descripción del entorno y las fuentes de emisión Estación 3 124
Tabla 5-36. Descripción del entorno y las fuentes de emisión Estación 4 125
Tabla 5-37 Resumen variables meteorológicas, valores diarios 128
Tabla 5-38. Escala de Beaufort. 130
Tabla 5-39. Concentraciones de contaminantes en la Estación 1: El Diamante 140
Tabla 5-40. Concentraciones de contaminantes en la Estación 2: Las Arenosas .. 140
Tabla 5-41. Concentraciones de contaminantes en la Estación 3: Zona de Captación 141
Tabla 5-42. Estadísticos de contaminantes en la Estación 1: El Diamante 142
Tabla 5-43. Estadísticos de contaminantes en la Estación 2: Las Arenosas 142
Tabla 5-44. Estadísticos de contaminantes en la Estación 3: Zona de Captación . 143
Tabla 5-45. Índices de Calidad del Aire Monitoreo 2018 154
Tabla 5-46. Índices de Calidad del Aire Monitoreo 2020 154
Tabla 5-47. Estándares máximos permisibles de niveles de ruido ambiental expresados en decibeles ponderados A dB(A) 158
Tabla 5-48. Especificaciones de Campo 160
Tabla 5-49. Información general de los puntos de muestreo – Día Ordinario Jornada diurna y nocturna 166
Tabla 5-50.Información general de los puntos de muestreo – Día Dominical Jornada diurna y nocturna 166
Tabla 5-51. Información técnica de los Equipos de campo 167
Tabla 5-52. Ubicación geográfica de los puntos de muestreo 169
Tabla 5-53. Descripción de los puntos de medición 170
Tabla 5-54 Registro fotográfico de los puntos de monitoreo 171
Tabla 5-55. Datos meteorológicos monitoreo día ordinario en jornadas diurna y nocturna 177
Tabla 5-56.Datos meteorológicos monitoreo del día dominical en jornadas diurna y nocturna. 177
Tabla 5-57. Resultados y ajustes K mediciones de ruido ambiental 178
Tabla 5-58. Incertidumbre de ruido ambiental día ordinario y dominical en jornada diurna y nocturna 181
Tabla 5-59.Comparación niveles de ruido ambiental día ordinario con la normatividad 182
Tabla 5-60.Comparación de niveles de ruido ambiental día dominical con la normatividad 183
Tabla 5-61. Rangos de clasificación del Coeficiente de Compacidad de Gravelius (Kc) 195
Tabla 5-62. Rango de pendientes por área 196
Tabla 5-63. Tipo de canal según el índice de sinuosidad 197
Tabla 5-64. Distribución de áreas por elevación 198
Tabla 5-65. Características morfométricas de la Cuenca del Río Cocorná 199
Tabla 5-66. Orden de las corrientes en la Cuenca del Río Cocorná 201

Tabla 5-67. Principales características del sistema de drenaje. Cuenca del Río Cocorná 204
Tabla 5-68. Descripción de las estaciones Pailania y La Garrucha. 205
Tabla 5-69. Porcentaje de datos faltantes por año de las series de caudal analizadas 205
Tabla 5-70. Datos de la estación Pailania 209
Tabla 5-71. Serie de caudales medios mensuales de la estación Pailania (1974-2016) 209
Tabla 5-72. Datos de la estación La Garrucha 211
Tabla 5-73. Serie de caudales medios mensuales de la estación La Garrucha (1974-2016) 212
Tabla 5-74. Prueba t de estabilidad en la media. Serie de caudales medios anuales. Estación La Garrucha 214
Tabla 5-75. Prueba t de estabilidad en la media. Serie de caudales medios anuales. Estación Pailania 214
Tabla 5-76. Prueba t de estabilidad en la media. Serie de caudales medios anuales. Estación La Garrucha ajustada (años 1983-2016) 215
Tabla 5-77. Datos del Balance Hídrico de Largo Plazo en las subcuencas de interés 218
Tabla 5-78. Resultados del Balance Hídrico de Largo Plazo 222
Tabla 5-79. Rendimiento hídrico (RH) en los puntos de interés para el proyecto, según los resultados obtenidos con el balance hídrico de largo plazo. 224
Tabla 5-80 Valores Característicos de la Curva de duración de Caudales. Estación La Garrucha 225
Tabla 5-81. Caudal medio en los sitios de interés para el proyecto Cocorná III según el método de transferencia de caudales 226
Tabla 5-82. Caudal medio por balance hídrico de largo plazo y transferencia de caudales 227
Tabla 5-83. Parámetros morfométricos de las cuencas de estudio utilizados en el análisis de caudales máximos 229
Tabla 5-84. Parámetros morfométricos de las subcuencas intervenidas por las obras del proyecto 230
Tabla 5-85. Número de curva según el tipo de cobertura considerando condición antecedente de humedad II y suelo hidrológico tipo C. Cuenca Captación 233
Tabla 5-86. Número de curva según el tipo de cobertura considerando condición antecedente de humedad II y suelo hidrológico tipo C. Cuenca Casa de Máquinas 233
Tabla 5-87. Número de curva según el tipo de cobertura considerando condición antecedente de humedad II y suelo hidrológico tipo C. Subcuenca Q. sin nombre 2 236
Tabla 5-88. Número de curva según el tipo de cobertura considerando condición antecedente de humedad II y suelo hidrológico tipo C. Subcuenca Q. sin nombre 3 236
Tabla 5-89. Número de curva según el tipo de cobertura considerando condición antecedente de humedad II y suelo hidrológico tipo C. Subcuenca Q. sin nombre 4 236

Tabla 5-90. Número de curva según el tipo de cobertura considerando condición antecedente de humedad II y suelo hidrológico tipo C. Subcuenca Q. sin nombre 5 236
Tabla 5-91. Número de curva según el tipo de cobertura considerando condición antecedente de humedad II y suelo hidrológico tipo C. Subcuenca Q. sin nombre 6 237
Tabla 5-92. Número de curva según el tipo de cobertura considerando condición antecedente de humedad II y suelo hidrológico tipo C. Subcuenca Q. sin nombre 7 237
Tabla 5-93. Tiempos de concentración por diferentes métodos para las cuencas en captación y casa de máquinas 238
Tabla 5-94. Análisis estadístico de los resultados obtenidos del tiempo de concentración en las cuencas en captación y casa de máquinas 238
Tabla 5-95. Tiempos de concentración por diferentes métodos para las subcuencas intervenidas por las obras del proyecto 239
Tabla 5-96. . Análisis estadístico de los resultados obtenidos del tiempo de concentración para las subcuencas intervenidas por el proyecto 240
Tabla 5-97. Series de precipitación máxima de 24 horas en las cuencas de captación y de casa de máquinas 247
Tabla 5-98. Factores de ponderación para estimar la precipitación máxima en 24 horas. Captación y Casa de máquinas 248
Tabla 5-99. Factores de ponderación para estimar la precipitación máxima en 24 horas. Subcuencas afectadas por el proyecto. 249
Tabla 5-100. Intensidad de precipitación para diferentes períodos de retorno. Captación y Casa de máquinas 250
Tabla 5-101. Intensidad de precipitación para diferentes períodos de retorno. Subcuencas intervenidas por las obras del proyecto 251
Tabla 5-102. Hietogramas de diseño para la cuenca en Captación para diferentes periodos de retorno discretizados a 5 minutos. 252
Tabla 5-103. Hietogramas de diseño para la cuenca en Casa de máquinas para diferentes periodos de retorno discretizados a 5 minutos. 253
Tabla 5-104. Parámetros necesarios para el cálculo de los caudales máximos mediante las metodologías de las hidrógrafas unitarias de Clark, Snyder y del SCS 259
Tabla 5-105. Caudales máximos para diferentes períodos de retorno. Captación 259
Tabla 5-106. Caudales máximos para diferentes períodos de retorno. Casa de máquinas 259
Tabla 5-107. Coeficientes de escorrentía obtenidos a través del CN para la subcuenca Q. Sin nombre 2 262
Tabla 5-108 Coeficientes de escorrentía obtenidos a través del CN para la subcuenca Q. Sin nombre 3 262
Tabla 5-109. Coeficientes de escorrentía obtenidos a través del CN para la subcuenca Q. Sin nombre 4 263
Tabla 5-110 Coeficientes de escorrentía obtenidos a través del CN para la subcuenca Q. Sin nombre 5 263

Tabla 5-111 Coeficientes de escorrentía obtenidos a través del CN para la subcuenca Q. Sin nombre 6 263
Tabla 5-112 Coeficientes de escorrentía obtenidos a través del CN para la subcuenca Q. Sin nombre 7 264
Tabla 5-113. Caudal máximo por el método racional en la subcuenca de la quebrada sin nombre 2 265
Tabla 5-114. Caudal máximo por el método racional en la subcuenca de la quebrada sin nombre 3 265
Tabla 5-115. Caudal máximo por el método racional en la subcuenca de la quebrada sin nombre 4 265
Tabla 5-116. Caudal máximo por el método racional en la subcuenca de la quebrada sin nombre 5 266
Tabla 5-117. Caudal máximo por el método racional en la subcuenca de la quebrada sin nombre 6 266
Tabla 5-118. Caudal máximo por el método racional en la subcuenca de la quebrada sin nombre 7 267
Tabla 5-119. Curva de Duración de Caudales Mensuales para Condición Hidrológica de Año Medio (m^3/s) 268
Tabla 5-120. Curva de Duración de Caudales Mensuales. Fenómeno de El Niño, condición climática “Neutra” (m^3/s) 270
Tabla 5-121. Curva de Duración de Caudales Mensuales. Fenómeno de El Niño, condición climática “Niña” 272
Tabla 5-122. Curva de Duración de Caudales Mensuales. Fenómeno de El Niño, condición climática “Niño” (m^3/s) 273
Tabla 5-123. Caudal Medio (Qm) para diferentes condiciones hidrológicas (m^3/s) 275
Tabla 5-124. Q95% para diferentes condiciones hidrológicas (m^3/s) 276
Tabla 5-125. Tributarios del río Cocorná en el tramo con caudal reducido 278
Tabla 5-126. Resultados de la Demanda Química de Oxígeno en los puntos de muestreo sobre el río Cocorná 280
Tabla 5-127. Índice de integridad biótica de peces. Noviembre de 2015 281
Tabla 5-128. Índice de integridad biótica de peces. Septiembre de 2018 281
Tabla 5-129. Resultados de la aplicación del índice BMWP, en los tramos de muestreo del río Cocorná 283
Tabla 5-130. Índice de Vegetación Riparia 283
Tabla 5-131. Diversidad del Perifiton 284
Tabla 5-132. Parámetros de calificación la variable: Importancia de la actividad turística y recreativa 285
Tabla 5-133. Calificación de variables para determinar el caudal de garantía ambiental (CGA) 286
Tabla 5-134. Caudales de Garantía Ambiental para el tramo afectado por el proyecto hidroeléctrico Cocorná III 287
Tabla 5-135. Caudal mensual Aprovechable (Qapr) para el proyecto 288
Tabla 5-136. Caudal del río Cocorná en diferentes puntos de interés en condiciones sin proyecto y con proyecto 290
Tabla 5-137. Resultados del análisis para la Clasificación de la corriente Nivel II . 298

Tabla 5-138. Reducción de caudales en el sitio aprovechamiento de la PCH Cocorná III en la fase de operación del proyecto 308
Tabla 5-139. Caudales en el tramo afectado por la PCH Cocorná III. 309
Tabla 5-140.Caudales máximos para diferentes periodos de retorno. 311
Tabla 5-141. Diferencia de cotas entre la condición actual y la condición con proyecto, para un Tr = 100 años 316
Tabla 5-142. Tiempos de viaje del caudal del río Cocorná requerido para desplazarse entre el azud y el canal de descarga de la PCH Cocorná III 320
Tabla 5-143. Áreas fluviales para aprovechamientos recreativos en el tramo con caudal reducido 333
Tabla 5-144. Caudales con proyecto y sin proyecto utilizados para la modelación de los charcos. 336
Tabla 5-145. Resultados de la modelación hidráulica en el tramo del charco del Diablo para el caudal medio (Qm) y mínimo natural (Q95%) sin operación y medio (Qr) y ambiental (Qamb) en operación, del mes de agosto (mes con caudal ambiental más bajo del año) 337
Tabla 5-146. Cambios en las características hidráulicas del charco por la operación del proyecto en el mes de agosto 340
Tabla 5-147. Resultados de la modelación hidráulica en el tramo del charco del Diablo para el caudal medio (Qm) y mínimo natural (Q95%) sin operación y medio (Qr) y ambiental (Qamb) en operación, del mes de mayo (mes con caudal ambiental más alto del año) 346
Tabla 5-148. Cambios en las características hidráulicas del charco por la operación del proyecto en el mes de mayo 349
Tabla 5-149. Resultados de la modelación hidráulica en el tramo del charco El Toro para el caudal medio (Qm) y mínimo natural (Q95%) sin operación y medio (Qr) y ambiental (Qamb) en operación, del mes de agosto (mes con caudal ambiental más bajo del año) 356
Tabla 5-150. Cambios en las características hidráulicas del charco por la operación del proyecto en el mes de agosto 359
Tabla 5-151. Resultados de la modelación hidráulica en el tramo del charco El Toro para el caudal medio (Qm) y mínimo natural (Q95%) sin operación y medio (Qr) y ambiental (Qamb) en operación, del mes de mayo (mes con caudal ambiental más alto del año) 364
Tabla 5-152. Cambios en las características hidráulicas del charco El Toro por la operación del proyecto en el mes de mayo 367
Tabla 5-153. Resultados de la modelación hidráulica en el tramo del charco sin nombre CH11 para el caudal medio (Qm) y mínimo natural (Q95%) sin operación y medio (Qr) y ambiental (Qamb) en operación, del mes de agosto (mes con caudal ambiental más bajo del año) 373
Tabla 5-154. Cambios en las características hidráulicas del charco CH11 por la operación del proyecto en el mes de agosto 376
Tabla 5-155. Resultados de la modelación hidráulica en el tramo del charco CH11 para el caudal medio (Qm) y mínimo natural (Q95%) sin operación y medio (Qr) y ambiental (Qamb) en operación, del mes de mayo (mes con caudal ambiental más alto del año) 380

Tabla 5-156. Cambios en las características hidráulicas del charco por la operación del proyecto en el mes de mayo 383
Tabla 5-157. Valores para el factor C y P en el modelo RUSLE 395
Tabla 5-158. Grado de erosión en función de la pérdida anual de suelo 399

LISTADO DE FOTOS

Foto 5-1. Estación meteorológica ubicada en la Estación 1: El Diamante 127
Foto 5-2. Estación meteorológica ubicada en la Estación 3: Zona de Captación...127
Foto 5-3. Cauce del río Cocorná en el tramo afectado por el Proyecto Hidroeléctrico Cocorná III. 294

LISTADO DE ANEXOS

Anexo 5.1.4.1. Clima

Anexo 5.1.4.2. Calidad del aire

Anexo 5.1.4.3. Ruido ambiental

Anexo 5.1.5. Calidad del agua

Anexo 5.1.6. Usos del agua

Anexo 5.1.7. Hidrología

Anexo 5.1.7.1. Series hidrológicas

Anexo 5.1.7.2. Resumen de caudales

Anexo 5.1.7.3. Dinámica fluvial

Anexo 13. GDB

5 CARATERIZACIÓN DEL ÁREA DE INFLUENCIA

5.1 Medio Abiótico

5.1.1 Calidad del agua

Para llevar a cabo la caracterización de la calidad del agua en el área de influencia del proyecto hidroeléctrico Cocorná III, se realizaron monitoreos de las características fisicoquímicas y microbiológicas en tres puntos (captación, intermedio y descarga) del tramo de estudio del Río Cocorná. Los puntos de monitoreo y su ubicación son mostrados respectivamente en la Tabla 5-1 y la Figura 5-1. Las actividades asociadas a los puntos “Monitoreo 2015” (rombos verdes) fueron realizadas durante el final de la temporada lluviosa de la zona (octubre – noviembre de 2015) mientras que los puntos “Monitoreo 2018” (rombos cafés) corresponden al final de la temporada seca (junio – septiembre del 2018). Ambos, 2015 y 2018, fueron realizados respectivamente por los laboratorios ANALTEC (acreditado por el IDEAM mediante la Resolución No 2657 del 25 de octubre de 2013) y SGS (acreditado por el IDEAM mediante Resoluciones 1566 del 21 de Julio de 2016, 2271 del 05 de octubre de 2016, 1083 del 16 de mayo de 2017 y 2759 del 22 de noviembre de 2017). Los reportes de laboratorio correspondientes a cada monitoreo, así como las respectivas resoluciones de acreditación, son presentadas en el Anexo 5.1.5 Calidad del Agua

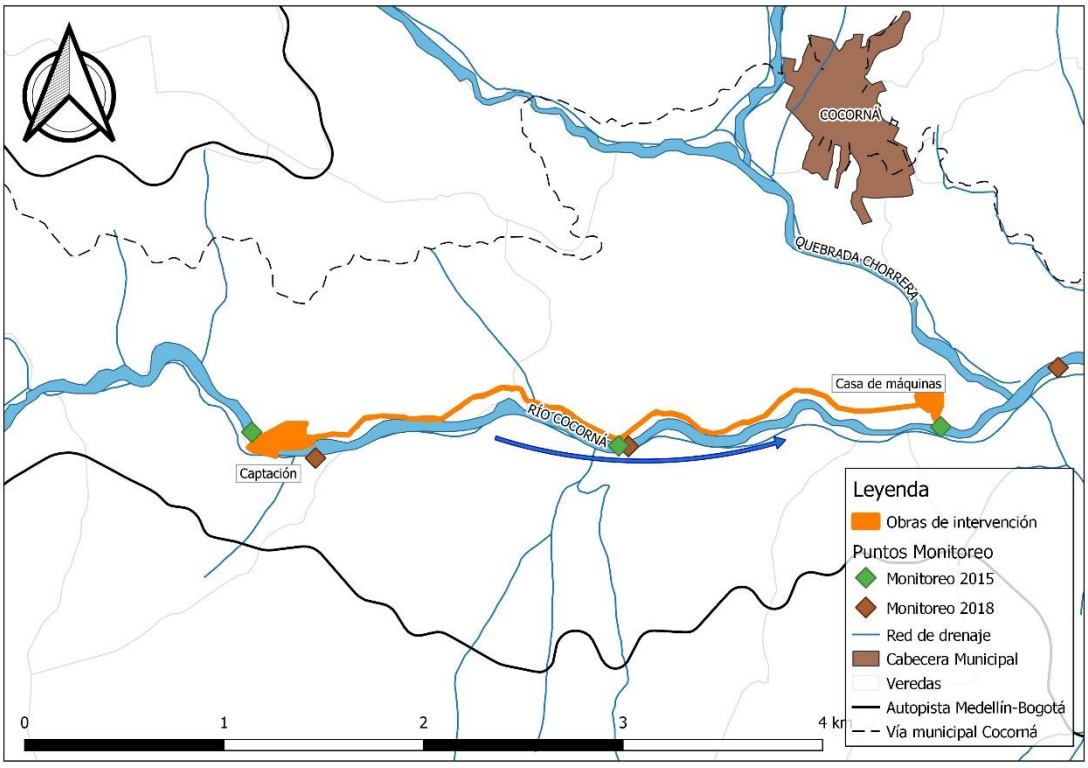


Figura 5-1. Ubicación de los puntos de monitoreos de calidad del agua

Tabla 5-1. Puntos de monitoreo de calidad del agua en el Río Cocorná

Punto de monitoreo	Monitoreo	Latitud	Longitud	Fecha (aaaa/mm/dd)	Hora (24h)
Captación	Monitoreo 2015	06°02'35,2" N	75°12'45,4" W	2015/11/11	12:30
	Monitoreo 2018	06°02'31" N	75°12'35" W	2018/09/04	15:00
Intermedio	Monitoreo 2015	06°02'33,1" N	75°11'45,6" W	2015/11/11	15:40
	Monitoreo 2018	06°02'33" N	75°11'44" W	2018/09/05	10:00
Descarga	Monitoreo 2015	06°02'36,3" N	75°10'53,1" W	2015/11/12	10:40
	Monitoreo 2018	06°02'46" N	75°10'34" W	2018/09/05	16:00

Como se puede observar en la Figura 5-1, los puntos denominados Descarga para ambos monitoreos no son comparables debido a que el punto de muestreo asociado al Monitoreo 2018 se encuentra aguas abajo de la confluencia con la quebrada La Chorrera, lo cual mostraría cambios fisicoquímicos y microbiológicos al adicionarse los caudales y mezclarse las características propias del río Cocorná y la quebrada La Chorrera. Es importante resaltar que la Quebrada La Chorrera recibe el efluente de al menos una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR La Granja) con eficiencia de remoción del 30% para DBO y SST (Superservicios, 2015); esta condición altera considerablemente los resultados del punto de descarga del Monitoreo 2018 respecto al Monitoreo 2015, en cuanto a las concentraciones de materia orgánica (DQO y DBO), coliformes (totales y fecales), oxígeno disuelto, entre otros. El punto de descarga fue escogido aguas abajo de la confluencia con esta quebrada debido a que en este punto las características hidráulicas, fisicoquímicas y microbiológicas del rio se estabilizarían luego de la descarga de la casa de máquinas; por lo que este punto es importante para la comparación futura, durante la etapa de operación del proyecto hidroeléctrico.

5.1.1.1 Parámetros in situ

La medición de parámetros in situ permite el rápido entendimiento de las dinámicas del tramo previo al análisis en laboratorio, ya que da cuenta de la existencia de perturbaciones en la calidad del recurso a lo largo del tramo de estudio, las cuales pueden estar asociadas a vertimientos. En la Tabla 5-2 se presentan los resultados de los parámetros medidos in situ en los tres puntos de monitoreo, y su comparación con los criterios de calidad establecidos en el Decreto 1076 de 2015 (artículos 2.2.3.3.9.5, 2.2.3.3.9.6, 2.2.3.3.9.7 y 2.2.3.3.9.8).

En la Figura 5-2 se muestra el comportamiento del pH en los puntos de monitoreos de cada una de las campañas (2015 y 2018) y el límite de calidad para uso recreativo (el más restrictivo de los comparados). En ambos monitoreos el pH se encuentra dentro de los límites establecidos por el Decreto 1076 de 2015 para los usos considerados. Los resultados de los parámetros temperatura del cuerpo de agua, oxígeno disuelto y porcentaje de saturación de oxígeno, medidos in situ, son mostrados en la Figura 5-3; en esta se nota que las principales diferencias entre ambas campañas de monitoreo se encuentran en los puntos de descarga, debido a que este punto se encuentra aguas abajo de la confluencia con la quebrada La Chorrera que, como ya se dijo, recibe descarga de una de las PTAR de la cabecera municipal de Cocorná.

En general se observan condiciones buenas de calidad del agua, manteniendo un comportamiento relativamente estable a lo largo de los puntos de monitoreo; resaltando la influencia de la quebrada La Chorrera en el punto Descarga del Monitoreo 2018, en que se disminuyen los valores de OD y %O2, y se aumenta la temperatura, producto de las condiciones fisicoquímicas de las aguas residuales municipales.

Tabla 5-2. Parámetros medidos in situ

Parámetros	Captación		Intermedio		Descarga		Uso agrícola	Uso pecuario	Uso recreativo
	Monitoreo 2018	Monitoreo 2015	Monitoreo 2018	Monitoreo 2015	Monitoreo 2018	Monitoreo 2015			
pH (Unidades)	7,87	6,6	7,71	6,63	7,77	6,6	4,5 - 9,0	No aplica	5,0 – 9,0
Temperatura (°C)	18,9	19,2	18,7	19,9	21,7	19,3	No aplica	No aplica	No aplica
Oxígeno Disuelto (mg O2/L)	7,91	6,84	8,22	6,48	7,63	7,59	No aplica	No aplica	No aplica
Saturación de Oxígeno (%)	---	78,3	---	79,5	---	81,4	No aplica	No aplica	70
Conductividad (µS/cm)	582	19	258	45	361	31	Medición	No aplica	No aplica

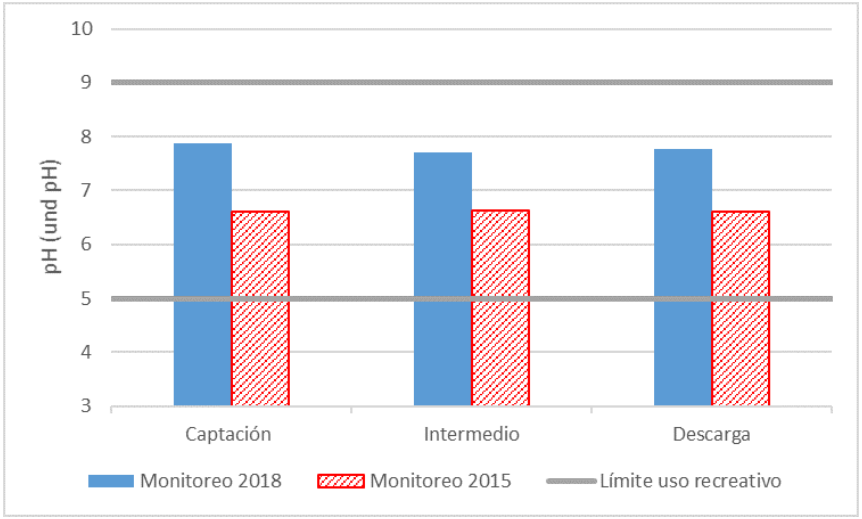


Figura 5-2. Comportamiento del pH

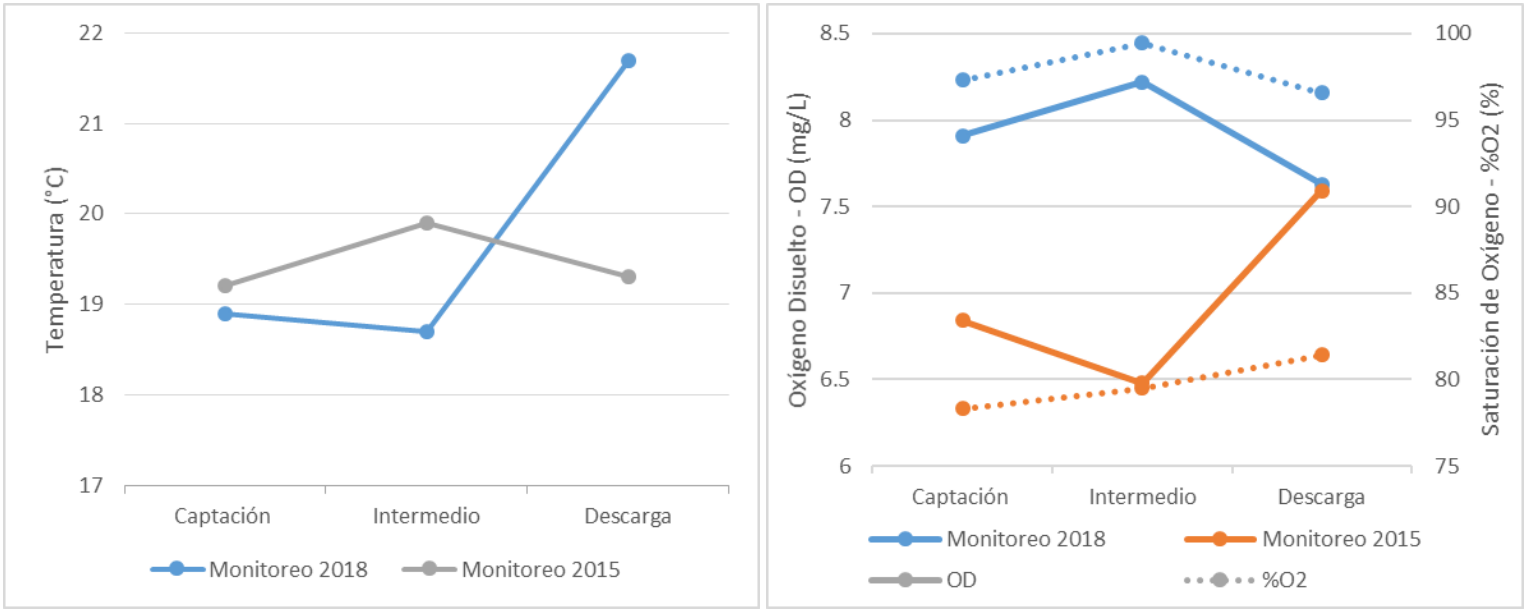


Figura 5-3. Comportamiento de Temperatura (izquierda), Oxígeno Disuelto y Porcentaje de Saturación de Oxígeno (derecha)

5.1.1.2 Parámetros fisicoquímicos y microbiológicos

En la Tabla 5-3 se presentan los resultados de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos analizados en laboratorio y comparados con los criterios de calidad establecidos en el Decreto 1076 de 2015.

Tabla 5-3. Parámetros fisicoquímicos y microbiológicos

Parámetros	Captación		Intermedio		Descarga		Uso agrícola	Uso pecuario	Uso recreativo	
	Monitoreo 2018	Monitoreo 2015	Monitoreo 2018	Monitoreo 2015	Monitoreo 2018	Monitoreo 2015			contacto primario	contacto secundario
Acidez (mg CaCO3/L)	<5,020	---	<5,020	---	<5,020	---	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica
Alcalinidad Total (mg CaCO3/L)	7,85	5	6,67	7,11	11,68	5,73	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica
Cianuro Total (mg/L)	<0,010	---	<0,010	---	<0,010	---	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica
Color triestimular (λ620nm)	<0,270	---	<0,270	---	<0,270	---	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica
Color triestimular (λ436nm)	1,23	---	<1,19	---	<1,19	---	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica
Color triestimular (λ525nm)	<0,580	---	<0,580	---	<0,580	---	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica
Cromo Hexavalente (mg Cr+6/L)	<0,0090	---	<0,0090	---	<0,0090	---	0,1	1,0	No aplica	No aplica
Cloruros (mg Cl/L)	17,87	9,96	<1,09	8,74	<1,09	<4	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica
Demanda Bioquímica de Oxígeno (mg O2/L)	32,1	3,39	14,01	<2	5,14	<2	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica

Parámetros	Captación		Intermedio		Descarga		Uso agrícola	Uso pecuario	Uso recreativo	
	Monitoreo 2018	Monitoreo 2015	Monitoreo 2018	Monitoreo 2015	Monitoreo 2018	Monitoreo 2015			contacto primario	contacto secundario
Demanda Química de Oxígeno (mg O2/L)	58,77	19,8	22,41	11,6*	<14,7	11,9*	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica
Detergentes (mg/L)	<0,32	0,067	<0,32	0,07	<0,32	0,131	No aplica	No aplica	0,5	0,5
Dureza Cálcica (mg/L)	8,1	6,86	4,8	6,86	6,5	5,88	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica
Dureza Total (mg/L)	10,9	8,82	8,1	9,8	12,1	8,82	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica
Fenoles Totales (mg Fenol/L)	<0,100	---	<0,100	---	<0,100	---	No aplica	No aplica	0,002	No aplica
Fósforo Total (mg/L)	<0,05	0,024*	0,07	0,026*	<0,05	0,036	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica
Grasas y Aceites (mg GyA/L)	2,3	<10	<1,96	<10	<1,96	162	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica
Hidrocarburos Totales (mg/L)	<2,1	---	<2,1	---	<2,1	---	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica
Nitrógeno Amoniacal (mg N-NH3/L)	<1,022	<0,19	<1,022	<0,19	<1,022	<0,19	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica
Nitrógeno Total (mg N/L)	0,000	---	1,088	---	0,427	---	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica
Nitrógeno Total Kjeldahl	<5,31	0,502*	<5,31	0,435*	<5,31	0,475*	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica

Parámetros	Captación		Intermedio		Descarga		Uso agrícola	Uso pecuario	Uso recreativo	
	Monitoreo 2018	Monitoreo 2015	Monitoreo 2018	Monitoreo 2015	Monitoreo 2018	Monitoreo 2015			contacto primario	contacto secundario
(mg N/L)										
Sólidos Disueltos Totales (mg SDT/L)	88	7*	15	30	29	24*	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica
Sólidos Sedimentables (mL/L)	0,1	---	<0,1	---	<0,1	---	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica
Sólidos Suspendidos Totales (mg SST/L)	23,6	7,5	2,7	5,7	2,6	11,7	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica
Sólidos Suspendidos Volátiles (mg SSV/L)	4	---	1	---	1	---	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica
Turbiedad (NTU)	17,3	6,41	2,68	7,6	2,60	10,1	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica
Nitratos (mg NO3/L)	<0,05	0,98*	3,06	1,11*	<0,05	1,05*	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica
Nitritos (mg NO2/L)	<0,05	0,002*	<0,05	0,002*	<0,05	0,002*	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica
Ortofosfatos (mg/L)	<0,2	---	<0,2	---	<0,2	---	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica
Sulfatos (mg SO4/L)	3,45	4,34	5,7	4,16	5,39	7,88	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica

Parámetros	Captación		Intermedio		Descarga		Uso agrícola	Uso pecuario	Uso recreativo	
	Monitoreo 2018	Monitoreo 2015	Monitoreo 2018	Monitoreo 2015	Monitoreo 2018	Monitoreo 2015			contacto primario	contacto secundario
Coliformes Totales (NMP/100 mL)	4.844	500.000	860	38.000	129.970	81.000	5000	No aplica	1000	5000
E. Coli (UFC/100 m/L)	210	---	90	---	8.300	---	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica
Coliformes fecales (NMP/100mL)	243	200	98	400	15.531	1.000	1000	No aplica	200	No aplica
Arsénico Total (mg Metal/L)	<0,0045	---	<0,0045	---	<0,0045	---	0,1	0,2	No aplica	No aplica
Cadmio Total (mg Metal/L)	<0,0048	---	<0,0048	---	<0,0048	---	0,01	0,05	No aplica	No aplica
Calcio Total (mg Metal/L)	2,977	---	1,938	---	2,502	---	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica
Cobre Total (mg Metal/L)	<0,0088	---	<0,0088	---	<0,0088	---	0,2	0,5	No aplica	No aplica
Hierro Total (mg Metal/L)	0,236	0,469	1,477	0,334	<0,149	0,497	5,0	No aplica	No aplica	No aplica
Magnesio Total (mg Metal/L)	0,833	---	0,489	---	0,686	---	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica
Mercurio Total (mg Metal/L)	<0,0006	---	<0,0006	---	<0,0006	---	No aplica	0,01	No aplica	No aplica
Níquel Total (mg Metal/L)	<0,0045	---	<0,0045	---	<0,0045	---	0,2	No aplica	No aplica	No aplica
Plomo Total (mg Metal/L)	<0,0054	---	<0,0054	---	<0,0054	---	5,0	0,1	No aplica	No aplica

Parámetros	Captación		Intermedio		Descarga		Uso agrícola	Uso pecuario	Uso recreativo	
	Monitoreo 2018	Monitoreo 2015	Monitoreo 2018	Monitoreo 2015	Monitoreo 2018	Monitoreo 2015			contacto primario	contacto secundario
Potasio Total (mg Metal/L)	1,146	---	0,5600	---	0,9290	---	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica
Sodio Total (mg Metal/L)	15,180	---	2,3860	---	3,1910	---	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica
Zinc Total (mg Metal/L)	<0,1588	---	<0,1588	---	<0,1588	---	2,0	25,0	No aplica	No aplica
Pesticidas Organoclorados										
4,4 DDT (mg /L)	<0,000049	---	---	---	---	---	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica
4,4, DDD (mg /L)	<0,000052	---	---	---	---	---	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica
4,4-DDE (mg /L)	<0,000053	---	---	---	---	---	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica
Aldrin (mg /L)	<0,000053	---	---	---	---	---	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica
ALPHA-BHC (mg /L)	<0,000055	---	---	---	---	---	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica
b_BHC (mg /L)	<0,000052	---	---	---	---	---	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica
cis- clordano (mg /L)	<0,000052	---	---	---	---	---	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica
d_BHC (mg /L))	<0,000050	---	---	---	---	---	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica

Parámetros	Captación		Intermedio		Descarga		Uso agrícola	Uso pecuario	Uso recreativo	
	Monitoreo 2018	Monitoreo 2015	Monitoreo 2018	Monitoreo 2015	Monitoreo 2018	Monitoreo 2015			contacto primario	contacto secundario
Dieldrin (mg /L)	<0,000048	---	---	---	---	---	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica
Endosulfan I (mg /L)	<0,000051	---	---	---	---	---	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica
Endosulfan II (mg /L)	<0,000052	---	---	---	---	---	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica
Endosulfan sulfato (mg /L)	<0,000049	---	---	---	---	---	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica
Endrin (mg /L)	<0,000047	---	---	---	---	---	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica
Endrin aldehido (mg /L)	<0,000050	---	---	---	---	---	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica
Endrin cetona (mg /L)	<0,000053	---	---	---	---	---	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica
g-BHC (Lindano) (mg /L)	<0,000049	---	---	---	---	---	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica
Heptacloro (mg /L)	<0,000053	---	---	---	---	---	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica
Heptacloro epoxido (isomero B) (mg /L)	<0,000050	---	---	---	---	---	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica

Parámetros	Captación		Intermedio		Descarga		Uso agrícola	Uso pecuario	Uso recreativo	
	Monitoreo 2018	Monitoreo 2015	Monitoreo 2018	Monitoreo 2015	Monitoreo 2018	Monitoreo 2015			contacto primario	contacto secundario
Metoxicloro (mg /L)	<0,000053	---	---	---	---	---	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica
Pesticidas Organoclorados Totales (mg /L)	<0,000047	---	---	---	---	---	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica
trans-clordano (mg /L)	<0,000053	---	---	---	---	---	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica

* Valor entre el límite de cuantificación y límite de detección

En la Figura 5-4 se puede observar el comportamiento de los sólidos disueltos totales (SDT), sólidos suspendidos totales (SST) y turbiedad, para los monitoreos de calidad de agua realizados en área de influencia de Cocorná III. Los elevados valores de sólidos y turbiedad en el punto de captación del Monitoreo 2018, respecto a los otros puntos y al Monitoreo 2015, están relacionados con el evento de lluvia ocurrido el día anterior al muestreo (2018/09/03), valores que se vieron reducidos en el segundo día de muestreo, día en que hubo ausencia de lluvias. Las diferencias entre los monitoreos (excepto en el punto de captación) están relacionadas con las temporadas en los que estos se realizaron, los valores en el Monitoreo 2015 son mayores debido a que en la temporada lluviosa hay una mayor remoción y arrastre de sedimentos, comparado con la temporada seca en la cual se ejecutó el Monitoreo 2018.

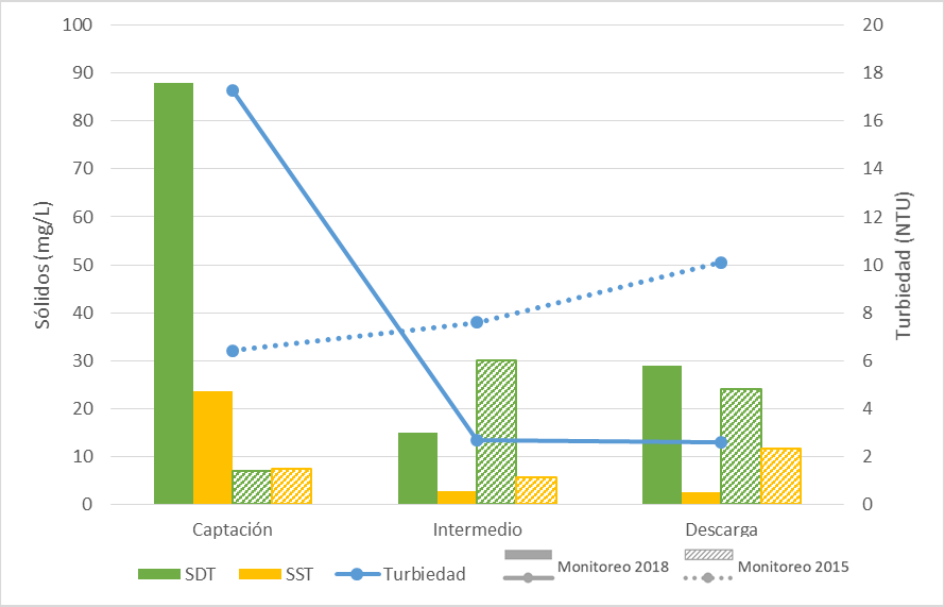


Figura 5-4. Comportamiento de Turbiedad, Sólidos Disueltos Totales y Suspendidos Totales

El comportamiento de la Demanda Química de Oxígeno (DQO) y la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) en cada uno de los monitoreos de calidad del agua es mostrado en la Figura 5-5. Los elevados valores de captación 2018, en comparación con los otros puntos y el otro monitoreo, pueden estar relacionados con el evento de lluvia del día anterior al muestreo; el cual, además de arrastrar sedimentos, pudo arrastrar la materia orgánica presente en los suelos aguas arriba del punto de muestreo. Las diferencias entre las dos campañas de monitoreo pueden estar relacionadas con la temporada lluviosa en que se realizó el Monitoreo 2015, ya que, con mayor agua disponible en el río, se aumenta la dilución de cargas contaminantes de DQO y DBO. En lo que respecta a la biodegradabilidad, en el Monitoreo 2015 se tienen valores bajos (valores muy bajos de DBO respecto a DQO); mientras que en el Monitoreo 2018 se presentan valores alrededor del 50%; lo que indica que cerca

de la mitad de la materia orgánica presente en el río Cocorná en el Monitoreo 2018, es biodegradable, y ha aumentado desde las mediciones realizadas en el 2015.

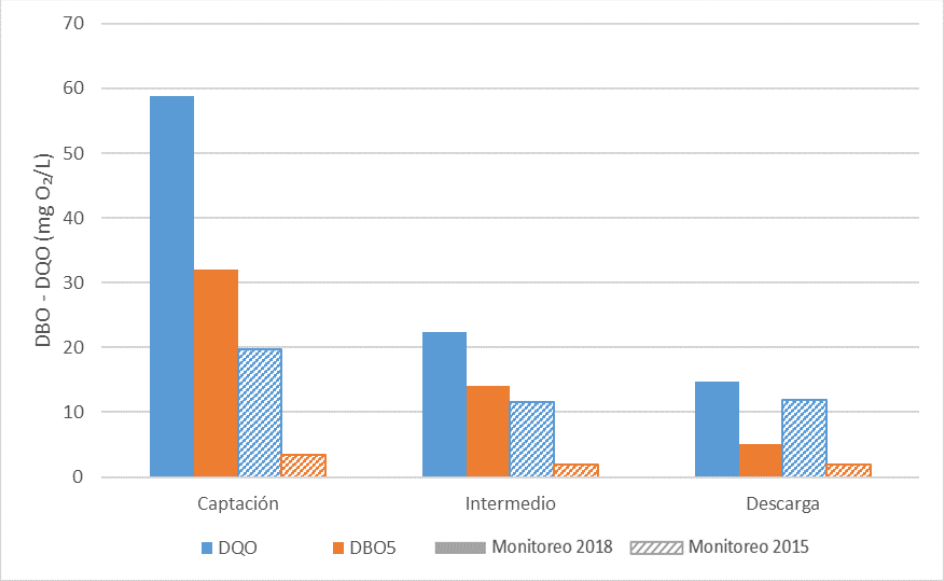


Figura 5-5. Comportamiento de DQO y DBO

En la Figura 5-6 se muestra el comportamiento de los coliformes totales y fecales en los puntos de monitoreo en el Río Cocorná. En el Monitoreo 2015 se observa una tendencia creciente a lo largo del río, tanto para coliformes totales como fecales, y se observa una cantidad baja de coliformes fecales respecto de los totales. Para el Monitoreo 2018, es de resaltar las altas concentraciones en el punto Descarga, ubicado aguas abajo de la confluencia con la quebrada La Chorrera, dada la influencia de la descarga de al menos una PTAR de Cocorná. La cantidad de coliformes fecales comparada con la cantidad de coliformes totales, son mayores en el Monitoreo 2015 que en el 2018. Los criterios de calidad para uso recreativo (art. 2.2.3.3.9.7 del Decreto 1076 de 2015) son 1000 y 200 NMP/100mL (no mostrados en la Figura 5-6) para coliformes totales y fecales respectivamente, estos se cumplen sólo en el punto Intermedio del Monitoreo 2018, mientras que los criterios para uso agrícola (art. 2.2.3.3.9.5, 5000 y 1000 NMP/100mL para coliformes totales y fecales, respectivamente) se cumplen también en el punto Captación del Monitoreo 2018 y en coliformes fecales de Descarga del Monitoreo 2015.

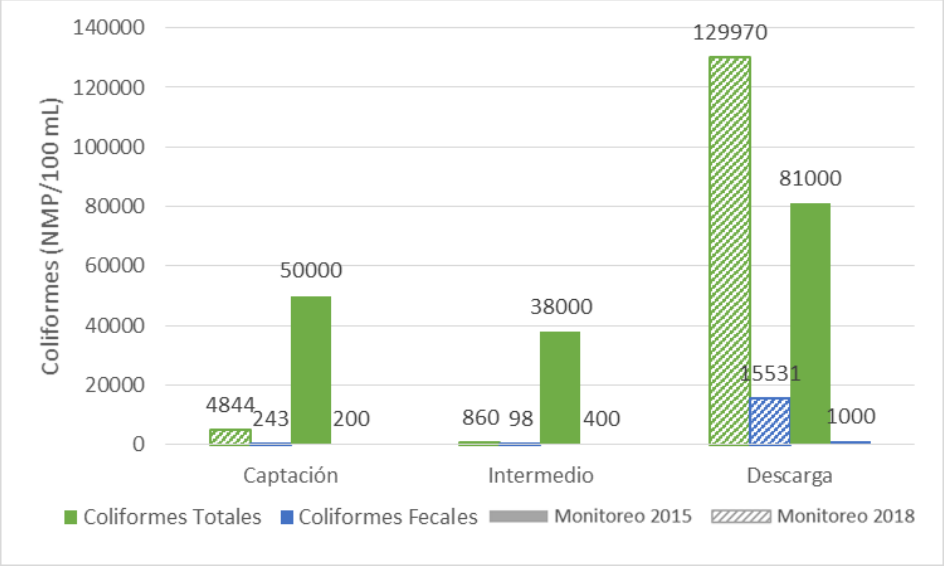


Figura 5-6. Comportamiento de Coliformes Totales y Fecales

5.1.1.3 Índices de Calidad del Agua (ICA) y Contaminación (ICO)

El Índice de Calidad del Agua (ICA) proporciona un análisis multiparamétrico de las características generales del agua, permitiendo identificar el estado general de la calidad del recurso (Aguirre, Vanegas, & García, 2016). Por su parte, el Índice de Contaminación (ICO) proporciona un análisis diferenciado en componentes de contaminación, complementando el análisis del ICA (Ramírez, Restrepo, & Viña, 1997). Para el cálculo del ICA y los ICO's se usaron respectivamente las metodologías de Cornare & UdeA (2011) y Ramírez et al. (1997).

En la Tabla 5-4 se muestran los valores del ICA para cada uno de los puntos de muestreo en las campañas de monitoreo realizadas en el río Cocorná. Allí se puede observar que el ICA según el Monitoreo 2015 es clasificado como Bueno, consecuente con lo mostrado en el POMCA del Río Samaná Norte, en el cual el río Cocorná y las quebradas afluentes en la zona de estudio (La Hundida y La Chorrera), tienen un ICA entre Excelente y Bueno (Cornare et al., 2017). Por otro lado, el Monitoreo 2018 se clasifica entre Bueno y Medio, lo cual se relaciona con el evento de lluvia previo al muestreo en Captación y la ubicación del punto Descarga, posterior a la confluencia con la Quebrada Chorrera (con descarga de la PTAR del municipio).

Tabla 5-4. Valores del índice de calidad del agua (ICA)

Parámetro	%	Captación 2015		Intermedio 2015		Descarga 2015		Captación 2018		Intermedio 2018		Descarga 2018	
		Medida	Valor índice	Medida	Valor índice	Medida	Valor índice	Medida	Valor índice	Medida	Valor índice	Medida	Valor índice
pH (und)	8%	6.60	0.81	6.63	0.83	6.60	0.81	7.87	1.00	7.71	1.00	7.77	1.00
DBO5 (mg O2/L)	17%	3.39	0.68	2.00	1.00	2.00	1.00	32.1	0.00	14.01	0.25	5.14	0.55
SST (mg/L)	15%	7.5	1.00	5.7	1.00	11.7	0.98	23.6	0.95	2.7	1.00	2.6	1.00
Conductividad (µS/cm)	12%	19	0.97	45	0.91	31	0.95	582	0.00	258	0.06	361	0.00
Saturación (%)	30%	78.3	0.78	79.5	0.80	81.4	0.81	97.3	0.97	99.5	1.00	96.6	0.97
Coliformes Fecales (NMP/100mL)	18%	200	0.84	400	0.69	1000	0.38	243	0.81	98	0.93	15531	0.00
Valor ICA y Clasificación	100%	0.83	Bueno	0.86	Bueno	0.81	Bueno	0.66	Medio	0.75	Bueno	0.61	Medio

De la Tabla 5-5 a la Tabla 5-8 se muestran los valores del ICOSUS, ICOMI, ICOMO e ICOTRO, respectivamente, para cada uno de los puntos de muestreo en las dos campañas de monitoreo. En lo que respecta al ICOSUS (Tabla 5-5), se observan valores bajos del índice, que indican la ausencia de contaminación por solidos suspendidos; el valor más elevado de este índice, presentado en Captación 2018, es asociado al arrastre de sedimentos ocasionado por la lluvia previa al día del muestro de este punto. Por su parte, el ICOMI presenta valores asociados a ninguna y baja contaminación por mineralización para los Monitoreos 2015 y 2018 respectivamente (Tabla 5-6); estas diferencias están asociadas mayormente a las diferencias en los valores de conductividad presentados en los distintos monitoreos (Tabla 5-2).

Tabla 5-5. Valores del índice de contaminación por sólidos suspendidos (ICOSUS)

Punto de Monitoreo	ICOSUS	Grado de Contaminación
Captación 2015	0.000	Ninguna
Intermedio 2015	0.000	Ninguna
Descarga 2015	0.015	Ninguna
Captación 2018	0.051	Ninguna
Intermedio 2018	0.000	Ninguna
Descarga 2018	0.000	Ninguna

Tabla 5-6. Valores del índice de contaminación por mineralización (ICOMI)

Punto de Monitoreo	I_{COND}	I_{DUREZA}	I_{ALCA}	ICOMI	Grado de Contaminación
Captación 2015	0.03	0.00	0.00	0.009	Ninguna
Intermedio 2015	0.09	0.00	0.00	0.030	Ninguna
Descarga 2015	0.05	0.00	0.00	0.018	Ninguna
Captación 2018	1.00	0.00	0.00	0.333	Baja
Intermedio 2018	0.94	0.00	0.00	0.312	Baja
Descarga 2018	1.00	0.00	0.00	0.333	Baja

Tabla 5-7. Valores del índice de contaminación por materia orgánica (ICOMO)

Punto de Monitoreo	I_{DBO}	$I_{COL.TOT}$	$I_{\%O2}$	ICOMO	Grado de Contaminación
Captación 2015	0.32	1.00	0.22	0.513	Media
Intermedio 2015	0.00	1.00	0.21	0.402	Media
Descarga 2015	0.00	1.00	0.19	0.395	Baja
Captación 2018	1.00	0.62	0.03	0.550	Media

Punto de Monitoreo	I_{DBO}	$I_{COL.TOT}$	$I_{\%O2}$	ICOMO	Grado de Contaminación
Intermedio 2018	0.75	0.20	0.01	0.320	Baja
Descarga 2018	0.45	1.00	0.03	0.494	Media

Tabla 5-8. Valores del índice de contaminación trófica (ICOTRO)

Punto de Monitoreo	Fosforo total	ICOTRO
Captación 2015	0.024	Eutrófico
Intermedio 2015	0.026	Eutrófico
Descarga 2015	0.036	Eutrófico
Captación 2018	<0.05	Indeterminado
Intermedio 2018	0.07	Eutrófico
Descarga 2018	<0.05	Indeterminado

En cuanto al grado de contaminación asociada a materia orgánica, este varía entre baja y media en ambos monitoreos (Tabla 5-7); los grados de contaminación media en el Monitoreo 2015 están principalmente influenciados por los elevados valores de coliformes y los relativamente bajos niveles de saturación de oxígeno; mientas que, en el Monitoreo 2018, estos están asociados a los altos valores de DBO y coliformes. Por otro lado, la contaminación trófica se clasifica como eutrófica en la mayor parte de los puntos monitoreados (Tabla 5-8). Es de resaltar que, en los puntos Captación y Descarga del Monitoreo 2018 no se puede determinar el grado de contaminación, dado que el límite de cuantificación del método de análisis usado es muy alto, comparado con los rangos del índice, por lo cual, considerar el valor del límite como el valor del índice resultaría en grados de contaminación que pueden no representar las condiciones reales del cuerpo de agua.

5.1.2 Usos del agua

5.1.2.1 Caracterización de los usos del agua

La caracterización de los usos del agua en la zona de interés se realizó con base en el registro de concesiones de agua que suministra Cornare, en el cual se encontró que en la Cuenca del río Cocorná existen 424 concesiones de agua para un caudal total de 28.967,54 l/s (ver Figura 5-7). El principal uso concesionado en la Cuenca, por cantidad de agua, corresponde a la generación de energía hidroeléctrica, demandando un 89,76% del agua concesionada, seguido por el uso piscícola con un 6,08% (ver Tabla 5-9 y Anexo 5.1.6 – Usos del agua). El mayor usuario corresponde a la empresa generadora de energía hidroeléctrica HMV Ingenieros LTDA, con una demanda de 16.000 l/s (55,2% del agua concesionada en la Cuenca); caudales que, aunque representan porcentajes considerables del agua concesionada en la Cuenca

son de **uso no consuntivo**, puesto que son restituidos al río después de su utilización en el movimiento de las turbinas; si bien se está haciendo uso del recurso, la mayor afectación derivada de este se da en los tramos de caudal reducido.

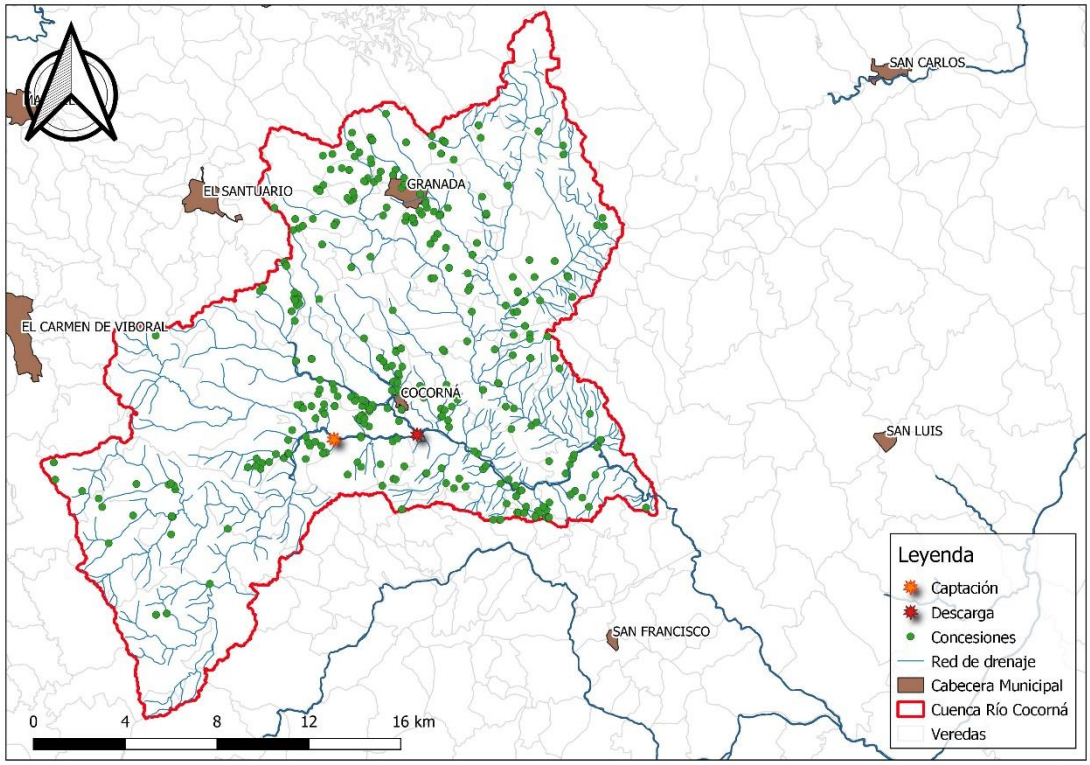


Figura 5-7.Concesiones registradas en la Cuenca del río Cocorná

Tabla 5-9. Usos del agua en la Cuenca del río Cocorná

Usos	Concesiones	Caudal (l/s)	Porcentaje (%)
Doméstico	250	1.090,04	3,76
Pecuario	109	14,50	0,05
Piscícola	73	1.761,20	6,08
Riego	51	6,85	0,02
Comercial	5	0,89	0,00
Generación Hidroeléctrica	2	26.000,00	89,76
Recreación y deporte	10	9,67	0,03
Industrial	19	84,36	0,29
otros	1	0,02	0,00
Total	**424**	**28.967,54**	**100,00**

Luego de realizar una revisión de las concesiones en la cuenca, se encuentra que no existen ni se han otorgado concesiones de agua en el tramo de caudal reducido del proyecto PCH Cocorná III. Adicionalmente, en los recorridos de campo realizados para llevar a cabo la caracterización del recurso hídrico del presente EIA, no se encontraron usuarios que aprovechen el recurso en el tramo de caudal reducido, condición apenas lógica por las dificultades para construir sistemas de captación en un cauce de alta pendiente y con presencia de grandes bolas de roca.

5.1.2.1.1 Usos de agua para consumo humano en la Cuenca del río Cocorná

La cuenca del río Cocorná se encuentra en la jurisdicción de cuatro (4) municipios del Oriente antioqueño, Cocorná, El Carmen de Viboral, El Santuario y Granada, de los cuales solo Granada y Cocorná tienen la cabecera municipal ubicada dentro de la Cuenca, por lo que solo para estos se describen los sistemas de acueducto asociados al área urbana.

Las fuentes de abastecimiento de agua para consumo humano en las zonas urbanas de los municipios de Cocorná y Granada son la quebrada Guayabala y la quebrada Minitas, respectivamente. En el caso de Cocorná, según Cornare (2019) se cuenta con una cobertura de acueducto en el área urbana del 80, presentando un valor del Índice de Riesgo de la Calidad del Agua (IRCA) de 6,3%, correspondiente a una calidad del agua con riesgo bajo. Para Granada, se cuenta con una cobertura de acueducto en el área urbana del 99%, con un IRCA de 0% que corresponde a una categoría sin riesgo. Adicional a estos acueductos municipales, la cobertura de acueductos reportada por Cornare (2019) en las áreas rurales de los municipios en la Cuenca es de:

- 18 acueductos rurales en Cocorná, con riesgo algo (IRCA 54,7%)
- 63% de la zona rural de Granada abastecida por 18 acueductos, con IRCA de 96.3% inviable sanitariamente.
- 88% de zona rural de El Santuario, con 36 acueductos y riesgo algo (IRCA 43,8%)
- 34 acueductos rurales en El Carmen de Viboral correspondiente al 76% de cobertura, con IRCA de 2.5% calificado como Sin Riesgo

Los porcentajes restantes para todos los municipios se atiende a través de pequeños abastos individuales. Los acueductos veredales que abastecen la zona rural en la cuenca del río Cocorná según los registros de la Secretaría Seccional de Salud y Protección Social de Antioquia (DSSA) son 57, localizados en veredas de los municipios Cocorná, El Carmen de Viboral, el Santuario y Granada. De estos acueductos, seis (6) se encuentran en el área de influencia del proyecto y hacen parte del municipio de Cocorná.

En la Tabla 5-11 se presenta el registro del Índice de Riesgo de Calidad del Agua para consumo humano (IRCA) del agua suministrada por estos seis acueductos que corresponden a los de la Junta de Acción Comunal (JAC) vereda Los Cedros, JAC

vereda San José, Junta Administradora vereda San Juan, JAC vereda Mazotes, JAC vereda Placeta y JAC vereda La Chorrera. Es importante mencionar que, aunque en los registros de la DSSA no se indica la fuente hídrica que abastece los acueductos, estos se deben ubicar en la parte alta de la cuenca para realizar conducción por gravedad hasta las viviendas conectadas, razón por la cual se deben abastecer de fuentes hídricas distintas al río Cocorná, aunque posiblemente son tributarios de éste. Tal como se puede observar en esta tabla, el riesgo es alto para el consumo del agua suministrada por el acueducto en la mayoría de las veredas del área de influencia del proyecto y en algunos casos como en las veredas Los Cedros y San Juan en el año 2015 ascienden hasta niveles de inviabilidad sanitaria (Ver Tabla 5-11). Aunque es importante resaltar, que la única vereda en la que se presentan IRCAs indicadores de buena calidad para consumo humano (sin riesgo) durante todo el periodo registrado es la vereda San José.

El Índice de Riesgo de Calidad del Agua para el consumo humano (IRCA) presentado en la Tabla 5-11, es calculado con base en el monitoreo de diversos parámetros fisicoquímicos e hidrobiológicos de calidad del agua, los cuales son ponderados de acuerdo con su relevancia para la salud humana y se clasifican de acuerdo con lo mostrado en la Tabla 5-10.

Tabla 5-10. Clasificación del IRCA e implicaciones en el suministro del recurso hídrico

Clasificación IRCA (%)	Nivel de Riesgo	IRCA por muestra (notificaciones que adelantará la autoridad sanitaria de manera inmediata)	IRCA mensual (acciones para mejora de la calidad)
80,1 -100	Inviable sanitariamente	Informar a la persona prestadora, al COVE, Alcalde, Gobernador, SSPD, MPS, INS, MAVDT, Contraloría General y Procuraduría General.	Agua no apta para consumo humano, gestión directa de acuerdo a su competencia de la persona prestadora, alcaldes, gobernadores y entidades del orden nacional.
35,1 - 80	Alto	Informar a la persona prestadora, COVE, Alcalde, Gobernador y a la SSPD.	Agua no apta para consumo huma- no, gestión directa de acuerdo a su competencia de la persona prestadora y de los alcaldes y gobernadores respectivos.
14,1 - 35	Medio	Informar a la persona prestadora, COVE, Alcalde y Gobernador.	Agua no apta para consumo huma- no, gestión directa de la persona prestadora.
5,1 – 14	Bajo	Informar a la persona prestadora y al COVE.	Agua no apta para consumo humano, susceptible de mejoramiento.
0 – 5	Sin riesgo	Continuar el control y la vigilancia.	Agua apta para consumo humano. Continuar la vigilancia.

Fuente: MinSalud, (2016)

Tabla 5-11. IRCA de los acueductos veredales en el área de influencia del Proyecto

Acueducto	Empresa administradora	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Los Cedros	Junta Acción Comunal	51,3	56,85	56,85	56,85	97,3	S.R.
San José	Junta Acción Comunal	0	0	0	0	0	S.R.
San Juan	Junta Administradora	S.R.	79,85	79,85	79,85	97,3	S.R.
Mazotes	Junta Acción Comunal	51,3	56,85	56,85	56,85	S.R.	S.R.
Placeta	Junta Acción Comunal	51,3	56,85	56,85	56,85	S.R.	S.R.
Chorrera	Junta Acción Comunal	51,3	51,3	51,3	51,3	S.R.	S.R.

S.R.: Sin registro

Fuente: DSSA (2018)

En la Tabla 5-12 se presentan el IRCA para las fuentes de abastecimiento de los acueductos de las áreas urbanas de los municipios de Cocorná y Granada. En la tabla se observa que, en general, el agua proveniente de esas fuentes presenta IRCAs que indican agua sin riesgo para consumo humano y en algunos casos presentan riesgos bajos que pueden ser manejados por los sistemas de tratamiento de las plantas de las empresas de servicios públicos de cada municipio. Por lo que se debe tener cuenta que aunque la calidad del agua representa un riesgo para la salud de la comunidad del área rural, los acueductos municipales que abastecen el área urbna, operados por las Empresas de Servicios Públicos, ESP de Cocorná y ESP de Granada, han realizado una gestión que les permite afirmar que el riesgo es bajo o nulo para los usuarios de los acueductos municipales (ver Tabla 5-10 y Tabla 5-12).

Tabla 5-12. Índice de riesgo de la calidad del agua para el consumo humano (IRCA) de los acueductos municipales de los municipios de Cocorná y Granada

Acueducto	Fuente hídrica	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Empresa de Servicios Públicos de Cocorná E.S.P.	Quebrada Guayabal	1.6	0.9	2.3	3.6	6.1	6.30	6.74	4.15
Empresa de Servicios Públicos de Granada E.S.P.	Quebrada Minitas	1.7	2.2	9.2	1.8	2.7	2.61	0.23	0.71

Fuente: DSSA (2018)

5.1.2.2 Vertimientos de aguas residuales

De acuerdo con los registros de permisos de vertimiento otorgados por Cornare en la Cuenca del río Cocorná hay 50 permisos de vertimiento, de los cuales 19 cuentan con el registro del caudal autorizado a verter. De los 31 restantes, con caudal autorizado desconocido, se sabe que 30 son de origen doméstico y uno de origen industrial. Entre los vertimientos de origen doméstico se encuentra el correspondiente al caudal autorizado a verter en la quebrada Santa Bárbara por la Planta de Tratamiento de

Aguas Residuales (PTAR) de Granada. Sin embargo, este vertimiento se incluye en el análisis, debido a que se encuentra reportado en la Resolución 081 de 2017 de Cornare para tasas retributivas. En la indicada Resolución, se reporta que el vertimiento por el cual se paga tasa retributiva es de aproximadamente 12,93 l/s. Es importante resaltar que, de los 50 vertimientos contenidos en los registros otorgados por la corporación, 22 van al suelo a través de pozos de absorción y campos de infiltración o directamente al suelo; entre estos se encuentran 19 vertimientos de tipo residual doméstico, 2 de tipo industrial y 1 asociado a vertimiento municipal.

En términos generales se tiene que las aguas residuales de los vertimientos antes mencionados son en su mayoría de tipo doméstico (81,97% del caudal total autorizado a verter en la cuenca) y en menor proporción de tipo industrial (18,02%) (Ver Tabla 5-13 y Anexo 5.1.6. Usos del agua); su ubicación se puede observar en la Figura 5-8.

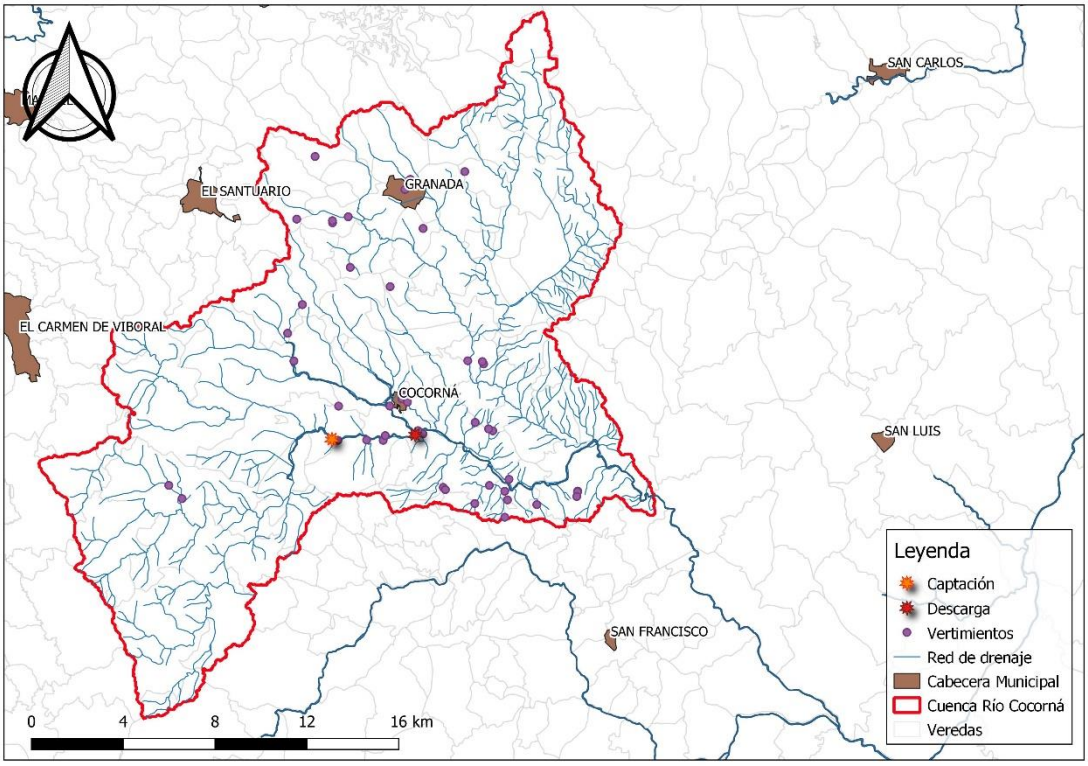


Figura 5-8. Vertimientos registrados en la Cuenca del río Cocorná

Tabla 5-13. Tipos de vertimiento en el Cuenca del río Cocorná

Receptor del vertimiento	Usos	Permisos	Caudal (l/s)	Porcentaje
Fuente de Agua	Industrial	2	18.000	17.87%
	Doméstico	26	80.200	79.60%

Receptor del vertimiento	Usos	Permisos	Caudal (l/s)	Porcentaje
Suelo	Industrial	2	0.159	0.16%
	Municipal	1	0.007	0.01%
	Doméstico	19	2.387	2.37%
Total		**50**	**100.753**	**100%**

En el tramo de caudal reducido del proyecto, existen 6 permisos de vertimientos otorgados por Cornare (Figura 5-9), de los cuales no se cuenta con los registros de caudal autorizado a verter, aunque se sabe que todos son de tipo residual doméstico. Adicionalmente, es de resaltar que en los recorridos de campo realizados para el desarrollo del presente EIA, no se evidenciaron vertimientos, tanto autorizados como sin autorizar, directos al tramo del caudal reducido del proyecto.

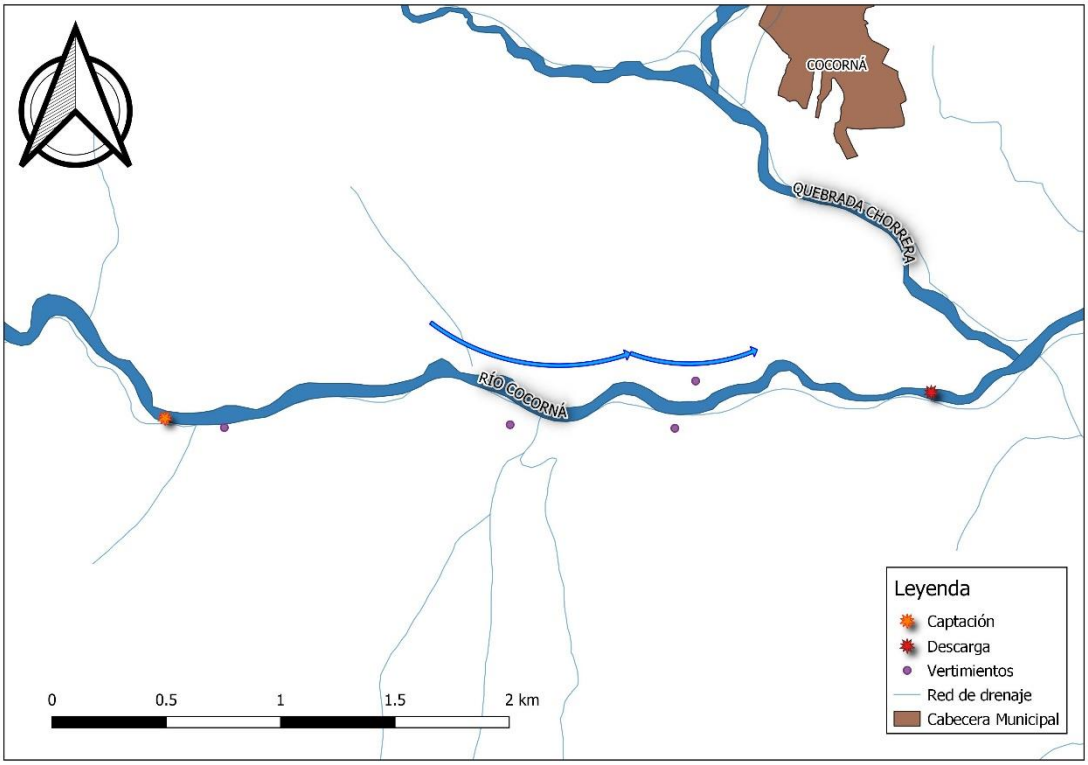


Figura 5-9. Vertimientos autorizados en el tramo de caudal reducido del Proyecto

5.1.2.2.1 Sistema de alcantarillado

El sistema de alcantarillado del municipio de Cocorná, según Cornare (2019) cuenta con una cobertura del 92% en redes de alcantarillado en la zona urbana y dos (s) plantas de tratamiento de aguas residuales (La Granja y Los Ceferinos), que según

Cornare (2014a) contaban con una eficiencia de: DBO5 93.7%, DQO 94.1%, SST 96.0% en la PTAR La Granja y DBO5 93.8%, DQO 93.6%, SST 95.6% en la PTAR Los Ceferinos. En el caso de la zona rural se cuenta con una cobertura del 63% mediante sistemas individuales como tanques sépticos, el centro poblado La Piñuela es el único en zona rural que cuenta con redes de alcantarillado (Cornare, 2019).

Por su lado, el sistema de alcantarillado del municipio de Granada cuenta con una cobertura del 80% en redes de alcantarillado en la zona urbana (Cornare, 2019), y su eficiencia en 2014 era de SST: 63.97% DBO5: 42.64% y DQO: 40.67% (Cornare, 2014b). En el caso de la zona rural no hay presencia de redes de alcantarillado, la cobertura reportada del 60% corresponde a sistemas sépticos individuales y/o colectivos (Cornare, 2019).

En el caso de los sistemas de alcantarillado para la zona rural de los municipios El Santuario y El Carmen de Viboral, según Cornare (2019) se tiene que:

- Para la zona rural de El Santuario se cuenta con una cobertura de tratamiento del 88%, que se realiza a través de sistemas sépticos individuales.
- Para la zona rural de El Carmen de Viboral se tiene una cobertura del 5% mediante redes de alcantarillado y del 73% mediante pozos sépticos individuales y colectivos.

Teniendo en cuenta la información anteriormente descrita, se espera que el número de vertimientos directos de agua residual doméstica al río Cocorná sea mayor que el presentado en los registros, dada la falta de cobertura del sistema de alcantarillado en los municipios identificados en la cuenca.

5.1.2.3 Usuarios potenciales

Los usos y usuarios potenciales del recurso hídrico fueron analizados de acuerdo con los escenarios tendenciales del POMCA del río Samaná Norte. La demanda potencial para uso doméstico se supone que sería equiparable a la proyección de población, siempre que se mantengan las dinámicas de consumo actuales. En la Tabla 5-14 se muestran las proyecciones poblacionales de las veredas del Área de Influencia del Medio Socioeconómico (sección 5.3), en esta se puede observar que la población en la cuenca está decreciendo, con lo cual se podría esperar una reducción de la demanda del recurso hídrico para uso doméstico. Es importarte mencionar que las proyecciones de población tienen mayor incertidumbre mientras más lejano sea el año que se proyecta.

Tabla 5-14. Proyección de la población de las veredas dentro del área de influencia del medio socioeconómico.

Municipio	Vereda	Población	2021	2024	2029	2044
Cocorná	El Tesoro	246	245	244	243	241
	La Placeta	146	146	145	144	143

Municipio	Vereda	Población	2021	2024	2029	2044
	Las Mercedes	367	366	365	362	360
	Los Cedros	163	163	162	161	160
	Mazotes	195	194	194	192	191
	Montañita	205	204	204	202	201
	San José	179	179	178	177	175
	San Vicente	438	437	435	432	429
Total		1939	1934	1926	1913	1900

Fuente: Fase prospectiva y zonificación ambiental, POMCA Samaná Norte, p. 20

En lo que respecta a los usos identificados, diferentes del doméstico (Tabla 5-9), su tendencia se supone equiparable a la tendencia del PIB en la cuenca del río Samaná Norte. En la Tabla 5-15 se muestran las tasas de crecimiento anual del PIB por sector económico en la cuenca del río Samaná Norte; en esta se puede notar que el uso del agua con mayor crecimiento en la cuenca es el recreativo (8.3% anual), los usos pecuario, piscícola y de riego (2,7% anual, cada uno), industrial (2.5% anual) y generación de energía (1,3% anual). El uso comercial se considera que aumenta proporcional al uso doméstico, por lo que su tasa de crecimiento es la misma que las proyecciones de población en el área de influencia. El uso recreativo podría considerarse como no consuntivo, por lo que este no afectaría la oferta de la cuenca. Es importante resaltar que las tasas de crecimiento corresponden a toda la cuenca del río Samaná norte, la cual tiene unas tasas de crecimiento diferentes a las de las unidades territoriales ubicadas dentro de la cuenca y en el Área de Influencia del medio Socioeconómico; por lo que las tasas de crecimiento podrían ser diferentes.

Tabla 5-15. Crecimiento anual proyectado por sector económico en la cuenca del Río Samaná Norte

Tipo de uso	Tasa de crecimiento anual (%)
Industrial	2.5%
Pecuario	2.7%
Piscícola	2.7%
Recreativo	8.3%
Riego (Agrícola)	2.7%
Generación Hidroeléctrica	1.3%

Fuente: Fase prospectiva y zonificación ambiental, POMCA Samaná Norte, p. 21 y p. 62

5.1.2.4 Conflictos actuales y potenciales

Teniendo en cuenta la información registrada ante la Autoridad Ambiental, no se presentan conflictos considerables por el uso del agua en la cuenca que abastece el proyecto y en el tramo de caudal reducido; ya que en esta las cantidades de concesiones y vertimientos es muy poca, en comparación con resto de la cuenca del Río Cocorná (Figura 5-7 y Figura 5-8). En el tramo proyectado de caudal reducido no se reportan concesiones directas del río, por lo que este uso no generaría conflictos.

No obstante, considerando la información recolectada en campo y consignada en la sección 5.3 – Caracterización del Medio Socioeconómico, se presentan algunos conflictos por uso en cuanto a las tomas de agua que se presentan en algunos afluentes. En la margen derecha del río en el tramo de caudal reducido, las fuentes usadas para consumo humano de viviendas no conectadas, es usada también para el abastecimiento de establecimientos como lavaderos de vehículos (principalmente camiones y tractomulas que transitan por la autopista Medellín – Bogotá), afectando la cantidad de agua disponible para consumo. En la margen izquierda, el agua del acueducto veredal es usada también para el uso agropecuario (piscícolas), disminuyendo la cantidad de agua para consumo humano; y hay falta de la cultura de pago del acueducto, por lo que su sostenibilidad puede verse comprometida. Adicionalmente, en general en la zona y en particular en algunos subdrenajes se presenta deforestación de vegetación riparia para la expansión de áreas de potreros y cultivos permanentes. El acceso a los charcos o balnearios naturales del río Cocorná se ve afectado por propietarios de predios, los cuales en algunos casos impiden el paso a estos, presentando conflicto por el uso recreativo del río.

Por su parte, en el tema de vertimientos, se reportan Cuatro (4) de ARD directos al tramo de caudal reducido, lo cual puede suponer conflictos por la limitada capacidad de dilución del río en este tramo.

Con la entrada en operación se podrían presentar conflictos de uso en el tramo de caudal reducido, en el cual se alteraría la capacidad de dilución del río limitando la cantidad de vertimientos posibles; sin embargo, con reducción de la población proyectada en las veredas de influencia del proyecto, se espera que la cantidad de permisos de vertimiento otorgados sean mínimos. Por otro lado, debido a que el uso del agua por parte del proyecto para generación de energía es no consuntivo, no habría alteración de la oferta hídrica en tramos del río diferentes al tramo de caudal reducido y, por lo tanto, no se esperan conflictos por fuera de este tramo. En el tramo de caudal reducido se hallan dos sitios utilizados como balnearios naturales reconocidos por la población, con ninguna infraestructura asociada, uso con el cual se podrían esperar conflictos, pero que pueden ser mitigados mediante los Planes de Manejo Ambiental a través de intervenciones mancomunadas, proyecto y comunidad vecina. Por su parte, es importante resaltar que para el proyecto se pueden presentar conflictos de uso del agua en caso de que se concedan concesiones aguas arriba del sitio de captación, principalmente si se otorgan para usos consuntivos ya que esto afectaría directamente la cantidad de agua aprovechable por el proyecto.

5.1.3 Atmósfera

5.1.3.1 Clima

Para llevar a cabo la descripción climática de la cuenca del río Cocorná, se utilizaron los registros de las estaciones meteorológicas del IDEAM. Las características de dichas estaciones y su distribución espacial en dicha cuenca se presentan en la Tabla 5-16 y en la Figura 5-10 respectivamente.

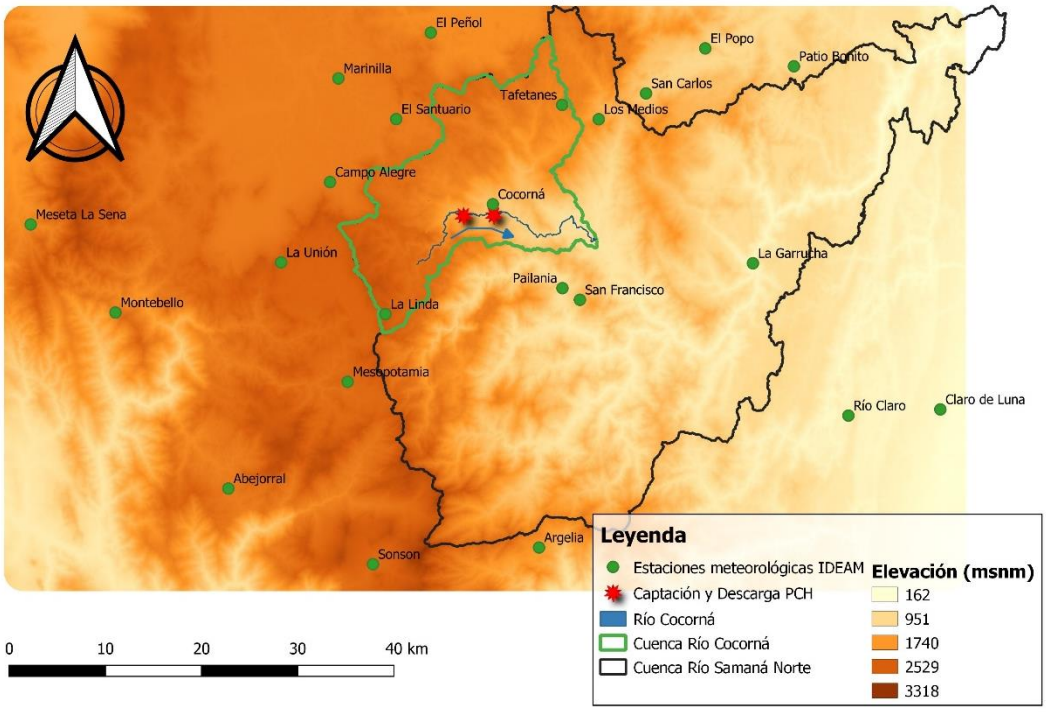


Figura 5-10. Ubicación de las estaciones del IDEAM solicitadas

Tabla 5-16. Características de las estaciones del IDEAM solicitadas

Nombre	Código	Categoría	Tecnología	Altitud	Longitud[1] (m)	Latitud[1] (m)
La Unión	26180170	Pluviométrica	Convencional	2530	855629.8	1155224.9
La Linda	23080790	Pluviométrica	Convencional	2620	866476.8	1149853.8
Patio Bonito	23080800	Pluviográfica	Convencional	975	908966.7	1175582.1
El Peñol	23085110	Climática Ordinaria	Convencional	247	871194.1	1179069.3
Pailania	23087200	Limnimétrica	Convencional	285	884887.1	1152547.8
El Popo	23080930	Pluviográfica	Convencional	110	899745.7	1177440.4
Campo Alegre	23080650	Pluviométrica	Convencional	1850	860718.5	1163558.1

Nombre	Código	Categoría	Tecnología	Altitud	Longitud[1] (m)	Latitud[1] (m)
La Garrucha	23087190	Limnimétrica	Convencional	980	904700.2	1155131.1
Sonson	26180180	Pluviográfica	Convencional	2180	865184.0	1123890.8
Meseta La Sena	27010790	Pluviométrica	Convencional	1700	829584.2	1159164.3
Río Claro	23070020	Pluviométrica	Convencional	449	914631.2	1139319.5
Cocorná	23080750	Pluviométrica	Convencional	1455	877654.4	1161259.9
Argelia	23055070	Meteorológica Especial	Convencional	1755	882455.4	1125623.2
San Carlos	23085220	Climática Principal	Convencional	1113	893584.9	1172769.1
San Carlos**	23085130	Climática Ordinaria	Convencional	160	899745.7	1177440.4
San Carlos*	23080490	Pluviométrica	Convencional	160	899745.7	1177440.4
Abejorral	26180160	Pluviométrica	Convencional	2450	850143.3	1131747.4
Argelia Antioquia	23050420	Pluviográfica	Automática con Telemetría	1740	882467.6	1125613.9
San Francisco	23085140	Climática Ordinaria	Convencional	1325	886705.8	1151340.0
El Santuario	23080920	Pluviográfica	Convencional	1250	867601.0	1170099.3
Marinilla	23080640	Pluviométrica	Convencional	2150	861586.3	1174319.4
Tafetanes	23080820	Pluviométrica	Convencional	2180	884855.9	1171574.9
Los Medios	23080910	Pluviométrica	Convencional	1630	888663.1	1170086.8
Claro de Luna	23070010	Pluviométrica	Convencional	3347	924193.6	1139958.3
Montebello	26180200	Pluviométrica	Convencional	560	838401.0	1150013.7
Mesopotamia	26185020	Climática Ordinaria	Convencional	2408	862551.0	1142823.3

[1] Coordenadas en sistema de referencia Magna Colombia Origen Bogotá EPSG 3116
* Las estaciones San Carlos* y San Carlos** son estaciones independientes de San Carlos y El Popo, poseen diferentes tecnología de recolección de información y están disponibles para diferentes temporadas (ver Tabla 5-25)

5.1.3.1.1 Nubosidad

La nubosidad es una variable atmosférica que expresa la cantidad de nubes en el cielo, expresada en octas (u octavos) de la bóveda celeste (cielo) que se encuentran cubierta por nubes. La unidad octa es discreta y toma valores entre 0 y 8, donde 0 significa que no hay presencia de nubes en el cielo, en el caso que al menos haya una nube pequeña tomaría el valor de 1 octa y si el cielo está totalmente cubierto se registra un valor de 8 octas. Para analizar el comportamiento de la nubosidad en el área de estudio, se utilizó la información de nubosidad registrada en las estaciones

Mesopotamia, El Peñol, San Francisco y San Carlos, de la red de estaciones del IDEAM. Los registros de estas estaciones fueron entregados en agregados mensuales y no diarios, lo cual imposibilita conocer el número de días faltantes para la construcción del registro mensual y limita la discriminación de valores anómalos. Es importante resaltar, que ninguna de las estaciones previamente mencionadas se encuentra dentro de la cuenca de interés (ver Figura 5-11). Dada la naturaleza de esta variable y la resolución temporal de los registros disponibles, para realizar la caracterización de la variación temporal de la misma se hace uso de todos los registros suministrados, puesto que el hecho de que a un año determinado le falten registros, no afecta considerablemente el comportamiento anual multianual de una variable discreta como esta.

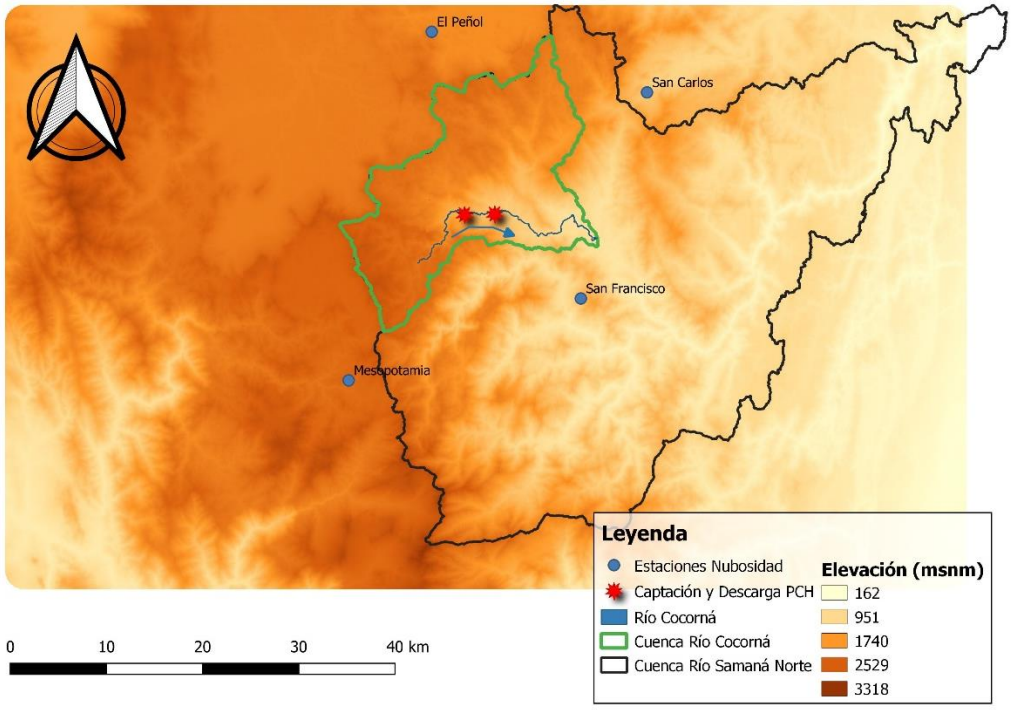


Figura 5-11. Estaciones con registros de nubosidad en la zona de estudio

El análisis exploratorio para identificar saltos en las series se lleva a cabo con los registros de estas a través de curvas de masa simple. Es importante identificar que debido a los meses faltantes de la serie se rompe la continuidad y dada la distancia existente entre las estaciones utilizadas para el análisis se imposibilita llevar a cabo el análisis de doble masa para validar la consistencia de las series. En la Figura 5-12 se presentan las curvas de masa simple para cada una de las estaciones con los espacios asociados a los meses con datos faltantes de nubosidad promedio, mientras que, en la Figura 5-13 se presenta la curva de masa simple de forma continua, luego de que se eliminaran los espacios debidos a los datos faltantes. Es notable que luego

de eliminar los espacios asociados a datos faltantes, se observa consistencia en la serie, puesto que la curva se desarrolla con una pendiente bastante uniforme en el tiempo.

En la Figura 5-13 se evidencia que en general para todas las estaciones la curva de masa simple no presenta saltos considerables y la pendiente de la curva de acumulación es casi constante, sugiriendo de esta forma registros bastante consistentes.

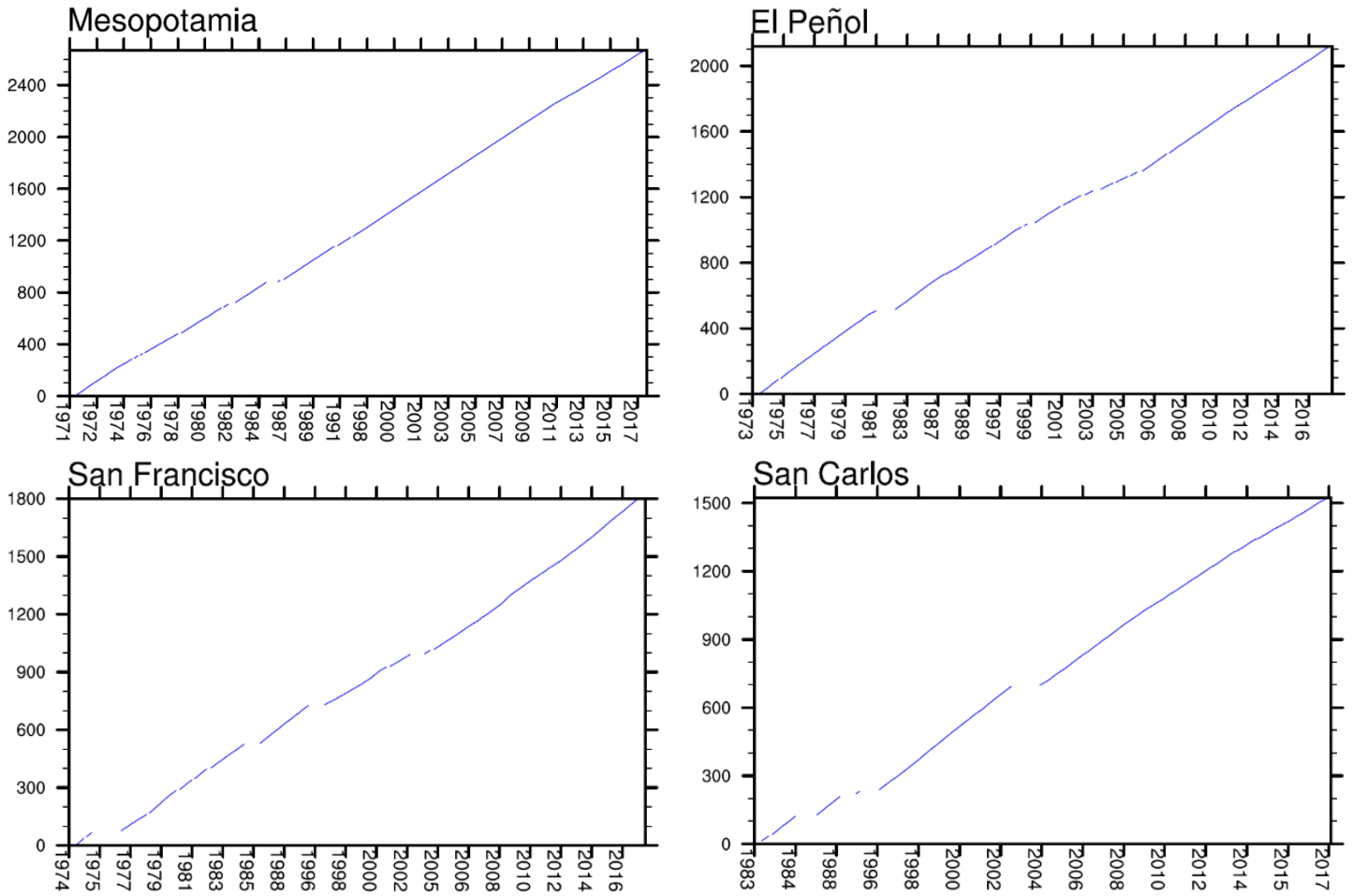


Figura 5-12. Diagramas de masa simple (con meses faltantes) para cada una de las estaciones con registro nubosidad

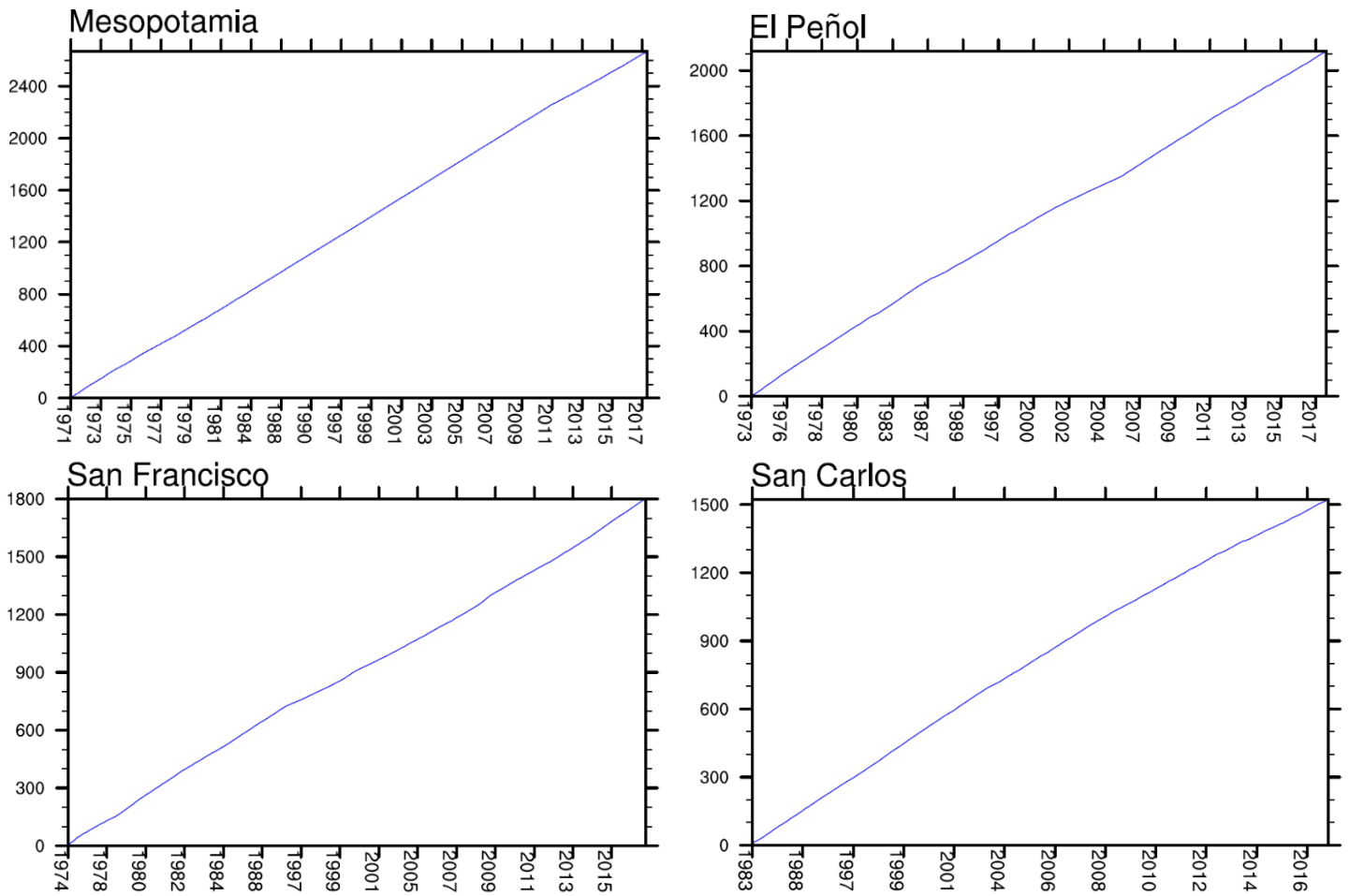


Figura 5-13. Diagramas de masa simple (sin meses faltantes) para cada una de las estaciones con registro de nubosidad

Continuando con el análisis estadístico, en la Figura 5-14 se muestran diagramas de caja y bigote para los registros de cada una de las estaciones, en estos se observa que las medianas varían entre 5 y 6 octas para las estaciones El Peñol y San Carlos, mientras que se mantiene con un valor de 5 durante todos los meses para la estación San Francisco y de 6 para la ubicada en Mesopotamia. En el caso de los valores medios (puntos verdes en la Figura 5-14) se observa que para todas las estaciones esta variable presenta un ciclo anual bimodal con máximos en los periodos marzo-abril y octubre-noviembre, y mínimos en diciembre-enero y junio-julio-agosto, siendo este último el más pronunciado. Asimismo, se observa que la variabilidad de los registros es mucho menor para la serie asociada a la estación Mesopotamia que para las otras tres, esto asociado quizás a su mayor altura sobre nivel del mar respecto a las otras. Para las estaciones El Peñol y San Francisco se encuentra que, tanto en los primeros meses del año como en los últimos, aproximadamente el 75% de los datos corresponde a valores superiores a 5 octas, mientras en el mes de julio el 75% por ciento de los datos presenta registros inferiores o iguales a este valor.

Por otra parte, en la Figura 5-14 las estaciones Mesopotamia, El Peñol y San Carlos, presentan datos atípicos elevados que oscilan alrededor de siete octas y otros más bajos que oscilan alrededor de 2 octas, valores que son posibles en la región para un promedio mensual. Por otro lado, la estación San Francisco entre sus datos atípicos presenta un registro mensual de 8 octas, lo cual implica que durante los 30 días de dicho mes el cielo estuvo completamente nublado, por lo que se considera como un dato erróneo o anómalo. Sin embargo, debido a que no contamos con los registros diarios para validar y ya que este dato no posee suficiente peso para influenciar la media mensual o anual no se eliminan de los registros.

Con el objetivo de complementar el análisis y facilitar la observación de los datos mínimos, medios y máximos de nubosidad en las estaciones analizadas, se presenta la Figura 5-15, donde se muestra el comportamiento promedio mensual multianual, y el asociado a los máximos y mínimos mensuales para esta variable. Tal como se puede apreciar en esta figura, los picos de nubosidad en las estaciones analizadas se presentan principalmente durante las temporadas abril-mayo y octubre-noviembre, épocas que coincide con el paso de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT) sobre la región andina, en la cual se encuentra ubicada la región de interés (Poveda, 2004; Poveda et al., 2005). Por otra parte, los valores mínimos de nubosidad se presentan durante las temporadas en las que la ZCIT se encuentra más alejada hacia el sur (diciembre-enero) o a hacia el norte (julio-agosto).

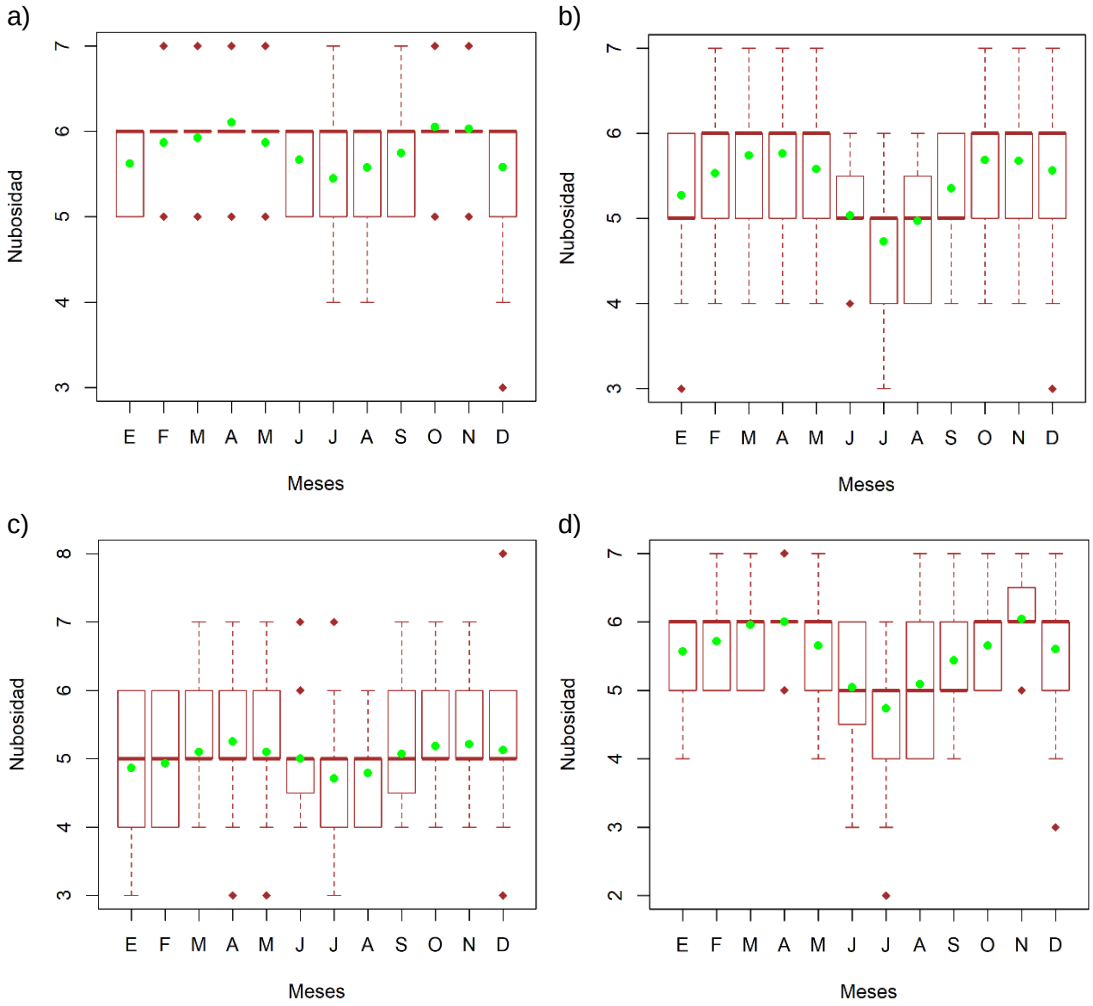


Figura 5-14. Diagramas de caja y bigotes para los registros de nubosidad en las estaciones **a)** Mesopotamia, **b)** El Peñol, **c)** San Francisco y **d)** San Carlos

Los puntos verdes representan los valores medios multianuales para cada mes

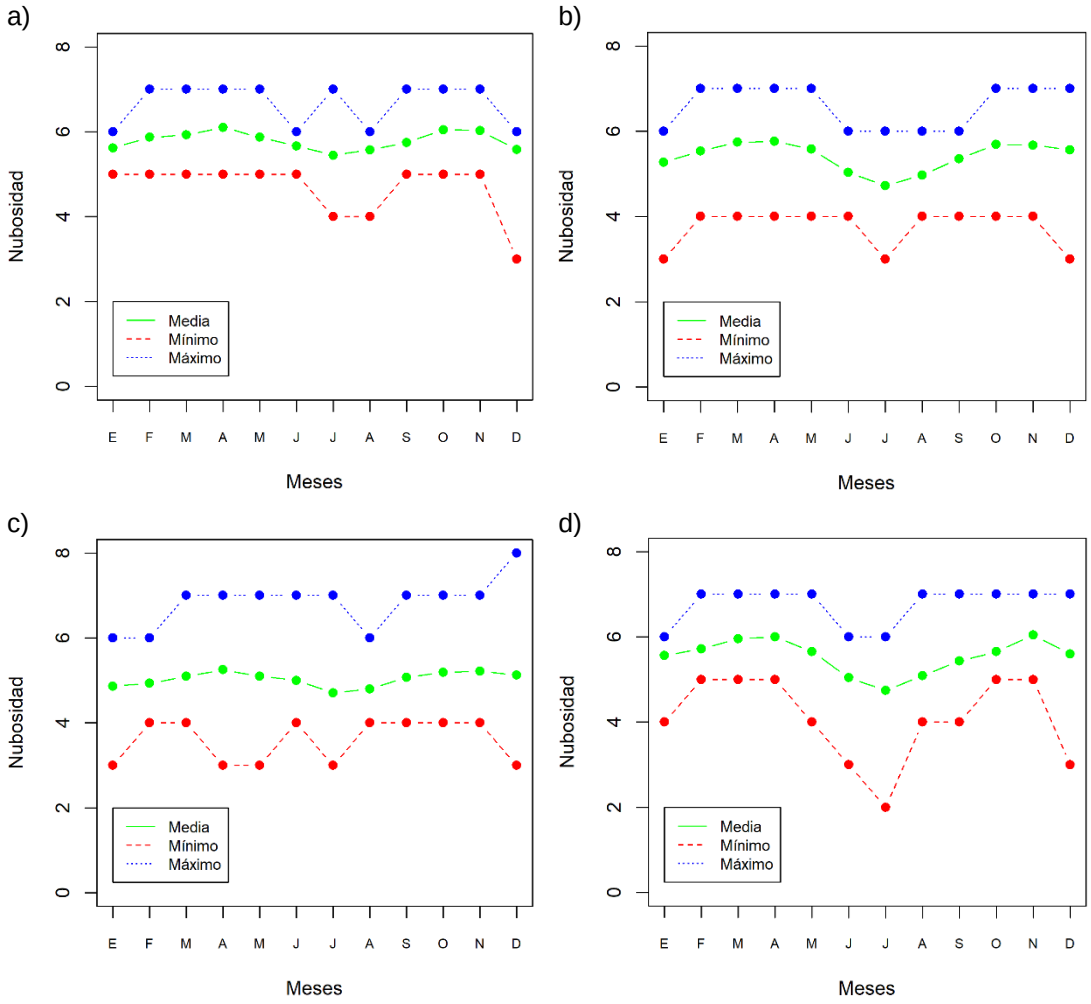


Figura 5-15. Nubosidad mínima, media y máxima de las estaciones **a)** Mesopotamia, **b)** El Peñol, **c)** San Francisco y **d)** San Carlos

Para finalizar el análisis vale la pena indicar, que si bien solo se pudo obtener acceso a los registros de nubosidad de estaciones ubicadas alrededor de la Cuenca del Río Cocorná, esta variable presenta una baja sensibilidad espacial comparada con otras variables como la precipitación, el caudal, la temperatura o la humedad relativa; como se pudo observar en las estaciones analizadas, que en general presentaron comportamientos muy similares, excepto por la estación ubicada en Mesopotamia que se encuentra a una altura mayor sobre el nivel del mar que las otras. Teniendo en cuenta lo anterior, se podría afirmar que para generar cambios significativos en los valores de nubosidad se deben producir grandes desplazamientos o cambios de altura, para que se analice una nueva parte de la bóveda celeste. Lo anterior sugiere que las estaciones analizadas, principalmente las ubicadas en El Peñol, San Francisco y San Carlos, localizadas alrededor de la Cuenca del Río Cocorná pueden

representar aceptablemente el comportamiento de la nubosidad en el área de influencia del Proyecto, sugiriendo así que, en dicha área, esta variable presenta un ciclo anual bimodal con máximos durante abril-mayo y octubre-noviembre y mínimos durante julio y diciembre-enero.

5.1.3.1.2 Humedad relativa

La humedad relativa es una de las variables atmosféricas que se utiliza para medir la cantidad de vapor de agua que contiene una masa de aire, respecto a la cantidad de vapor máxima (estado saturado) que podría contener dicho aire a una temperatura dada. La humedad relativa se expresa en porcentaje (%), y su magnitud es inversamente proporcional al comportamiento de la temperatura: si la temperatura aumenta, la humedad relativa disminuye, mientras que si la temperatura disminuye se produce un aumento de la humedad relativa, puesto que una masa de aire más fría ocupa un menor volumen que una más caliente. Un caso en el que se evidencia el comportamiento descrito es cuando una masa de aire cálido empieza a ascender a través de una barrera orográfica (montañas), a medida que la masa de aire asciende se produce una reducción de la temperatura que propicia la condensación de la masa de aire, es decir, la humedad relativa se hace máxima (100%).

Para el análisis de la distribución temporal de la humedad relativa en la cuenca, se utilizaron los registros disponibles de cuatro estaciones climáticas de la red de monitoreo del IDEAM, de las cuales solo una se encuentra dentro de la Cuenca del Río Samaná Norte, de la que hace parte la Cuenca del Río Cocorná; mientras que las otras tres se encuentran a pocos kilómetros de la divisoria de la Cuenca del Río Samaná Norte. En la Figura 5-16 se presenta la ubicación de las estaciones respecto a las Cuencas del Río Samaná Norte y a la Subcuenca del Río Cocorná. Adicionalmente, en Tabla 5-17 la se muestra un resumen de la longitud de las series y el número de años sin registros para cada estación. Tal como se puede evidenciar en la Tabla 5-17, todas las series presentan una longitud de registros de al menos 35 años. Registros que cuentan con datos en una escala temporal diaria.

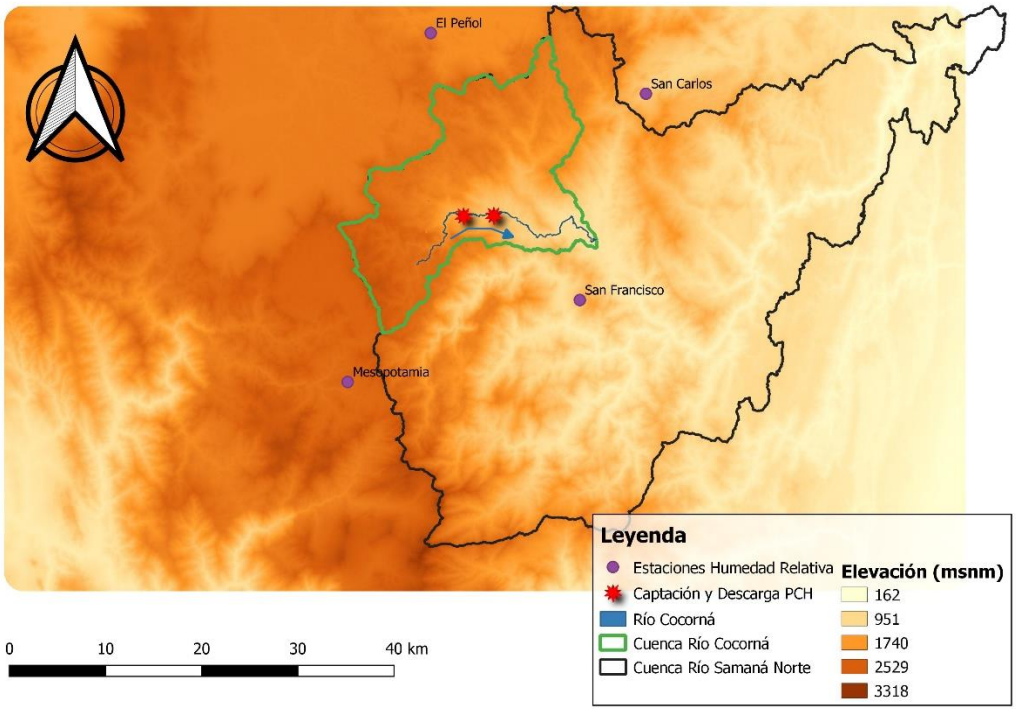


Figura 5-16. Estaciones de con registros de humedad relativa en la zona de estudio.

Tabla 5-17 Longitud de las series de humedad relativa por estación

Estación	Año inicio	Año final	Rango de años	Años faltantes
Mesopotamia	1978	2017	40	2
El Peñol	1978	2017	40	0
San Francisco	1977	2017	41	2
San Carlos	1983	2017	35	0

La longitud de las series es un criterio para seleccionar o descartar los registros de una determinada estación. Sin embargo, es fundamental conocer la cantidad de datos faltantes que presenta la serie. Debido a lo anterior, el análisis de la Tabla 5-17 se complementa con la construcción de la Tabla 5-18 al detallar el número de datos faltantes por año para cada una de las estaciones. En esta última tabla también se puede apreciar el porcentaje de faltantes, clasificado en escala de grises, en donde el gris oscuro equivale a años sin registros (100% de faltantes) y el blanco a años con todos los registros (0% de faltantes).

Tabla 5-18 Datos faltantes en serie de registros diarios de humedad relativa para las estaciones Mesopotamia, El Peñol, San Francisco y San Carlos

Año	Mesopotamia		El Peñol		San Francisco		San Carlos	
	#Días Faltantes	Porcentaje	#Días Faltantes	Porcentaje	#Días Faltantes	Porcentaje	#Días Faltantes	Porcentaje
1977	NA	NA	NA	NA	338	92.6	NA	NA
1978	6	1.64	4	1.1	284	77.81	NA	NA
1979	145	39.73	51	13.97	62	16.99	NA	NA
1980	NA	NA	227	62.02	149	40.71	NA	NA
1981	52	14.25	157	43.01	15	4.11	NA	NA
1982	131	35.89	316	86.58	13	3.56	NA	NA
1983	83	22.74	9	2.47	33	9.04	281	76.99
1984	123	33.61	11	3.01	26	7.1	26	7.1
1985	177	48.49	8	2.19	155	42.47	68	18.63
1986	NA	NA	58	15.89	NA	NA	43	11.78
1987	303	83.01	39	10.68	NA	NA	34	9.32
1988	324	88.52	13	3.55	31	8.47	100	27.32
1989	40	10.96	32	8.77	24	6.58	285	78.08
1990	37	10.14	23	6.3	215	58.9	57	15.62
1991	33	9.04	14	3.84	38	10.41	80	21.92
1992	20	5.46	17	4.64	31	8.47	25	6.83
1993	21	5.75	18	4.93	122	33.42	37	10.14
1994	19	5.21	8	2.19	27	7.4	71	19.45
1995	25	6.85	8	2.19	9	2.47	17	4.66
1996	32	8.74	18	4.92	13	3.55	61	16.67
1997	28	7.67	13	3.56	3	0.82	10	2.74
1998	29	7.95	41	11.23	22	6.03	20	5.48
1999	28	7.67	123	33.7	16	4.38	6	1.64
2000	15	4.1	7	1.91	13	3.55	5	1.37
2001	8	2.19	55	15.07	13	3.56	15	4.11
2002	6	1.64	18	4.93	0	0	3	0.82
2003	6	1.64	103	28.22	3	0.82	347	95.07
2004	0	0	49	13.39	4	1.09	111	30.33
2005	1	0.27	82	22.47	1	0.27	3	0.82
2006	6	1.64	62	16.99	180	49.32	3	0.82

Año	Mesopotamia		El Peñol		San Francisco		San Carlos	
	#Días Faltantes	Porcentaje	#Días Faltantes	Porcentaje	#Días Faltantes	Porcentaje	#Días Faltantes	Porcentaje
2007	29	7.95	126	34.52	105	28.77	2	0.55
2008	54	14.75	167	45.63	27	7.38	0	0
2009	30	8.22	136	37.26	103	28.22	12	3.29
2010	5	1.37	19	5.21	19	5.21	11	3.01
2011	14	3.84	34	9.32	13	3.56	9	2.47
2012	63	17.21	40	10.93	7	1.91	11	3.01
2013	56	15.34	4	1.1	6	1.64	6	1.64
2014	12	3.29	2	0.55	0	0	1	0.27
2015	10	2.74	1	0.27	1	0.27	0	0
2016	14	3.83	2	0.55	1	0.27	1	0.27
2017	72	19.73	58	15.89	153	41.92	64	17.53

Los grises indican el porcentaje de días faltantes, donde el gris oscuro representa un 100% de faltantes y el blanco representa un 0% de faltantes

Para definir umbral máximo aceptable de datos faltantes por año en una serie, se tienen en cuenta las características de la variable estudiada (humedad relativa). La humedad relativa, por ejemplo, es una variable independiente de la dimensión espacial, característica definida en algunas áreas de estudio como variables intensivas. Lo anterior significa que para estudiar el comportamiento de la humedad relativa no se realiza la acumulación de la variable, pues no tiene ningún sentido físico estudiar cuál es la suma de la humedad relativa diaria promedio durante un mes. Algo que sí sucede para las variables definidas como extensivas, las cuales dependen de la magnitud espacial y se pueden acumular, como ejemplo la precipitación. Para esta última variable si se habla de valores acumulados mensuales y/o anuales.

Luego de tener claro que la humedad relativa es una variable que no necesita la acumulación de los registros para ser analizada, se puede concluir que para estudiar variables intensivas (humedad relativa, temperatura, presión atmosférica, nubosidad, entre otras) se pueden trabajar con series que presenten un mayor número de faltantes que las asociadas a variables extensivas (precipitación o evaporación). Como consecuencia del anterior argumento, para el análisis de la humedad relativa se considerarán los años que posean al menos el 70% de los registros. Este último criterio se cumple para todas las estaciones en consideración.

Para el caso de la humedad relativa por ser una variable instantánea e intensiva (no acumulada), se tienen en cuenta para el análisis aquellos años de registro con hasta el 30% de datos faltantes. En la Tabla 5-18 se observa que el número de años que superan el umbral del 30% es de 6 para la estación Mesopotamia, 7 para la estación El Peñol, 8 para la estación San Francisco y 4 para la estación San Carlos. Es de resaltar, que de estos años 2 de los de Mesopotamia superan el 80%, 4 de los de El

Peñol el 40%, 7 de los de San Francisco el 40% y 3 de los de San Carlos el 70% del porcentaje de datos faltantes. Así, teniendo en cuenta los años dentro del periodo sin registro (los NA) y los descartados por contener altos porcentajes de datos faltantes, se llega finalmente a que la estación Mesopotamia queda con el 80% de los años de registro, El Peñol con el 82,5%, San Francisco 71,6% y San Carlos 88,6%.

Para verificar la consistencia de los registros de las estaciones Mesopotamia, El Peñol, San Francisco y San Carlos, se construyen diagramas de masa simple, mostrados en la Figura 5-17. Los diagramas muestran que las cuatro estaciones analizadas no presentan saltos considerables, puesto que las pendientes de las curvas de acumulación son casi constantes, sugiriendo así que los registros analizados mantienen consistencia en el tiempo.

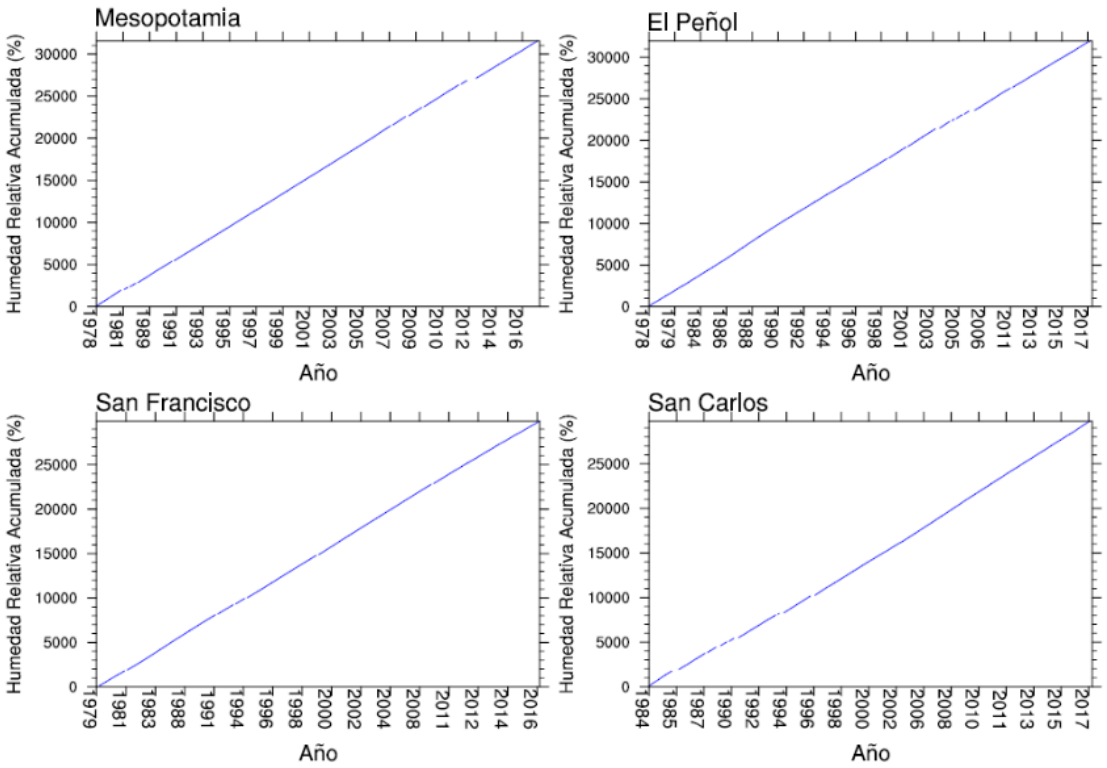


Figura 5-17. Diagramas de masa simple para cada una de las estaciones con registro de humedad relativa

El estudio descriptivo de las series, así como la identificación de datos atípicos de cada una de las estaciones, se lleva a cabo con el diagrama de cajas y bigotes (boxplot). En la Figura 5-18 se presentan los boxplots correspondientes a todos los registros diarios de las estaciones de análisis. En esta figura se puede apreciar que los datos de humedad relativa varían entre el 70% y el 100% para las estaciones Mesopotamia y San Francisco, y entre aproximadamente el 60% y el 100% para las

estaciones El Peñol y San Carlos. Las cuatro estaciones analizadas registran los menores valores de humedad relativa durante la mitad del año (julio y agosto), mostrando que durante esta época el 50% de los registros se encuentran por debajo de aproximadamente el 82% de humedad relativa para las estaciones El Peñol y San Carlos, mientras que para la estación San Francisco se encuentra por debajo del 86% y para Mesopotamia del 83%. Los puntos verdes en los gráficos representan los valores medios diarios mensuales multianuales para cada una de las estaciones. El comportamiento asociado a estos puntos sugiere un ciclo anual bimodal con los mínimos durante julio, y máximos durante noviembre y abril. En el caso de los datos atípicos, todos se identifican en la parte baja del diagrama para las estaciones analizadas (i.e. corresponden a valores mínimos), excepto para la estación San Carlos, en la que se encuentran 4 de estos valores en la parte superior del diagrama. Este resultado es esperable, dado que el máximo valor que puede tomar la variable es del 100%.

Todos los valores atípicos observados en la figura pueden ser valores posibles en la región analizada, excepto el valor inferior al 20% registrado en el mes de noviembre por la estación San Francisco, puesto que valores de humedad relativa tan bajos están asociados a zonas muy secas y muy cálidas. Dado esto, se compara con los registros de temperatura (numeral 5.1.3.1.3 Temperatura) y se encontró que ninguno de los valores de temperatura registrados durante el mes de noviembre presenta un valor atípico relacionado con el valor atípico de humedad relativa por lo que se considera que este último es un dato erróneo.

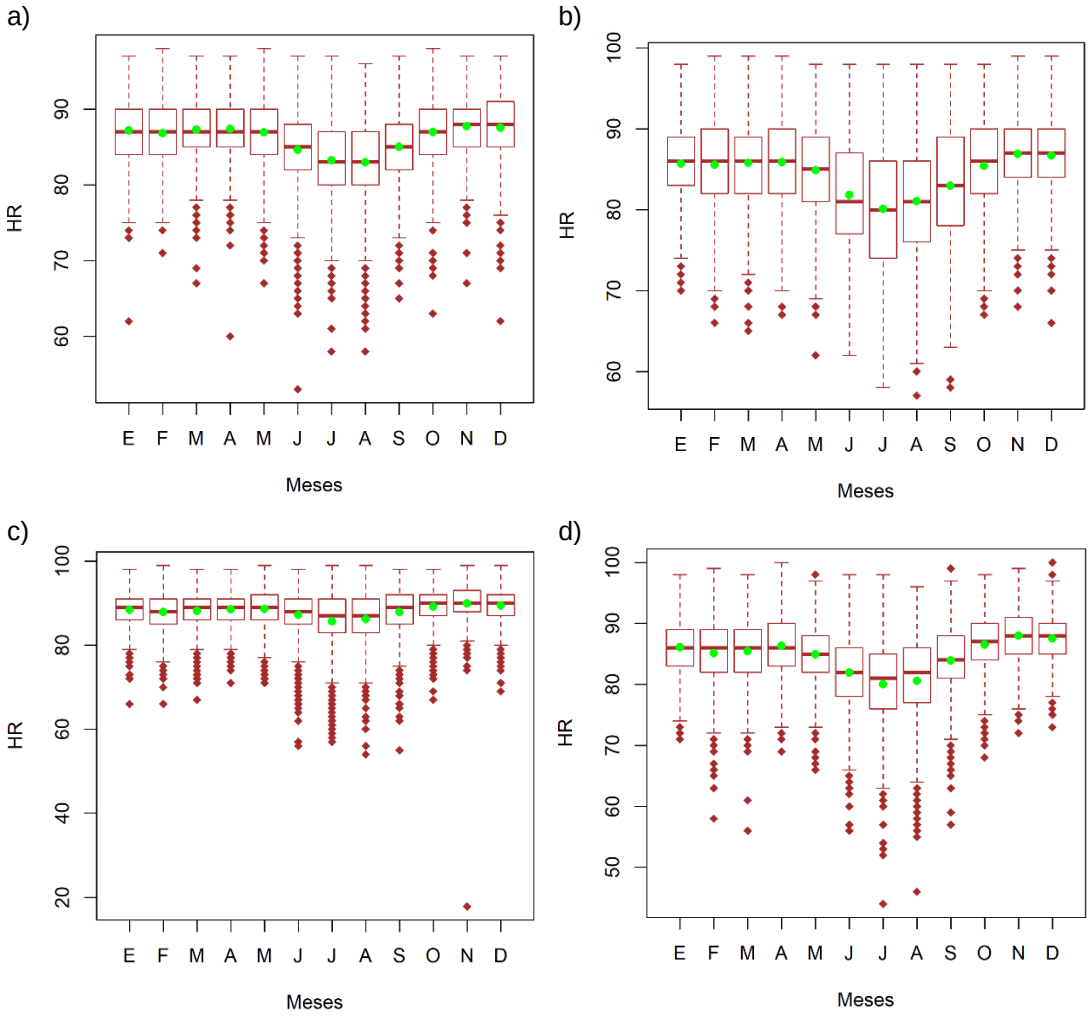


Figura 5-18. Diagrama de cajas y bigotes para registros diarios de humedad relativa (%) en las estaciones a) Mesopotamia, b) El Peñol, c) San Francisco y d) San Carlos

Los puntos verdes representan los valores medios multianuales para cada mes

Por otra parte, en la Figura 5-19 se presentan diagramas de caja y bigote de los promedios mensuales de las series diarias luego de ser llenadas, para cada una las estaciones. Esta figura se construye con la finalidad de analizar la variabilidad de la humedad relativa en la escala mensual. En Figura 5-19 se evidencia una reducción del rango intercuartil para los promedios mensuales respecto a la series diarias (Figura 5-18), pasando de 70-100% a aproximadamente 75-95% para las estaciones Mesopotamia y San Francisco, y de 60-100% a 70-93% para las estaciones El Peñol y San Carlos. En el número de valores atípicos también se observa una reducción sustancial con respecto a los diagramas de caja y bigotes diarios (Figura 5-18). Esto último es un resultado esperable, dado que al promediar los valores diarios de un mes determinado se consigue suavizar el registro y minimizar el ruido o dispersión asociado a la variabilidad diaria. Finalmente, se observa que los ciclos anuales

presentan un comportamiento consistente entre los registros diarios y los mensuales, presentándose para todas las estaciones ciclos anuales bimodales con mínimos pronunciados en la mitad del año y máximo en las temporadas noviembre-diciembre y abril-mayo.

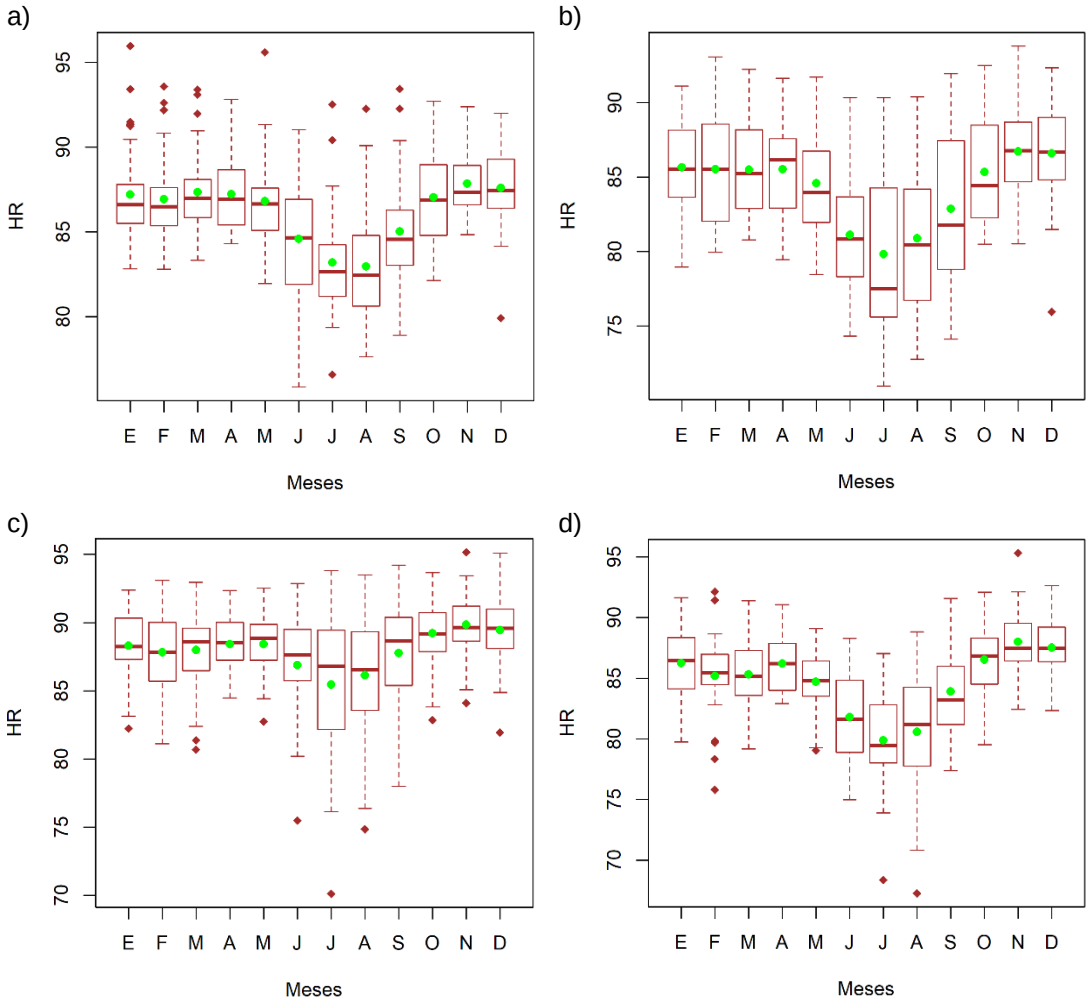


Figura 5-19. Diagrama de cajas y bigotes para registros mensuales de humedad relativa (%) en las estaciones a) Mesopotamia, b) El Peñol, c) San Francisco y d) San Carlos

Los puntos verdes representan los valores medios multianuales para cada mes

Con el objetivo de complementar el análisis y facilitar la observación de los datos mínimos, medios y máximos de humedad relativa en las estaciones analizadas, se presenta la Figura 5-20, donde se muestra el comportamiento promedio mensual multianual, y el asociado a los valores máximos y mínimos diarios mensuales multianuales para esta variable en cada una de las estaciones analizadas.

Tal como se puede apreciar en la Figura 5-20, los picos en los valores medios de humedad relativa en las estaciones analizadas se presentan principalmente durante los meses de abril y noviembre, meses que coincide con el paso de la ZCIT sobre la región andina, la cual influencia fuertemente la saturación del aire en la zona (aumento en la humedad relativa) a través de cambios de presión y temperatura. Los valores mínimos se presentan durante las temporadas en las que la ZCIT se encuentra más alejada hacia el norte (julio-agosto) o a hacia el sur (diciembre-enero) (Poveda, 2004; Poveda et al., 2005). Es de resaltar que los valores máximos de esta variable son muy monótonos, registrando valores cercanos a 100% durante todo el año, resultado esperable, dado que la probabilidad que un día en todos los registros de un mes determinado contengan un valor alto de humedad relativa es bastante alta. En el caso de los valores medios se encuentra que oscilan entre 80 y 90% con un comportamiento unimodal muy marcado, mientras que los mínimos oscilan entre 65 y 70% para las estaciones El Peñol y San Francisco y entre 45 y 70% para Mesopotamia y San Carlos.

Finalmente, aunque se encuentran variaciones notables entre los registros de las estaciones analizadas, estos presentan comportamientos similares en la escala anual y mensual. Lo que nos permite suponer que para el caso de la Cuenca del Río Cocorná, ubicada en medio de estas estaciones que se encuentran distanciadas entre sí por varios kilómetros, se podría esperar un comportamiento similar de la humedad relativa en estas escalas de tiempo (anual y mensual).

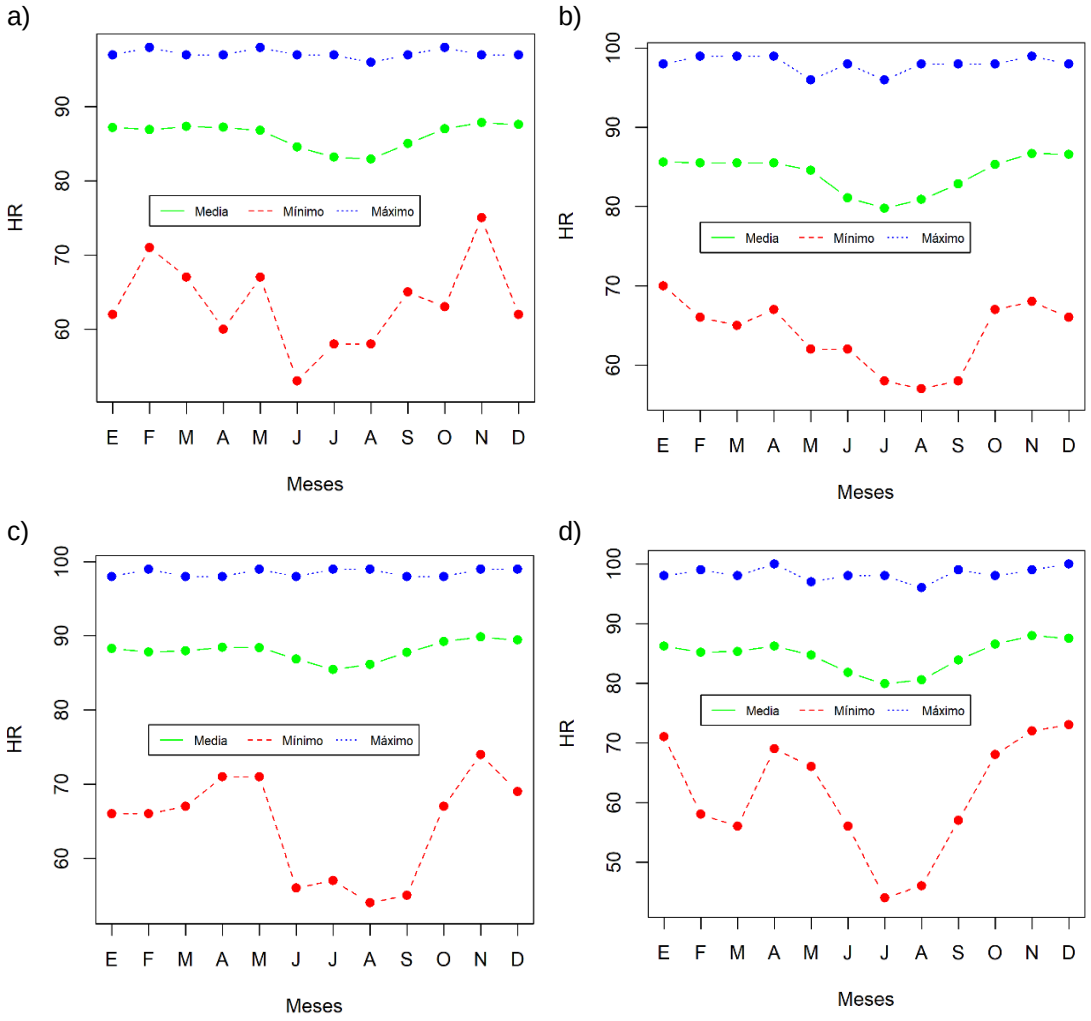


Figura 5-20. Ciclos anuales de valores medios (verdes), máximos (azulos) y mínimos de humedad relativa (%), en las estaciones a) Mesopotamia, b) El Peñol, c) San Francisco y d) San Carlos

5.1.3.1.3 Temperatura

Para llevar a cabo la caracterización temporal de la temperatura en la Cuenca del Río Cocorná se utilizan los registros de las estaciones Mesopotamia, El Peñol, San Francisco y San Carlos suministrados por el IDEAM. De estas estaciones solo una se encuentra dentro de la Cuenca del Río Samaná Norte, de la cual hace parte la Cuenca del Río Cocorná; mientras que las otras tres se encuentran a pocos kilómetros de la divisoria de la Cuenca del Río Samaná Norte. En la Figura 5-21 se presenta la ubicación de las estaciones respecto a las Cuencas del Río Samaná Norte y a la Subcuenca del Río Cocorná. Adicionalmente, en la Tabla 5-19 se muestra un resumen de la longitud de las series y el número de años sin registros para cada estación.

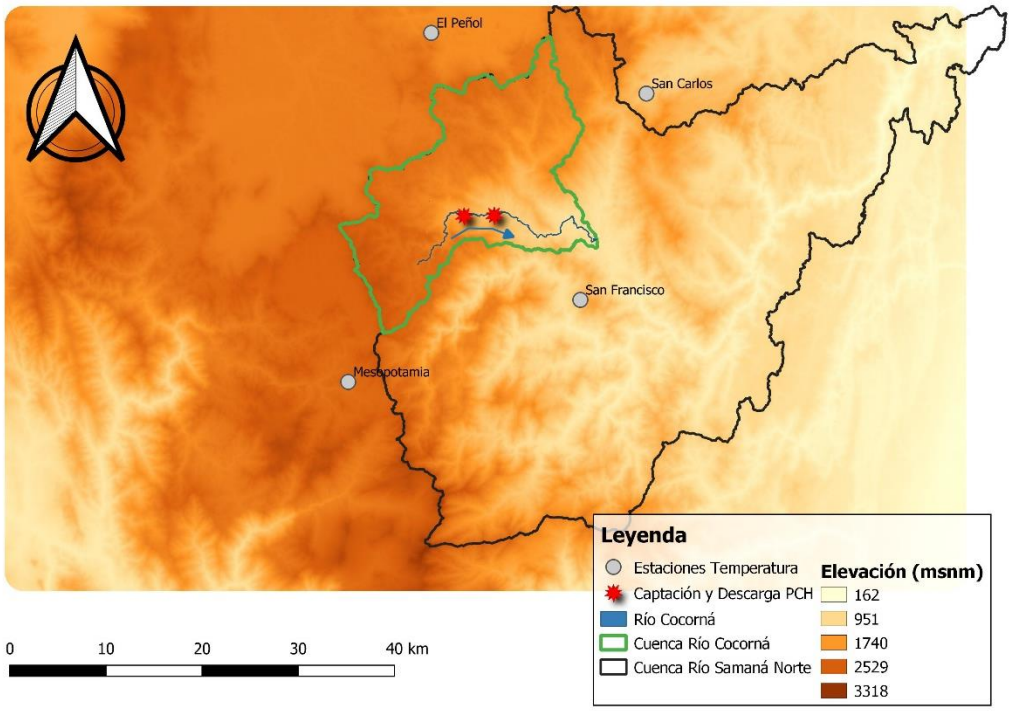


Figura 5-21. Ubicación estaciones de temperatura en la zona de estudio

Tabla 5-19. Longitud de las series de temperatura por estación

Estación	Año inicio	Año final	Rango de años	Años faltantes
Mesopotamia	1978	2017	40	2
El Peñol	1978	2017	40	0
San Francisco	1977	2017	41	0
San Carlos	1983	2017	35	0

En la Tabla 5-20 se presenta el número de años para los que se tiene registros de temperatura media diaria en las estaciones analizadas, además del porcentaje de datos faltantes asociados a cada uno de los años en dichos registros. La temperatura es una variable de estado de la cual depende la humedad relativa, y se encuentra clasificada entre las variables instantáneas e intensivas, por lo que el umbral para descartar meses de los registros por presencia de datos faltantes se asume de forma similar al caso de la humedad relativa (como se explicó en el numeral 5.1.3.1.2 Humedad relativa). La Tabla 5-20 muestra que en el caso de las estaciones San Francisco y Mesopotamia, 6 de los años analizados superan el umbral seleccionado (30%), presentándose porcentajes de datos faltantes de hasta el 84,93%. El valor de 92,6% asociado al año 1977 en la estación San Francisco se relaciona principalmente

a que los registros se empezaron a tomar a finales de dicho año y no a fallas en los equipos. Por otra parte, en las estaciones El Peñol y San Carlos se encuentra que 4 de los años de cada uno de los registros superan el umbral; es de destacar que de las estaciones analizadas, la que cuenta con menor cantidad de registros es San Carlos. Se llega finalmente a que la estación Mesopotamia queda con el 78,9% de los años de registro, El Peñol con el 90,0%, San Francisco 85,4% y San Carlos 88,6%, de los registros reportados en la Tabla 5-17.

Tabla 5-20 Datos faltantes en serie de registros diarios de temperatura para las estaciones Mesopotamia, El Peñol, San Francisco y San Carlos

Años	Mesopotamia		El Peñol		San Francisco		San Carlos	
	#Días Faltantes	Porcentaje	#Días Faltantes	Porcentaje	#Días Faltantes	Porcentaje	#Días Faltantes	Porcentaje
1977	NA	NA	NA	NA	338	92.6	NA	NA
1978	6	1.64	4	1.1	284	77.81	NA	NA
1979	144	39.45	47	12.88	58	15.89	NA	NA
1980	NA	NA	199	54.37	125	34.15	NA	NA
1981	52	14.25	175	47.95	15	4.11	NA	NA
1982	153	41.92	316	86.58	310	84.93	NA	NA
1983	82	22.47	9	2.47	33	9.04	185	50.68
1984	121	33.06	10	2.73	11	3.01	23	6.28
1985	174	47.67	5	1.37	6	1.64	79	21.64
1986	NA	NA	18	4.93	3	0.82	45	12.33
1987	303	83.01	8	2.19	13	3.56	30	8.22
1988	324	88.52	12	3.28	31	8.47	89	24.32
1989	39	10.68	12	3.29	6	1.64	280	76.71
1990	35	9.59	12	3.29	201	55.07	51	13.97
1991	19	5.21	13	3.56	38	10.41	62	16.99
1992	20	5.46	16	4.37	28	7.65	22	6.01
1993	21	5.75	17	4.66	9	2.47	23	6.3
1994	18	4.93	7	1.92	24	6.58	61	16.71
1995	23	6.3	6	1.64	9	2.47	14	3.84
1996	31	8.47	17	4.64	13	3.55	14	3.83
1997	28	7.67	10	2.74	3	0.82	7	1.92
1998	29	7.95	40	10.96	21	5.75	18	4.93
1999	28	7.67	122	33.42	11	3.01	5	1.37
2000	13	3.55	4	1.09	1	0.27	3	0.82
2001	7	1.92	15	4.11	1	0.27	9	2.47

Años	Mesopotamia		El Peñol		San Francisco		San Carlos	
	#Días Faltantes	Porcentaje	#Días Faltantes	Porcentaje	#Días Faltantes	Porcentaje	#Días Faltantes	Porcentaje
2002	6	1.64	10	2.74	0	0	2	0.55
2003	5	1.37	96	26.3	0	0	347	95.07
2004	0	0	27	7.38	1	0.27	121	33.06
2005	1	0.27	10	2.74	1	0.27	3	0.82
2006	4	1.1	59	16.16	4	1.1	2	0.55
2007	1	0.27	43	11.78	2	0.55	0	0
2008	6	1.64	6	1.64	2	0.55	3	0.82
2009	3	0.82	34	9.32	1	0.27	2	0.55
2010	4	1.1	17	4.66	11	3.01	0	0
2011	12	3.29	32	8.77	6	1.64	0	0
2012	25	6.83	37	10.11	6	1.64	8	2.19
2013	29	7.95	3	0.82	0	0	1	0.27
2014	11	3.01	1	0.27	0	0	0	0
2015	9	2.47	1	0.27	1	0.27	0	0
2016	13	3.55	1	0.27	0	0	0	0
2017	72	19.73	56	15.34	153	41.92	62	16.99

Los grises indican el porcentaje de días faltantes, donde el gris oscuro representa un 100% de faltantes y el blanco representa un 0% de faltantes

Para verificar la consistencia de los registros de las estaciones se construyen diagramas de masa simple, mostrados en la Figura 5-23. Estos diagramas muestran que las cuatro estaciones analizadas no presentan saltos considerables, puesto que las pendientes de las curvas de acumulación son casi constantes, sugiriendo así que los registros analizados mantienen consistencia en el tiempo. Se destaca que las irregularidades más notables se presentan en la figura asociada a la estación El Peñol, lo que responde principalmente a la discontinuidad presente en el diagrama por el número de datos faltantes en el registro.

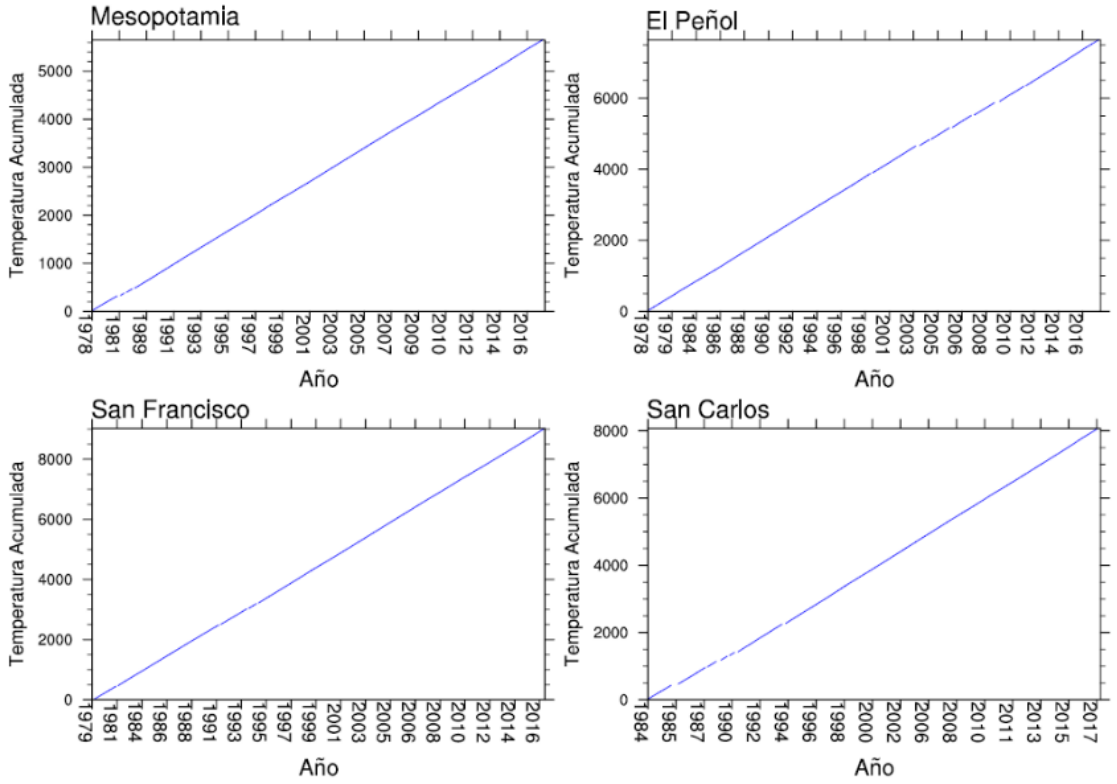


Figura 5-22. Diagramas de masa simple para cada una de las estaciones con registro de temperatura (°C)

La Figura 5-23 presenta la variabilidad diaria mensual asociada a las series de tiempo de cada una de las estaciones de análisis. En la figura se observa que los datos de las estaciones San Francisco y San Carlos varían entre 19 y 26°C aproximadamente, mientras que para las estaciones El Peñol y Mesopotamia la variación está entre 15 y 22°C y entre 12 y 18°C, respectivamente. Es de notar, que para todas las estaciones en la mayoría de los meses los valores medios (puntos verdes) son muy similares a las medianas, sugiriendo que el valor medio a pesar de no ser una medida robusta no está siendo afectado de manera significativa por la presencia de valores atípicos. Asimismo, se observa que para el caso de la estación Mesopotamia, la temperatura presenta un comportamiento bimodal con valores mínimos durante julio y noviembre y máximos durante agosto y mayo. No obstante, para las estaciones restantes (El Peñol, San Francisco y San Carlos) se observan comportamientos similares entre ellas con valores máximos de temperatura durante la mitad del año (junio-julio-agosto) y mínimos durante el mes de noviembre. Comportamiento que es consistente con el mostrado anteriormente para los registros de humedad relativa en estas tres estaciones, puesto que la humedad relativa es mínima durante la mitad del año y presenta valores más altos durante el mes de noviembre, lo cual está acorde con la relación inversa entre estas dos variables, dado que una atmosfera más fría se satura más rápido.

En el caso de los datos atípicos, se encuentra que la gran mayoría de ellos son plausibles en la zona de estudio, aunque el valor de temperatura de 6°C presente durante el mes de junio en los registros de la estación Mesopotamia se podría asociar a un dato erróneo o a un valor extremo, por lo que para los análisis siguientes será descartado. Por otro lado, es de notar que en la estación San Francisco durante los meses de agosto y septiembre se observan varios eventos atípicos de temperaturas mínimas que no son reportados por la estación San Carlos a pesar de la cercanía espacial.

Al igual que con los análisis de nubosidad y humedad relativa las estaciones El Peñol, San Francisco y San Carlos presentan comportamientos bastante similares en los registros de temperatura, mientras que la estación Mesopotamia presenta un comportamiento ligeramente diferente, el cual se podría asociar principalmente a la diferencia de alturas entre las ubicaciones de las estaciones.

Para realizar un análisis en la escala mensual se construye la Figura 5-24, en la que se presentan diagramas de caja y bigotes para los promedios mensuales de las series diarias luego de ser llenadas para cada una las 4 estaciones. Al comparar las Figura 5-23 y Figura 5-24 se observa que la variabilidad asociada a la escala mensual es mucho menor que la asociada a la escala diaria, encontrando variaciones en la escala mensual entre 13,5 y 16°C para Mesopotamia, 16 y 20°C para El Peñol y 20 y 24 para San Francisco y San Carlos. El comportamiento anual de la temperatura para la estación Mesopotamia presenta un ciclo bimodal con máximos en mayo y agosto, siendo el primero más pronunciado que el segundo; y mínimos en julio y noviembre, siendo este último el que presenta las temperaturas más bajas. Para el caso de las estaciones El Peñol, San Francisco y San Carlos, el anual ciclo es casi unimodal con máximos durante la mitad del año (junio-julio) y mínimos durante el mes de noviembre.

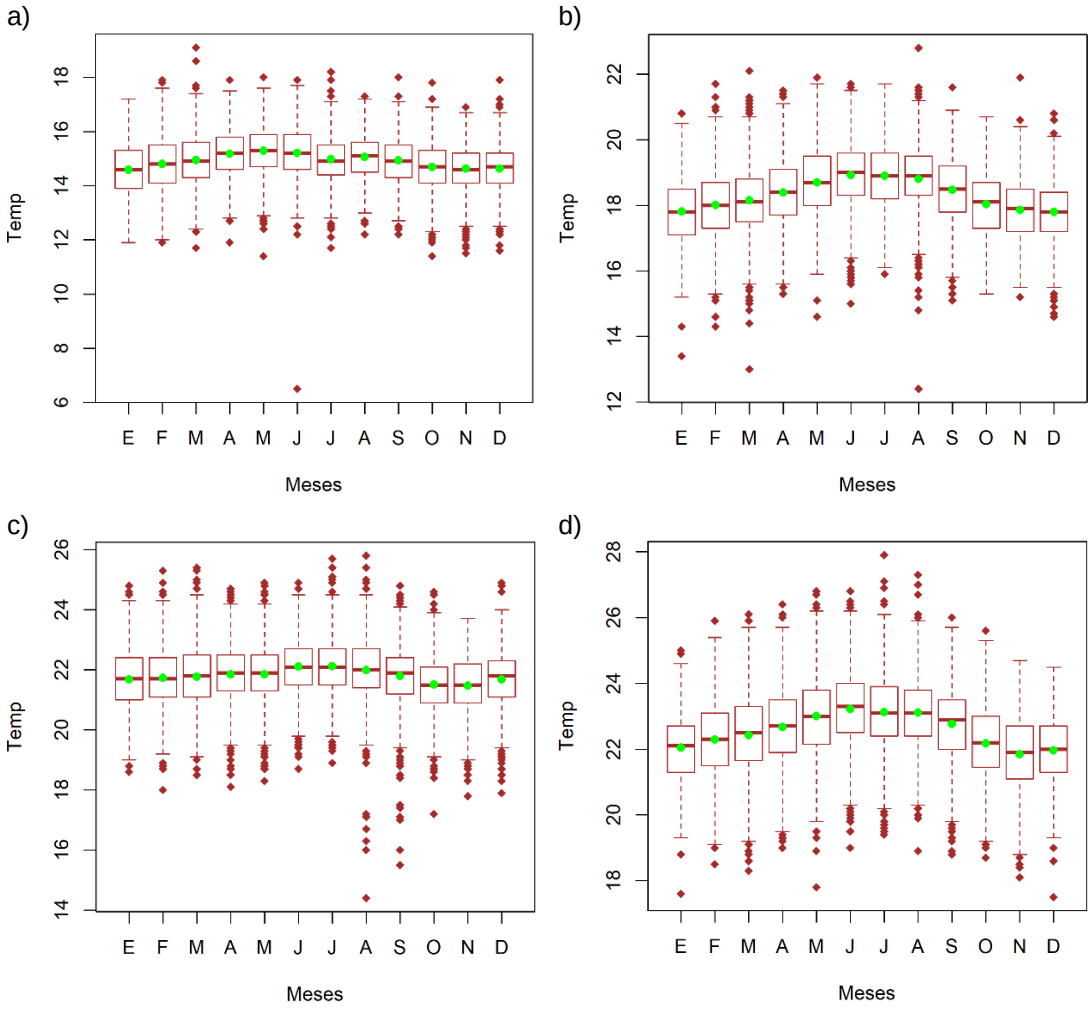


Figura 5-23. Diagrama de cajas y bigotes para los registros medios diarios de temperatura (°C) en las estaciones a) Mesopotamia, b) El Peñol, c) San Francisco y d) San Carlos

Los puntos verdes representan los valores medios multianuales para cada mes

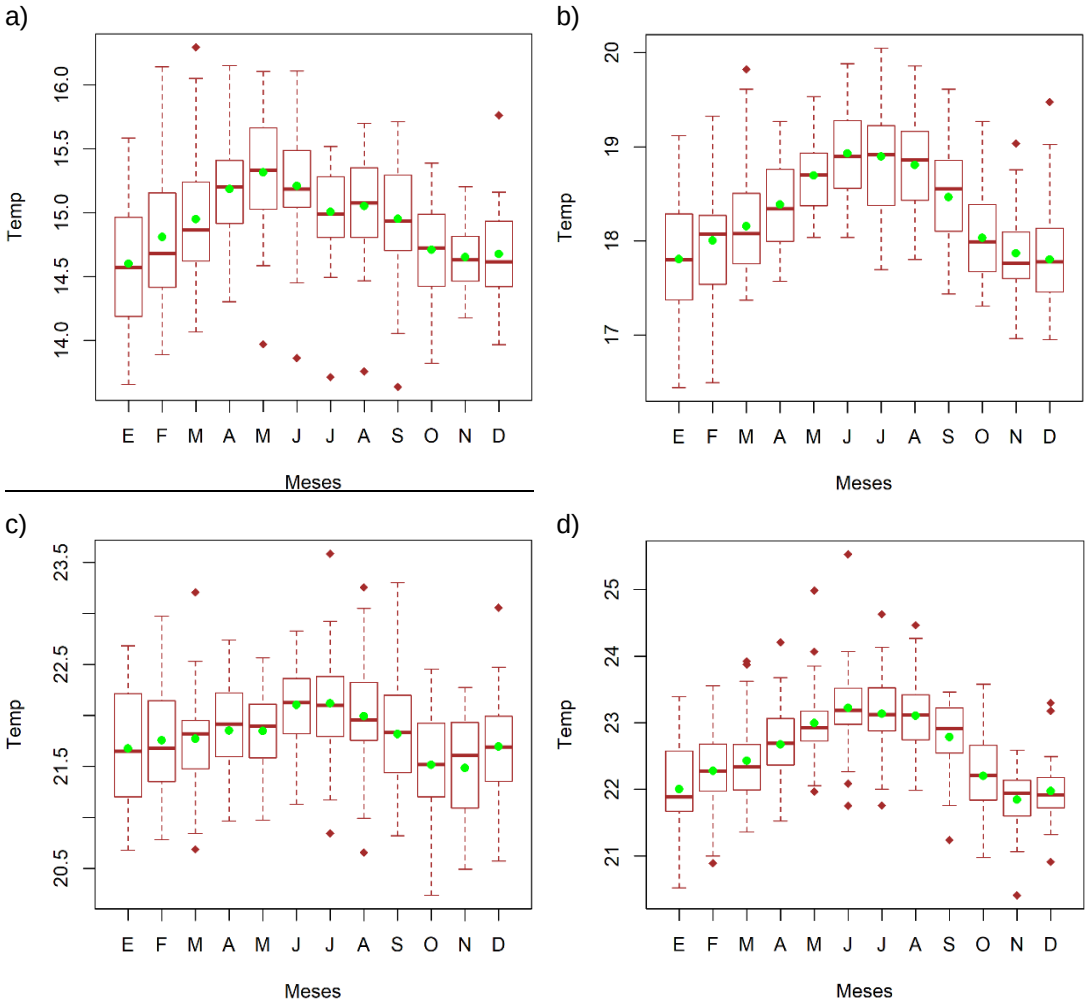


Figura 5-24. Diagrama de cajas y bigotes para los registros medios mensuales de temperatura (°C) en las estaciones a) Mesopotamia, b) El Peñol, c) San Francisco y d) San Carlos

Los puntos verdes representan los valores medios multianuales para cada mes

Con el objetivo de complementar el análisis y facilitar la observación de los datos mínimos, medios y máximos de temperatura en las estaciones analizadas, se presenta la Figura 5-25, donde se muestra el comportamiento promedio mensual multianual y el asociado a los máximos y mínimos diarios mensuales multianuales para esta variable. Los resultados que se observan en esta figura son completamente consistentes con los descritos en la figura anterior, mostrando que los máximos multianuales oscilan entre 17°C y 19°C en la estación Mesopotamia, 20°C y 23°C en El Peñol, 24°C y 26°C en San Francisco y 24°C y 28°C en San Carlos; mientras que para los valores mínimos los rangos oscilan aproximadamente entre 11°C y 13°C para Mesopotamia, 12°C y 16°C para El Peñol, 14°C y 20°C para San Francisco y 17°C y 20°C para San Carlos.

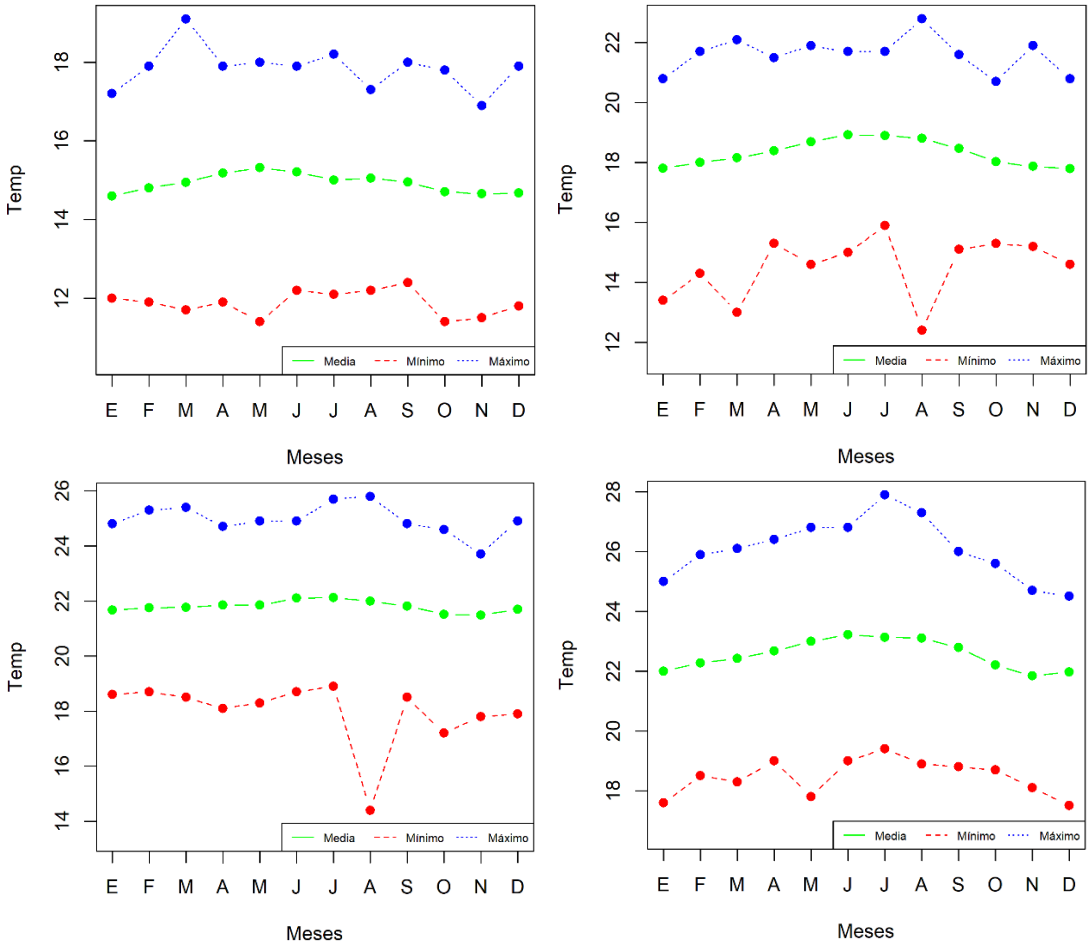


Figura 5-25. Valores mínimos (rojos), medios (verdes) y máximos de temperatura en las estaciones **a)** Mesopotamia, **b)** El Peñol, **c)** San Francisco y **d)** San Carlos

Para el caso de la variabilidad espacial, dado que se cuenta con tan pocas estaciones y teniendo en cuenta la altura sobre el nivel del mar y la localización de las mismas, se decide realizar el análisis de la distribución espacial de la temperatura usando el registro disponible en el servidor WFS del IDEAM, en lugar de realizar una interpolación espacial, que no tendrá en cuenta gradientes de altura y será influenciada por pocas estaciones en la cuenca. En la Figura 5-26 se presenta el mapa regional de temperatura diaria promedio anual multianual en la cuenca de estudio, en esta se observa que las menores temperaturas en la cuenca se presentan en la parte alta de la cuenca mientras que las más altas en la parte baja, resultado que es esperable dada la relación inversa existente entre la altura sobre el nivel del mar y la temperatura.

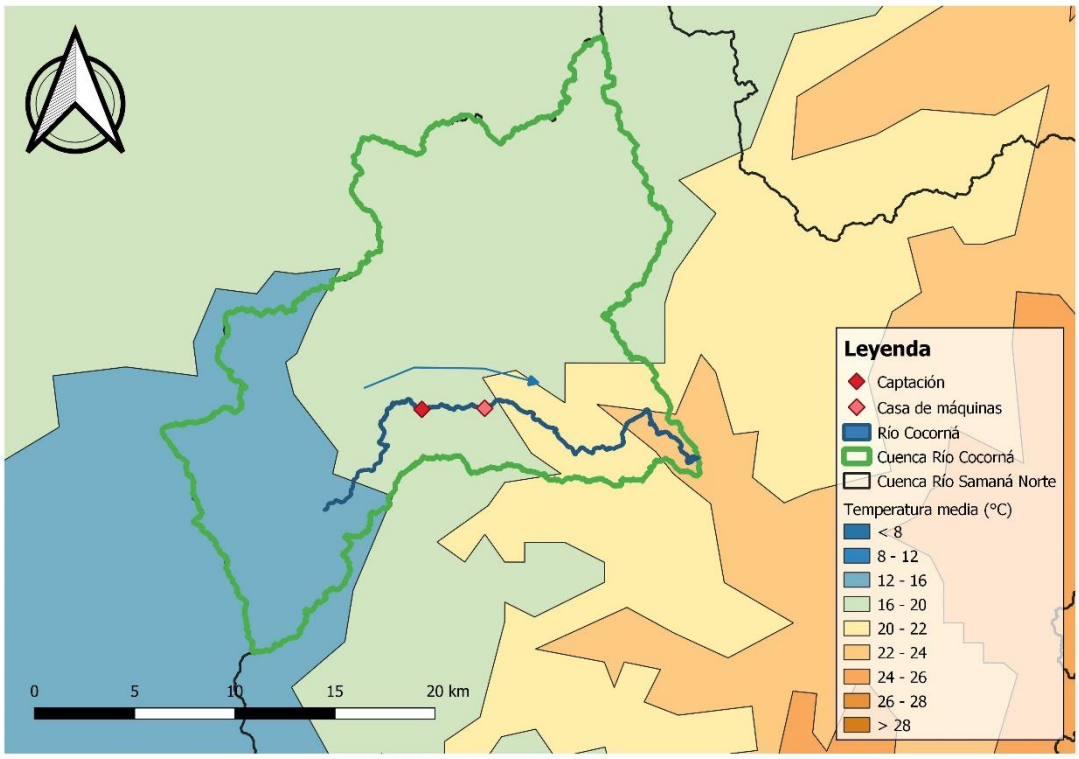


Figura 5-26. Distribución espacial de la temperatura diaria promedio anual multianual en la Cuenca del Río Cocorná

Fuente: Adaptado del servidor WFS del IDEAM

Finalmente, con el propósito de caracterizar temporalmente la temperatura en la Cuenca del Río Cocorná, se podría suponer que al menos el comportamiento anual de la variable en la cuenca es similar al presentado para las estaciones El Peñol, San Francisco y San Carlos, que se encuentran alrededor de la cuenca. Esta suposición es consistente con al realizada anteriormente para la humedad relativa, dada la relación inversa entre estas variables, que se puede observar en los ciclos anuales mostrados en Figura 5-20 y Figura 5-25. Teniendo en cuenta lo anterior, se podría esperar que en la Cuenca del Río Cocorná la temperatura tenga un comportamiento unimodal con máximos durante la mitad del año (junio-julio) y mínimos durante el mes de noviembre.

5.1.3.1.4 Presión atmosférica

La presión atmosférica a cualquier altura se genera como resultado de la fuerza por unidad de área ejercida por el peso de todo el aire existente sobre dicha elevación, lo que hace que el comportamiento de esta variable sea inversamente proporcional a la altitud sobre el nivel del mar. Debido a que no se obtuvo registros de presión atmosférica para la región de estudio en la red de monitoreo del IDEAM y en fuentes alternas, se recurrió al trabajo de (Eslava-Ramírez, 1995), quien analizó los registros

de presión atmosférica de 68 series en el territorio nacional, algunas con más de treinta años de registros, concluyendo en modelos que explican el régimen de la presión en Colombia. Para obtener modelos más precisos Eslava zonificó el territorio colombiano para su análisis, tuvo en cuenta factores como la latitud, configuración del relieve, posición de las cordilleras, valles interandinos, serranías, llanuras, circulación general de la atmósfera, la distribución de otros elementos meteorológicos y otras características del conjunto fisiográfico natural (Eslava-Ramírez, 1995).

La Cuenca del Río Cocorná se ubica en la Zona IV definida en el trabajo de Eslava-Ramírez (1995) como la *Región Andina de la cuenca del río Magdalena*. Las ecuaciones obtenidas por Eslava para esta zona del país se presentan agrupadas en la Tabla 5-21.

Tabla 5-21. Ecuaciones para determinar la presión media mensual en la superficie respecto a la altitud en la Región Andina (Zona IV)

Mes	Ecuación de regresión: Presión (Y(hPa) Y Altitud (X(m))	Coeficiente de determinación
Enero	Y = 6.91678-0.00011586X	0.999975
Febrero	Y = 6.91674 - 0.00011576X	0.999984
Marzo	Y = 6.91691 -0.00011578X	0.999983
Abril	Y = 6.91716-0.00011577X	0.999987
Mayo	Y = 6.91769 - 0.00011587X	0.999986
Junio	Y = 6.91795-0.00011583X	0.999983
Julio	Y = 6.91795 - 0.00011587X	0.999978
Agosto	Y = 6.91801 -0.00011593X	0.999976
Septiembre	Y = 6.91798-0.00011604X	0.999977
Octubre	Y = 6.91748 - 0.00011597X	0.999979
Noviembre	Y = 6.91730-0.00011607X	0.99998
Diciembre	Y = 6.91714-0.00011609X	0.999978
Anual	Y = 6.91741 - 0.00011589X	0.999984

Fuente: (Eslava-Ramírez, 1995)

Tal como se puede apreciar en la Tabla 5-21, las ecuaciones mensuales varían muy poco y todas presentan un coeficiente de determinación cercano a 1, lo que sugiere que la presión atmosférica es explicada con gran precisión tan solo con la altitud como variable dependiente. Aplicando la ecuación para la presión atmosférica media anual, con los registros de altitud de un modelo de elevación digital (DEM) obtenido de información asociada a las curvas de nivel entregadas por el IGAC (resolución espacial 10 m x 10 m) se construye la Figura 5-27, en la que se muestra la distribución anual de la presión sobre la Cuenca del Río Cocorná (en el Anexo 13. GDB se

muestran los estimados mensuales y anual de la presión atmosférica para la zona de estudio). Dada la estrecha relación de la presión atmosférica con la altura, se encontró que la distribución espacial de la presión de un mes a otro no varía significativamente, por lo que para el caso de esta variable no se muestran valores mensuales en la zona de estudio. En la figura se observa que los valores de presión más bajos se presentan en lugares con mayor altitud y los más altos en los lugares con menor altitud como el cauce del río y la zona más baja de salida de la cuenca, resultado esperable dada la relación inversa existente entre la altitud sobre el nivel del mar y la presión atmosférica.

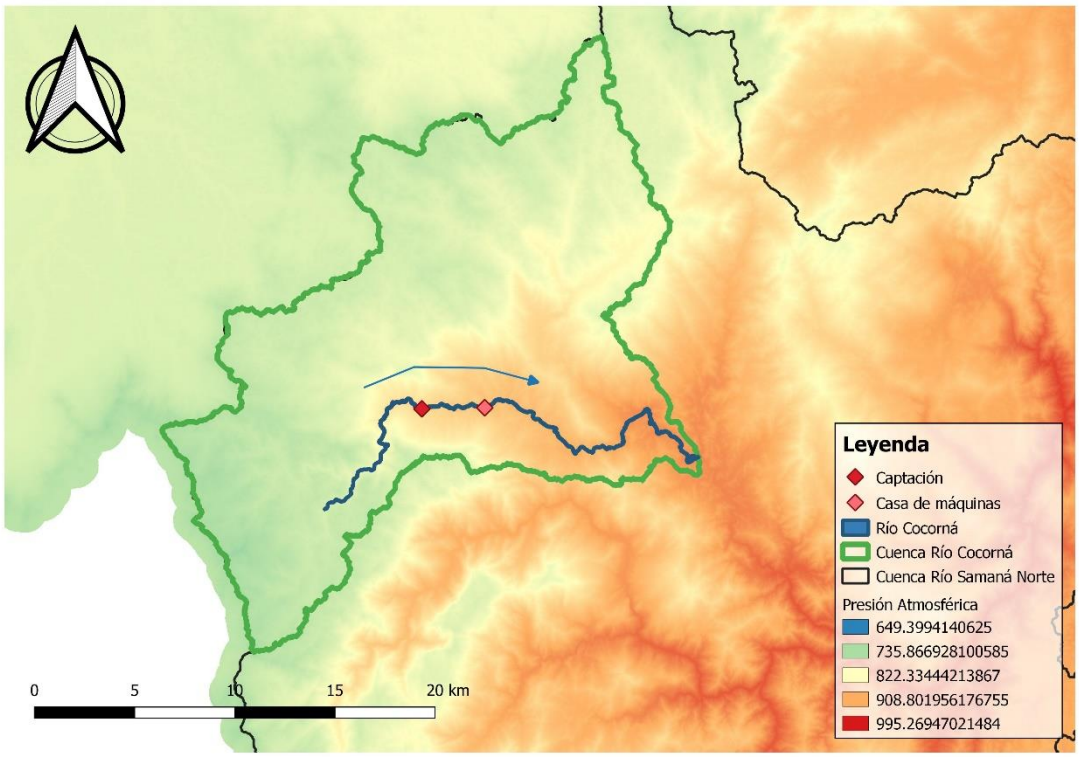


Figura 5-27. Distribución espacial de la presión atmosférica promedio anual (hPa) en la Cuenca del Río Cocorná

La Tabla 5-22 se construye con la finalidad de realizar un análisis espacial y comparativo entre los promedios mensuales multianuales de la distribución de la presión sobre la Cuenca del Río Cocorná. La tabla muestra el promedio espacial, la desviación estándar y la mediana de la presión atmosférica sobre la cuenca, además de los valores mínimo y máximo reportados en la cuenca por cada mes. Al observar los valores medios espaciales y la mediana, es evidente que la presión presenta un comportamiento unimodal durante el año con valores máximos durante la mitad del año (mayo-junio-julio) y mínimos en la última temporada del año (noviembre-diciembre-enero). Asimismo, se observa que en general la deviación estándar oscila

alrededor de 44 hPa, presentando la mayor variabilidad durante el mes de septiembre y la menor durante el mes de febrero. En el caso de los valores máximos y mínimos se encuentra que presentan un comportamiento similar a los valores medios (unimodal) con la única diferencia que en este caso los máximos presentan sus valores más bajos durante el mes de enero en lugar del mes de diciembre. Al comparar los resultados obtenidos para la presión atmosférica con los resultados de la caracterización realizada para la precipitación se verifica que los meses de mayor presión atmosférica (mitad del año) corresponden con los mínimos de precipitación durante la mitad del año. Este fenómeno fue evidenciado en investigaciones como la de Lieu & Chapman (1916), en la que se muestra que las zonas de precipitación están asociadas a centros de baja presión. Finalmente, de acuerdo a la Tabla 5-22 se puede concluir que en el área de influencia de las obras del Proyecto la presión atmosférica superficial registra un valor medio anual entre 727.47 y 929.94 hPa.

Tabla 5-22. Estadísticos para los promedios espacial de presión atmosférica estimada para la Cuenca del Río Cocorná

Mes	Media	Mediana	Desviación Estándar	Mínimo	Máximo
Enero	804.47	791.72	44.69	727.07	929.38
Febrero	804.59	791.85	44.66	727.25	929.41
Marzo	804.70	791.95	44.67	727.33	929.55
Abril	804.91	792.17	44.68	727.53	929.79
Mayo	805.18	792.42	44.73	727.71	930.22
Junio	805.46	792.69	44.73	727.98	930.49
Julio	805.39	792.63	44.74	727.90	930.46
Agosto	805.35	792.58	44.77	727.82	930.48
Septiembre	805.15	792.37	44.80	727.57	930.38
Octubre	804.86	792.09	44.75	727.35	929.96
Noviembre	804.56	791.78	44.78	727.02	929.72
Diciembre	804.40	791.62	44.78	726.86	929.56
Anual	804.93	792.17	44.73	727.47	929.94

Nota: con el color **azul** se resalta los valores mínimos y con **rojo** los máximos

5.1.3.1.5 Evaporación

La evaporación es un proceso que consiste en el cambio de fase desde una superficie de agua líquida a gaseosa (Yu, 2007) y su comportamiento es directamente proporcional a la temperatura, puesto que temperaturas más altas representan una mayor cantidad de energía disponible para llevar a cabo el proceso de cambio de estado. La evaporación se expresa en milímetros (mm), que representan la altura de la lámina de agua evaporada de una superficie determinada. Para el análisis de la

distribución temporal de la evaporación en la cuenca, se utilizaron registros de tres estaciones climáticas de la red de monitoreo del IDEAM disponibles para la región, de las cuales ninguna se encuentra dentro de la Cuenca del Río Samaná Norte, de la que hace parte la Cuenca del Río Cocorná; es de resaltar que dos de estas estaciones se encuentran aproximadamente a 7 km de la Cuenca del Río Cocorná, mientras que la tercera se encuentra a 28 km aproximadamente. En la Figura 5-28 se presenta la ubicación de las estaciones respecto a las Cuencas del Río Samaná Norte y a la Subcuenca del Río Cocorná. Adicionalmente, en la Tabla 5-23 se muestra un resumen de la longitud de las series y el número de años sin registros para cada estación.

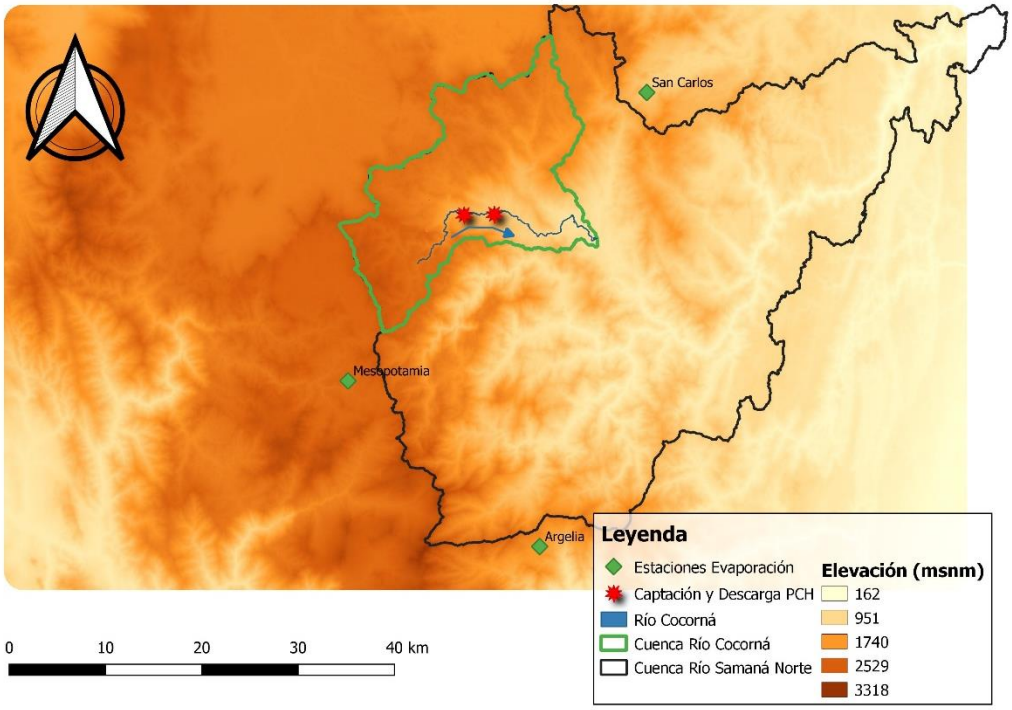


Figura 5-28. Ubicación estaciones de evaporación en la zona de estudio

Tabla 5-23. Longitud de las series de evaporación por estación

Estación	Año inicio	Año final	Rango de años	Años faltantes
Mesopotamia	1979	2017	39	1
Argelia	1979	2017	39	6
San Carlos	1984	2017	34	1

Por otra parte, en la Tabla 5-24 se presenta el número de años para los que se tiene registros de evaporación acumulada diaria en las estaciones analizadas, además del porcentaje de datos faltantes asociados a cada uno de los años en dichos registros.

La evaporación a diferencia de las variables analizadas anteriormente (temperatura, presión atmosférica y humedad relativa) es una variable extensiva y acumulativa. Dada estas características el análisis puede ser fuertemente sesgado por la presencia de datos faltantes, aunque este hecho no afecta seriamente el análisis de los registros en la escala diaria, dado que los registros suministrados por el IDEAM están en dicha escala. No obstante, en el caso de la escala mensual, el análisis si es seriamente afectado como resultado de los datos faltantes que sesgan los acumulados mensuales y de esta forma la medida real de la variable en dicha escala. Lo anterior sugiere que, en el caso de la variabilidad mensual de las series de esta variable, se deben tomar registros con el menor número de datos faltantes posibles, usualmente porcentajes inferiores al 10%, aunque para este caso de estudio dada la disponibilidad de datos en la región se tendrá que tomar un umbral más flexible que se definirá a continuación. En la Tabla 5-24 se observa que si se toma un umbral del 10%, el número de años descartados para la estación Mesopotamia es de 21 de los 38 con registros, para la estación Argelia serían 22 de los 24 con registro y para la estación San Carlos serían 29 de los 33 con registro. Dado que estas 3 estaciones competen a la única información in-situ disponible de esta variable en la región, se decide que para el análisis de los datos en la escala diaria no se descartara ninguno de los registros; mientras que, para el análisis de la variabilidad mensual interanual, se descartaran aquellos meses que cuenten como más del 25% de datos faltantes. Los datos faltantes de los registros que no son descartados se llenan haciendo uso de promedios diarios multianuales de todos los registros disponibles. Con este nuevo criterio, se encontró que para la estación Mesopotamia se descartan 3 años de los 21 disponibles, para la estación Argelia 7 de los 24 disponibles y finalmente para la estación San Carlos 9 de los 33 disponibles.

Tabla 5-24. Datos faltantes en serie de registros diarios de evaporación para las estaciones Mesopotamia, Argelia y San Carlos

Años	Mesopotamia		Argelia		San Carlos	
	#Días Faltantes	Porcentaje	#Días Faltantes	Porcentaje	#Días Faltantes	Porcentaje
1979	45	12.33	31	8.49	NA	NA
1980	4	1.09	NA	NA	NA	NA
1981	57	15.62	NA	NA	NA	NA
1982	164	44.93	NA	NA	NA	NA
1983	6	1.64	NA	NA	NA	NA
1984	7	1.91	NA	NA	176	48.09
1985	64	17.53	NA	NA	56	15.34
1986	58	15.89	NA	NA	77	21.1
1987	82	22.47	NA	NA	52	14.25
1988	108	29.51	NA	NA	94	25.68

Años	Mesopotamia		Argelia		San Carlos	
	#Días Faltantes	Porcentaje	#Días Faltantes	Porcentaje	#Días Faltantes	Porcentaje
1989	78	21.37	NA	NA	297	81.37
1990	98	26.85	NA	NA	NA	NA
1991	23	6.3	NA	NA	80	21.92
1992	43	11.75	NA	NA	46	12.57
1993	54	14.79	NA	NA	69	18.9
1994	NA	NA	NA	NA	94	25.75
1995	40	10.96	115	31.51	58	15.89
1996	43	11.75	119	32.51	86	23.5
1997	26	7.12	99	27.12	61	16.71
1998	39	10.68	176	48.22	68	18.63
1999	51	13.97	192	52.6	67	18.36
2000	57	15.57	70	19.13	78	21.31
2001	34	9.32	45	12.33	84	23.01
2002	33	9.04	74	20.27	81	22.19
2003	27	7.4	52	14.25	348	95.34
2004	44	12.02	71	19.4	167	45.63
2005	47	12.88	81	22.19	83	22.74
2006	58	15.89	70	19.18	105	28.77
2007	44	12.05	65	17.81	89	24.38
2008	20	5.46	91	24.86	96	26.23
2009	18	4.93	94	25.75	75	20.55
2010	24	6.58	60	16.44	58	15.89
2011	15	4.11	59	16.16	41	11.23
2012	17	4.64	38	10.38	44	12.02
2013	29	7.95	46	12.6	34	9.32
2014	8	2.19	40	10.96	34	9.32
2015	14	3.84	41	11.23	32	8.77
2016	14	3.83	23	6.28	36	9.84
2017	75	20.55	123	33.7	102	27.95

Los grises indican el porcentaje de días faltantes, donde el gris oscuro representa un 100% de faltantes y el blanco representa un 0% de faltantes

Luego de realizar el filtro correspondiente al criterio para datos faltantes, para analizar la variabilidad de la evaporación en el área de estudio en la escala diaria se presenta la Figura 5-29, en la que se muestran diagramas de caja y bigotes de los datos diarios disponibles, mostrando la variabilidad diaria mensual asociada a las series de tiempo de cada una de las estaciones de análisis. En dicha figura se observa que los datos de las estaciones Mesopotamia (2.408 msnm) y Argelia (1.755 msnm) varían entre 0 y 8 mm/día aproximadamente, mientras que para la estación San Carlos que se encuentra a una elevación mucho menor (1.113 msnm) la variación asociada a esta variable oscila entre 0-9 mm/día aproximadamente. Es de notar, que para todas las estaciones en la mayoría de los meses los valores medios (puntos verdes) son muy similares a las medianas, sugiriendo que este valor a pesar de no ser una medida robusta, no está siendo afectado de manera significativa por la presencia de valores atípicos. Asimismo, se observa que en todas las estaciones analizadas los registros presentan comportamientos anuales bimodales, con un pico parcial durante el mes de marzo y pico más pronunciado iniciando el segundo semestre del año (julio-agosto). Para el caso de las estaciones Mesopotamia y San Carlos de las cuales también se tiene registros de temperatura (ver Figura 5-23), se observa que el periodo en qué se presentan las tasas de evaporación más altas coinciden con los periodos en los que se presentan las temperaturas más altas, esto como resultado de una mayor cantidad de energía disponible para el proceso de evaporación.

En el caso de los datos atípicos de evaporación, se encuentra que la gran mayoría de ellos son perfectamente posibles en la zona de estudio, aunque el valor superior a 40 mm reportado por la estación Mesopotamia durante el mes de enero se podría asociar a un dato erróneo o un valor extremo, ya que al observar las mediciones de temperatura de esa misma estación no se encuentran valores de temperatura elevados, sin mencionar que las otras estaciones analizadas no presentan ningún valor cercano a este orden de magnitud. Por lo anteriormente descrito, para los análisis siguientes este valor será descartado. Como es de esperar la gran mayoría de los valores atípicos están asociados a valores máximos, puesto que la posibilidad de que exista al menos un día en que se presenten valores de evaporación cercanos a cero (e.g. un día muy lluvioso) en un registro mensual multinacional es bastante alta. Es de resaltar que los pocos valores atípicos mínimos se presentan en las estaciones Mesopotamia y San Carlos, en las que se encuentran varios de estos valores durante los meses junio, julio, agosto y septiembre.

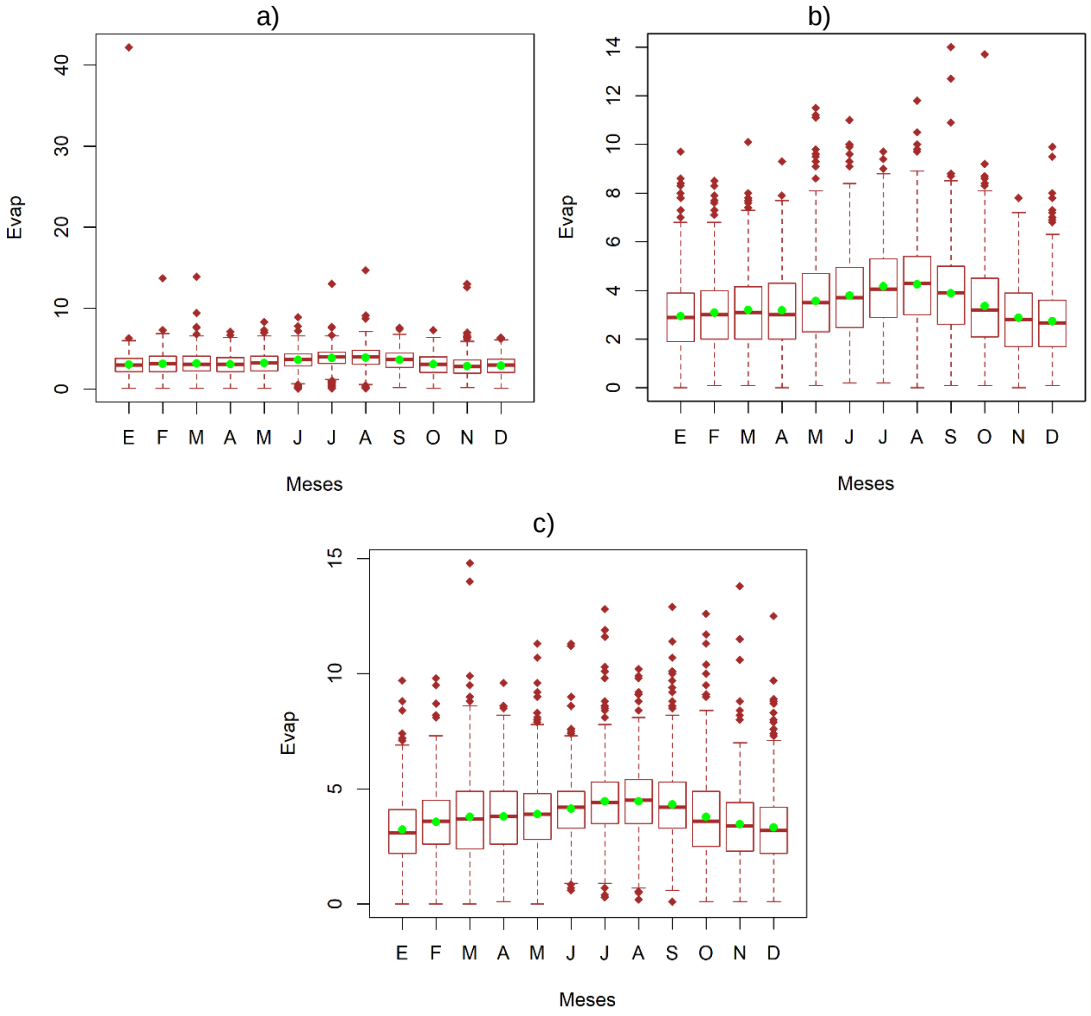


Figura 5-29. Diagrama de cajas y bigotes para los registros acumulados diarios de evaporación (mm) en las estaciones a) Mesopotamia, b) Argelia y c) San Carlos

Los puntos verdes representan los valores medios multianuales para cada mes

Por otra parte, en la Figura 5-30 se presentan diagramas de caja y bigote de los acumulados mensuales de las series diarias luego de ser llenadas para cada una las estaciones. Esta figura se construye con la finalidad de analizar la variabilidad de la evaporación en la escala mensual. En la Figura 5-30 se observa que el rango intercuartil de los acumulados mensuales para las estaciones analizadas varía entre 65-150 mm, 70-165 mm y 70-150 mm aproximadamente, para las estaciones Mesopotamia, Argelia y San Carlos, respectivamente. En el caso de los valores atípicos se observa una reducción sustancial en el número de ellos. Esto último es un resultado esperable, dado que, al acumular los valores diarios de un mes determinado, se consigue suavizar el registro y minimizar el ruido asociado a la variabilidad diaria. Finalmente, para el ciclo anual se observa un comportamiento consistente entre los registros diarios y los mensuales, presentándose para todas las

estaciones un ciclo anual bimodal con un pico durante el mes de marzo y otro más pronunciado durante los meses de julio y agosto, además de los mínimos más bajos durante los meses de noviembre y diciembre.

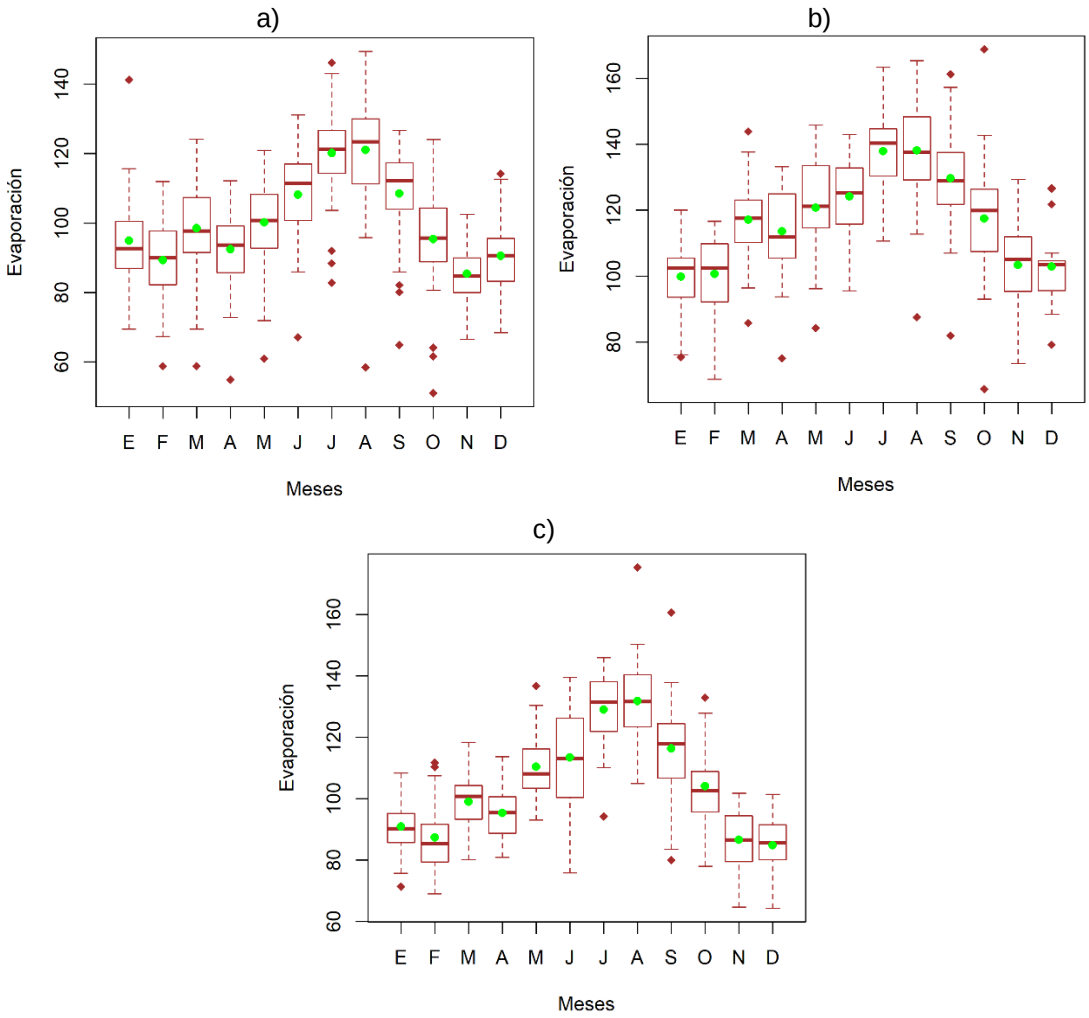


Figura 5-30. Diagrama de cajas y bigotes para los registros acumulados mensuales de evaporación (mm) en las estaciones a) Mesopotamia, b) Argelia y c) San Carlos

Los puntos verdes representan los valores medios multianuales para cada mes.

Con el objetivo de complementar el análisis y facilitar la observación de los datos mínimos, medios y máximos de evaporación en las estaciones analizadas, se presenta la Figura 5-31, donde se muestra el comportamiento de promedio multianual de los acumulados mensuales, y el asociado a los máximos y mínimos diarios mensuales multianuales para esta variable. Tal como se puede apreciar en la Figura 5-31, los picos medios de evaporación en las estaciones analizadas se presentan principalmente durante los meses julio-agosto, meses que coinciden con la temporada en que la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT) se encuentra en su

posición más al norte y por lo tanto alejada de nuestra zona estudio, propiciando cielos más despejados que permiten la entrada de una mayor cantidad de radiación solar hasta la superficie que estimula el desarrollo del proceso de evaporación.

Por otra parte, los valores mínimos presentan comportamientos ligeramente diferentes para los registros de las estaciones analizadas; en el caso de Mesopotamia se encuentran picos durante los meses de marzo (poco marcado) y julio, y valles en marzo-abril y octubre. Para la estación Argelia, se conservan los picos presentes en la estación Mesopotamia durante los meses marzo (poco marcado) y julio, pero ahora los valles se presentan durante los meses de febrero, abril y octubre. En el caso de la estación San Carlos los valores mínimos muestran un comportamiento bimodal muy marcado con máximos durante los meses de mayo y agosto, mínimos durante el mes de julio y la temporada final del año (noviembre-diciembre). En el caso de los valores máximos se encuentra que todas las estaciones presentan sus valores más elevados entre los meses de junio y octubre, y los más bajos durante el inicio y el final del año.

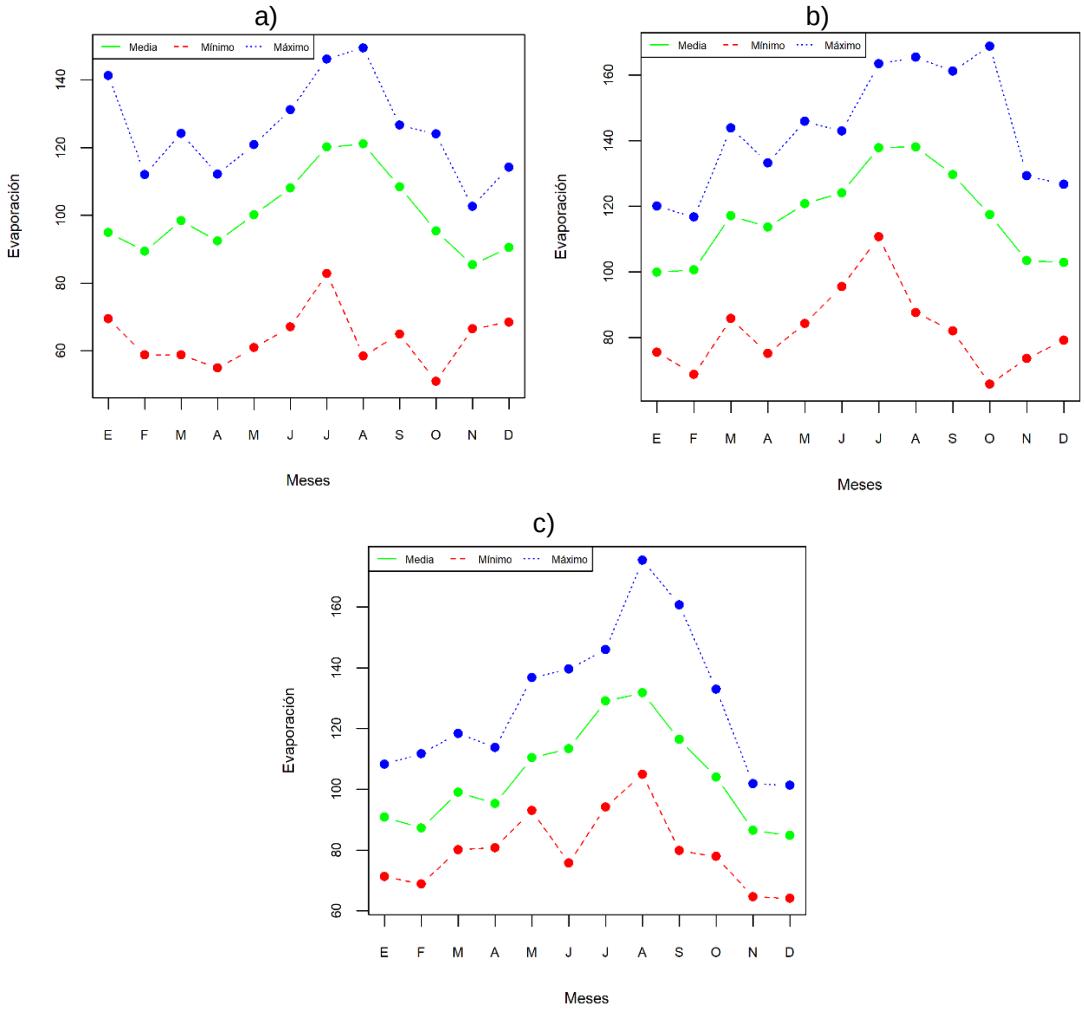


Figura 5-31. Valores mínimos (rojos), medios (verdes) y máximos (azules) de evaporación acumulada mensual (mm/mes) en las estaciones a) Mesopotamia, b) Argelia y c) San Carlos

Finalmente, aunque se encuentran variaciones notables entre los registros de las estaciones analizadas, estos presentan patrones promedios similares en la escala anual y mensual. Lo que nos permite suponer que para el caso de la Cuenca del Río Cocorná, ubicada en medio de estas estaciones, que se encuentran distanciadas entre sí por varios kilómetros, se podría esperar un comportamiento promedio anual similar, es decir que se presenten ciclos anuales bimodales en los valores mensuales acumulados medios multianuales. Para el caso particular de esta variable no se analiza la variabilidad espacial, puesto que se cuenta con muy pocas estaciones para realizar interpolaciones y la información espacializada disponible en el servidor del IDEAM no muestra variabilidad espacio-temporal en la cuenca de estudio, presentando que en toda la cuenca la evaporación oscila en un rango de 900 a 1100 mm/año.

5.1.3.1.6 Precipitación

La precipitación se expresa en milímetros (mm), que representan la altura de la lámina de agua (en todos sus estados) precipitada en una superficie determinada. Para el análisis de la distribución temporal de esta variable en la cuenca, se utilizaron registros de 23 estaciones climáticas de la red de monitoreo del IDEAM (disponibilidad en la región); de estas estaciones, 5 se encuentran dentro de la Cuenca del Río Samaná Norte, de la cual hace parte la Cuenca del Río Cocorná, sobre la que se encuentran 3 de las 5 estaciones antes mencionadas. Las 18 estaciones restantes, se encuentran ubicadas en cuencas aledañas a la Cuenca del Río Samaná Norte (ver Figura 5-32). En la Figura 5-32 se presenta la ubicación de las estaciones con registros de precipitación disponibles respecto a la Cuenca del Río Samaná Norte y a la Subcuenca del Río Cocorná. Adicionalmente, en la Tabla 5-25 se presenta un resumen de la longitud de las series y el número de años sin registros para cada estación.

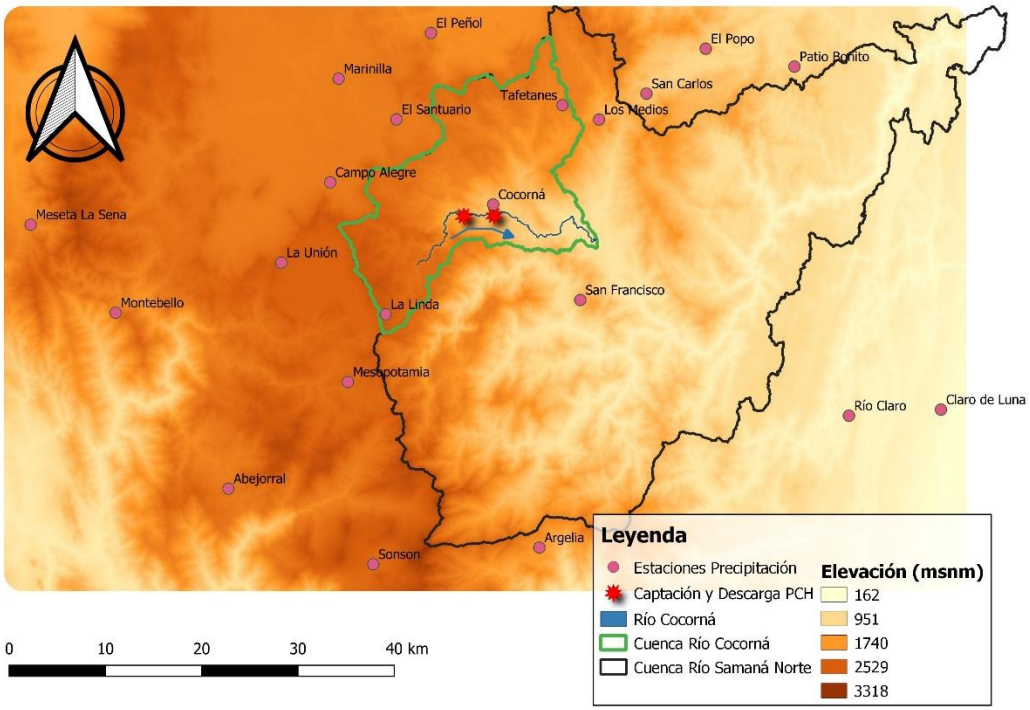


Figura 5-32. Ubicación estaciones de precipitación en la zona de estudio

En la Tabla 5-25 se observa que estaciones como: San Carlos, Los Medios, Meseta la Sena, Patio Bonito, La Linda, San Carlos y El Popo presentan registros que llegan a lo sumo al año 2002, resaltando particularmente el caso de estaciones como Los Medios, San Carlos y El Popo que presentan registros bastante cortos. El caso de la estación Río Claro es algo diferente, puesto que, si bien cuenta solo con 8 años, estos

son bastante recientes. Otro caso particular es de la estación Argelia que, a pesar de contar con un registro de 40 años, presenta 15 años en los que no se registraron mediciones.

Tabla 5-25. Longitud de las series de precipitación por estación

Estación	Año inicio	Año final	Rango de años	Años faltantes
La Unión	1970	2017	48	0
El Santuario	1992	2017	26	0
Claro de Luna	1988	2017	30	0
Mesopotamia	1970	2017	48	0
Los Medios	1991	1999	9	0
Montebello	1970	2017	48	0
Meseta La Sena	1970	1999	30	0
Sonson	1970	2017	48	0
Abejorral	1970	2017	48	0
Tafetanes	1983	2017	35	2
El Peñol	1973	2017	45	1
Argelia	1978	2017	40	15
Patio Bonito	1980	2000	21	0
Cocorná	1975	2017	43	0
Campo Alegre	1973	2017	45	0
Marinilla	1973	2017	45	0
Río Claro	2010	2017	8	0
La Linda	1982	2002	21	0
San Francisco	1974	2017	44	0
El Popo	1992	2002	11	0
San Carlos	1983	2017	35	1
San Carlos*	1973	1979	7	0
San Carlos**	1970	1987	18	1

En la Tabla 5-26 y la Tabla 5-27 se presenta el número de años para los que se tiene registros de precipitación acumulada diaria en las estaciones con registro, además del porcentaje de datos faltantes asociados a cada uno de los años en dichos registros. La precipitación, al igual que la evaporación es una variable extensiva y

acumulativa. Dada estas características el análisis puede ser fuertemente sesgado por la presencia de datos faltantes, aunque este hecho no afecta seriamente el análisis de los registros en la escala diaria, puesto que los registros otorgados por el IDEAM están en dicha escala. No obstante, en el caso de la escala mensual, el análisis si es seriamente afectado como resultado de la presencia datos faltantes que sesgan los acumulados mensuales y de esta forma la medida real de la variable en dicha escala. Lo anterior sugiere que, para el caso de la variabilidad mensual de las series de esta variable, se deben tomar registros con el menor número de datos faltantes posibles, usualmente porcentajes inferiores al 10%. De las estaciones que se utilizan para el análisis, las que presentan el mayor número de años que supera el umbral del 10% de datos faltantes (definido en el numeral 5.1.3.1.5 Evaporación) se tienen las estaciones: Claro de Luna con 10 años de 30 de registros, Tafetanes con 13 años de 33 de registros, El Peñol con 8 años de 44 de registros, La Unión con 7 años de 48 de registro y Patio Bonito con 7 años de 21 de registros. Adicionalmente, estaciones con un número menor de años que supera el umbral del 10% pero con registros muchos más cortos como los presentados para las estaciones: Meseta la Sena, Río Claro y San Carlos** que presentan respectivamente 3, 1 y 3 años que superan el umbral de un registro respectivo de 15, 8 y 7 años. Finalmente, teniendo en cuenta los años dentro del periodo sin registros (los NA) y los descartados por contener porcentajes de datos faltantes superiores al 10%, se llega a que las estaciones que contienen registros con porcentajes de datos faltantes superiores al 30% son: Claro de Luna (33,33%), Tafetanes (42,86%), Argelia (47,50%), Patio Bonito (33,33%) y San Carlos** (42,86)

Teniendo en cuenta lo descrito anteriormente se decide que para el análisis siguiente no se tendrán en cuenta las estaciones Patio Bonito, Los Medios, Meseta La Sena y El Popo, dada la corta longitud de sus registros, la antigüedad de los mismos y la distancia a la que se encuentran de la Cuenca del Río Cocorná. Adicionalmente para el caso de San Carlos que cuenta con 3 estaciones solo se analizará 1, la denominada San Carlos y se descartaran las denominadas San Carlos* y San Carlos** puesto que además de contar con registros muy cortos, también son poco actuales. En el caso de la estación La Linda, a pesar de poseer registros cortos y poco actuales, se tendrá en cuenta dada su posición estratégica respecto a la cuenca de interés (Cuenca del Río Cocorná); y la estación Río Claro se tendrá en cuenta puesto que, si bien sus registros son cortos, también es cierto que son actuales y continuos.

Adicionalmente, para verificar la consistencia de los registros de las estaciones restantes luego de hacer la verificación de datos faltantes, se construyen diagramas de masa simple, en lo que se observa que para todas las estaciones analizadas la curva mantiene una pendiente casi constante, que indica que los registros asociados a dichas estaciones presentan consistencia en el tiempo. Estos diagramas para cada una de las estaciones se presentan en el Anexo 5.1.4.1 Clima.

Tabla 5-26. Datos faltantes en serie de registros diarios de precipitación para cada una de las estaciones de análisis

Años	La Unión	EL Santuario	San Carlos*	Claro de Luna	Mesopotamia	Los Medios	Montebello	Meseta La Sena	Sonsón	Abejorral	Tafetanes	El Peñol
1970	47.95	NA	0	NA	42.47	NA	76.71	64.66	47.4	41.92	NA	NA
1971	0	NA	0	NA	0	NA	0	4.38	0	0	NA	NA
1972	0	NA	0	NA	0.55	NA	0	0	8.47	8.2	NA	NA
1973	18.9	NA	0	NA	0	NA	0	0	0	0	NA	41.37
1974	0	NA	0	NA	0	NA	0	0	0	0	NA	NA
1975	0	NA	0	NA	17.53	NA	0	0	0	0	NA	0.27
1976	0	NA	0	NA	8.2	NA	0	0	0	0	NA	0
1977	0	NA	0	NA	0	NA	0	0	0	0	NA	0
1978	17.53	NA	0	NA	0.55	NA	0	0	0	0	NA	0
1979	0	NA	0	NA	0	NA	0	83.01	0	0	NA	0
1980	0	NA	0	NA	0.82	NA	28.96	0.82	0	0	NA	0
1981	0	NA	0	NA	14.25	NA	0	0	0	8.49	NA	34.25
1982	27.67	NA	0	NA	33.42	NA	0	0.27	0.82	85.75	NA	85.75
1983	2.19	NA	0	NA	0	NA	6.58	0.55	0	3.56	34.52	0
1984	0	NA	NA	NA	0.82	NA	0.55	27.32	0	1.37	0	0
1985	0	NA	0	NA	1.37	NA	4.66	NA	0	0	0	0
1986	0.82	NA	0	NA	0.55	NA	9.04	NA	0	0	0	0
1987	0	NA	0	NA	0	NA	0.82	NA	0.27	0	0	0
1988	42.08	NA	NA	33.06	0.27	NA	0	NA	9.56	0	0	0.27
1989	0	NA	NA	75.34	0.27	NA	0	NA	0	0.27	0	0
1990	3.29	NA	NA	74.79	16.71	NA	2.19	NA	0.27	0.27	0	0
1991	8.77	NA	NA	0	0	46.03	0	NA	0.27	1.1	0.27	0.27
1992	0.27	41.53	NA	0	0	0	0	NA	0.55	1.09	0	0
1993	0.27	2.47	NA	23.56	0	0	0.27	NA	0	0	0	0.55

Años	La Unión	EL Santuario	San Carlos*	Claro de Luna	Mesopotamia	Los Medios	Montebello	Meseta La Sena	Sonsón	Abejorral	Tafetanes	El Peñol
1994	0	4.11	NA	0	0.27	0	0	NA	0	0	0	0
1995	0	8.49	NA	0	0	0	0.82	NA	0	0	0.27	0
1996	0	8.2	NA	16.39	0	0	0	NA	0	0	0	8.2
1997	24.66	0	NA	1.37	0	0.82	0	NA	0	0	0	0
1998	7.95	0	NA	0	0	0	0	NA	0	49.86	0.27	8.49
1999	0	0	NA	0.82	0	83.84	0	NA	0	0	0	33.15
2000	0	0.82	NA	0	0.27	NA	0	NA	0	0	0.27	0
2001	0.27	0	NA	0	0	NA	0.27	NA	0	2.19	13.15	0.55
2002	0.55	0	NA	0	0	NA	0	NA	0	0	53.15	0.55
2003	0.55	0	NA	8.49	0	NA	0	NA	0	0	NA	25.75
2004	0	0	NA	0	0	NA	0	NA	0.27	0	NA	6.83
2005	2.74	0.55	NA	8.22	0	NA	0	NA	0	0	84.11	0
2006	0	0.55	NA	9.86	0	NA	0	NA	0	0	4.38	16.71
2007	0	0	NA	0	0	NA	0	NA	0	0	45.21	10.41
2008	0	0	NA	0	0	NA	0	NA	0	0	3.28	0
2009	0	0	NA	0.55	0	NA	0	NA	0.27	0	2.47	0
2010	0	0	NA	0	0	NA	0	NA	0	0	12.33	0
2011	0	0.27	NA	0	0	NA	0	NA	0	0	13.15	1.1
2012	0	0	NA	27.32	0	NA	0	NA	0	0	12.02	0
2013	0.27	0	NA	13.42	0	NA	0	NA	0	0.27	12.33	0
2014	0	0	NA	0.27	0.55	NA	0	NA	0.55	0	14.25	0
2015	0	0	NA	50.41	0	NA	0	NA	0	0	11.78	0.27
2016	0	0	NA	34.15	0	NA	0.27	NA	0	0	11.75	0
2017	16.71	16.71	NA	83.84	16.71	NA	16.71	NA	16.71	16.71	26.85	16.99

Los grises indican el porcentaje de días faltantes, donde el gris oscuro representa un 100% de faltantes y el blanco representa un 0% de faltantes

Tabla 5-27. Datos faltantes en serie de registros diarios de precipitación para cada una de las estaciones de análisis, continuación

Años	Argelia	Patio Bonito	Cocorná	Campo Alegre	Marinilla	Río Claro	La Linda	San Carlos**	El Popo	San Francisco	San Carlos
1973	NA	NA	NA	42.47	41.37	NA	NA	39.73	NA	NA	NA
1974	NA	NA	NA	8.22	0	NA	NA	7.4	NA	51.23	NA
1975	NA	NA	41.37	0	0	NA	NA	17.26	NA	42.19	NA
1976	NA	NA	0	0.27	0	NA	NA	0	NA	85.79	NA
1977	NA	NA	0	0	0	NA	NA	3.84	NA	0.82	NA
1978	8.49	NA	0	0	0	NA	NA	4.93	NA	8.77	NA
1979	19.45	NA	0	0	0	NA	NA	80.27	NA	0.82	NA
1980	NA	0	0	0	0	NA	NA	NA	NA	16.67	NA
1981	NA	50.41	0	0	0	NA	NA	NA	NA	0.55	NA
1982	NA	85.75	0.27	0	0	NA	8.77	NA	NA	1.92	NA
1983	NA	0	1.37	0	8.49	NA	25.21	NA	NA	0.27	25.48
1984	NA	0.27	18.31	0	0	NA	62.02	NA	NA	0.27	0
1985	NA	1.37	6.3	0	7.67	NA	32.88	NA	NA	0	0.27
1986	NA	0.27	0	0	0.27	NA	0	NA	NA	0.27	0
1987	NA	0	0	0	0	NA	1.1	NA	NA	0.27	0
1988	NA	53.83	0	49.45	0	NA	0	NA	NA	0	3.28
1989	NA	3.01	0	0	0	NA	2.19	NA	NA	0.55	18.9
1990	NA	2.47	0	0	0	NA	9.86	NA	NA	5.21	NA
1991	NA	0.27	0	0	0.55	NA	0	NA	NA	6.58	2.19
1992	NA	10.11	0	0	0	NA	0	NA	35.8	1.64	0.27
1993	NA	10.14	0	0.27	8.22	NA	0	NA	0.27	1.64	2.74
1994	NA	8.77	0	0	0	NA	0	NA	0	1.37	2.19
1995	17.26	1.1	0	0	0.55	NA	0	NA	0	0.55	0
1996	16.39	0.55	0	0	0	NA	0	NA	0	8.2	0

Años	Argelia	Patio Bonito	Cocorná	Campo Alegre	Marinilla	Río Claro	La Linda	San Carlos**	El Popo	San Francisco	San Carlos
1997	0.27	0	0	0	0	NA	1.1	NA	0	0	0
1998	0	0	0	0	0	NA	1.64	NA	0	1.64	2.19
1999	0	20.27	0	0	0.27	NA	0	NA	0.55	2.74	0
2000	0	43.17	0	0	0	NA	0	NA	0	0	0
2001	0	NA	0	0	0	NA	0.27	NA	0.27	0	0
2002	1.64	NA	0	0	0.27	NA	79.73	NA	33.4	0.55	0
2003	0	NA	0	0	0	NA	NA	NA	NA	0.27	95.07
2004	0.27	NA	0.27	0	0	NA	NA	NA	NA	0	30.87
2005	0	NA	0	0	0	NA	NA	NA	NA	0.27	0
2006	0.27	NA	0	0	0.27	NA	NA	NA	NA	0	0.27
2007	0	NA	0	0	0.27	NA	NA	NA	NA	0.55	0.27
2008	0	NA	0	0	0.82	NA	NA	NA	NA	0	0.27
2009	0	NA	0	0	0	NA	NA	NA	NA	0.27	0
2010	0	NA	0	0	2.47	0	NA	NA	NA	0	0.27
2011	0	NA	33.7	0	0	0	NA	NA	NA	0.27	0
2012	0	NA	0	0	0	0.55	NA	NA	NA	0.27	0
2013	0	NA	0	0	0	0	NA	NA	NA	0.27	0
2014	0	NA	0	0	0	0	NA	NA	NA	0	0
2015	0	NA	0	0	0	0.55	NA	NA	NA	0	0
2016	0	NA	0	0	0	0.27	NA	NA	NA	0	0
2017	25.21	NA	16.71	18.08	83.84	16.71	NA	NA	NA	42.19	16.99

Los grises indican el porcentaje de días faltantes, donde el gris oscuro representa un 100% de faltantes y el blanco representa un 0% de faltantes

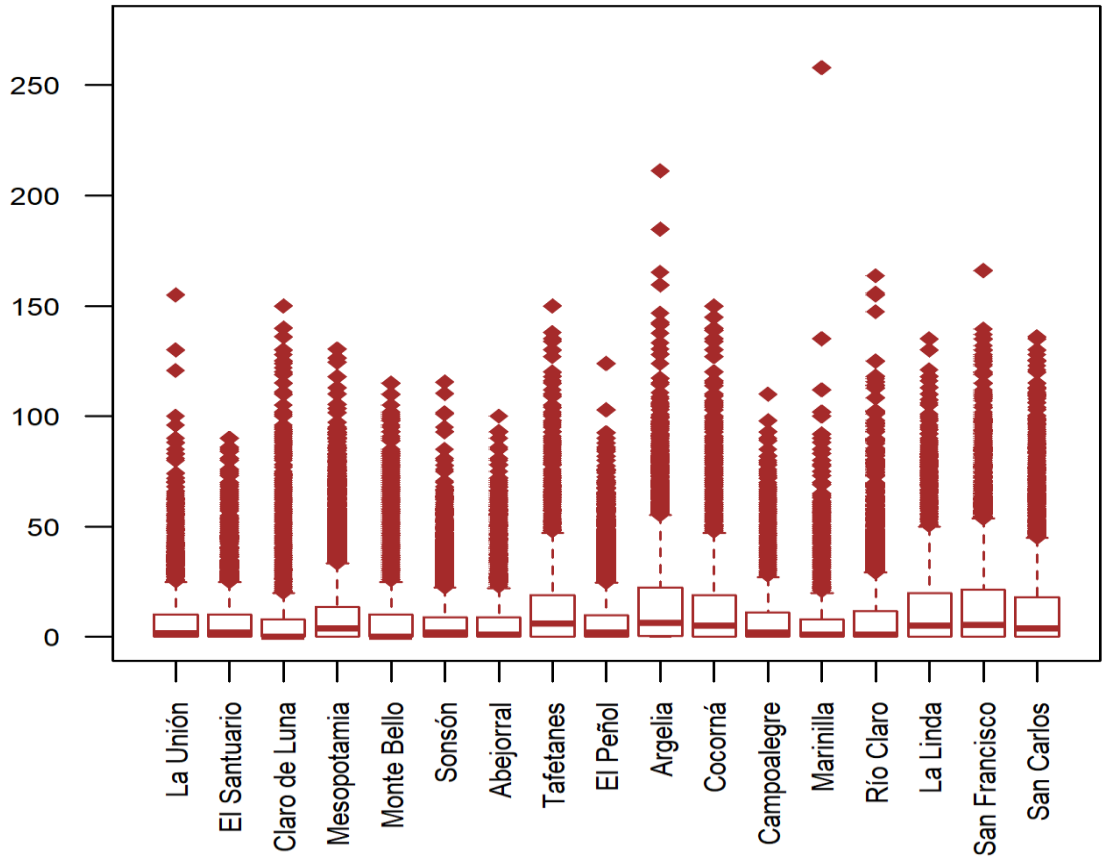


Figura 5-33. Diagrama de cajas y bigotes para los registros acumulados diarios de precipitación (mm) en cada una las estaciones disponibles

Para analizar la variabilidad de la precipitación en el área de estudio en la escala diaria, se presenta la Figura 5-33, en la que se muestran diagramas de caja y bigotes de los datos diarios disponibles en cada una de las estaciones de precipitación utilizadas para el análisis. En la figura, se observa que en general la variabilidad asociada a las estaciones analizadas varía entre 0 y 60 mm/día aproximadamente, presentando la menor variabilidad (entre 0 y 20 mm/día) en las estaciones Marinilla, Sonsón, Abejorral y Claro de Luna, y la mayor (entre 0 y 60 mm/día aproximadamente) en las estaciones Argelia, La Linda, San Francisco y Tafetanes. En cuanto a los valores atípicos se encuentra que todos responden a valores máximos, puesto que es altamente probable que en un registro multianual de precipitación existan varios días en los que no haya precipitación. En el caso de los valores máximos se encuentran dos superiores a 200 mm/día, uno reportado por la estación Marinilla y otro por la estación Argelia. Estos valores son considerados como extremos e incluso podrían responder a valores erróneos, puesto que como se reporta en el trabajo realizado por Jaramillo (2005), en la región Andina Colombina los valores máximos de precipitación asociados a un periodo de retorno de 100 años podrían

alcanzar valores de hasta 200 mm/día, y en caso particular de Antioquia se encuentra que estos valores podrían ser de hasta 150 mm/día. Por lo que para los análisis siguientes al menos estos dos valores serán descartados. En general, los demás valores extremos son considerados como posibles en la zona de estudio y por ende no serán descartados.

En la Figura 5-34, se presentan diagramas de caja y bigotes de los mismos registros mostrados en la Figura 5-33, pero en este caso muestran la distribución mensual de los registros diarios acumulados de precipitación para las estaciones que se encuentran sobre o muy cerca de la Cuenca del Río Cocorná (Tafetanes, Campo Alegre, El Santuario, La Linda y Cocorná). En la Figura 5-34, se observa que el rango intercuartil de la estación La Linda varía entre 0 y 75 mm, el de la estación Campo Alegre entre 0 y 45 mm, el de la estación El Santuario entre 0 y 40 mm, y el de las estaciones Cocorná y Tafetanes entre 0 y 60 mm. Asimismo, se observa que a diferencia de las variables anteriormente analizadas, para el caso de la precipitación se encuentran diferencias significativas entre la mediana y el valor medio en todos los meses para todas las estaciones, como resultado del sesgo generado en el valor medio por la presencia de los valores atípicos, que en el caso particular de esta variable responde a valores máximos, y por ende desplazan dicho valor hacia valores superiores a los reportados por las medianas asociadas a cada mes. El comportamiento de la precipitación en las estaciones analizadas en general presenta un ciclo bimodal, con máximos en abril-mayo y septiembre-octubre y mínimos en junio-julio y diciembre-enero, temporadas coincidentes con el desplazamiento de la ZCIT durante el año, puesto que los meses en que se presentan los picos de precipitación la ZCIT se encuentra pasando por encima de la región andina, mientras que las temporadas de menor precipitación coinciden con aquellas en que la ZCIT se encuentra más al norte (junio-julio) o más al sur (diciembre-enero) (Poveda, 2004; Poveda et al., 2005). Es de resaltar que el caso de la estación La Linda el pico de precipitación en la primera mitad del año se encuentra desplazado respecto al de las otras estaciones, puesto que en este caso se presenta su valor máximo en el mes de junio que debería estar asociado a un mes de transición. Esta última estación cuenta con un registro de 21 años comprendidos entre 1980 y 2000 (registros poco actuales).

En el caso de los datos atípicos se encuentra que la gran mayoría de ellos son perfectamente posibles en la zona de estudio, como se mencionó anteriormente según el estudio realizado por Jaramillo (2005), en el que se encuentra que en Colombia se pueden presentar valores atípicos de precipitación de hasta 200 mm/día. Es de notar que los datos atípicos alcanzan los valores más altos en estaciones como Cocorná (hasta 150 mm/día), Tafetanes (hasta 150 mm/día), La Linda (hasta 140 mm/día), Campo Alegre (hasta 110 mm/día) y El Santuario (hasta 90 mm/día); las cuales se organizan desde la que presenta los valores más altos hasta los más bajos.

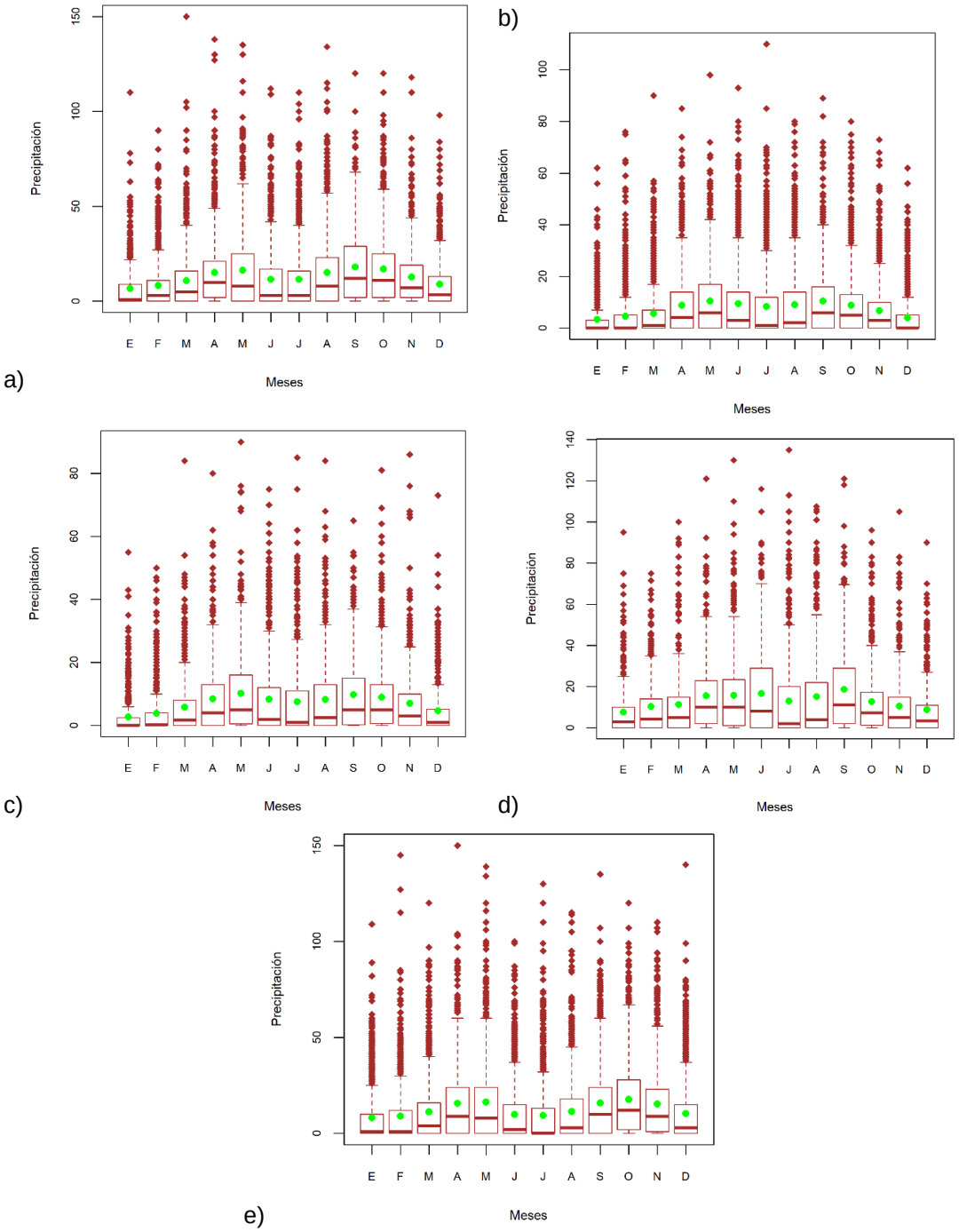


Figura 5-34. Diagrama de cajas y bigotes para los registros acumulados diarios de Precipitación (mm) en las estaciones sobre y cercanas a la Cuenca del Río Cocorná: a) Tafetanes, b) Campo Alegre, c) El Santuario, d) La Linda y e) Cocorná.

Los puntos verdes representan los valores medios multianuales para cada mes

En la Figura 5-35 se presentan los diagramas de caja y bigote para las estaciones Tafetanes, Campo Alegre, El Santuario, La Linda y Cocorná de los valores acumulados mensuales de precipitación. En la figura se observa que estos nuevos valores presentan rangos intercuartil que varían entre 0-850 mm/mes para Tafetanes, 0-500 mm/mes para Campo Alegre, 0-500 mm/mes para El Santuario, 100-800 mm/mes para La Linda y 0-800 mm/mes para Cocorná, los valores expresados en estos rangos son aproximados, puesto que en los registros presentados no existen acumulados mensuales iguales a cero, pero sí de valores inferiores a 50 mm/mes. Asimismo, se observa que, a diferencia de los valores diarios, en este caso los valores medios son muy parecidos a las medianas; y que se presenta una reducción significativa en el número de datos atípicos. Este último resultado es esperable, puesto que al calcularse acumulados mensuales se reduce el comportamiento asociado a la variabilidad diaria, que es mitigado por la suma de valores muy grandes y cercanos a cero. Es de destacar que los valores atípicos más elevados se presentan en los registros de las estaciones Cocorná y La Linda que cuentan con algunos valores que oscilan alrededor de los 1000 mm/mes. En esta nueva figura se observa con mayor claridad el comportamiento anual seguido por esta variable durante el año en todas las estaciones analizadas, con máximos durante los meses de marzo y septiembre y mínimos durante la mitad del año y la temporada diciembre-enero.

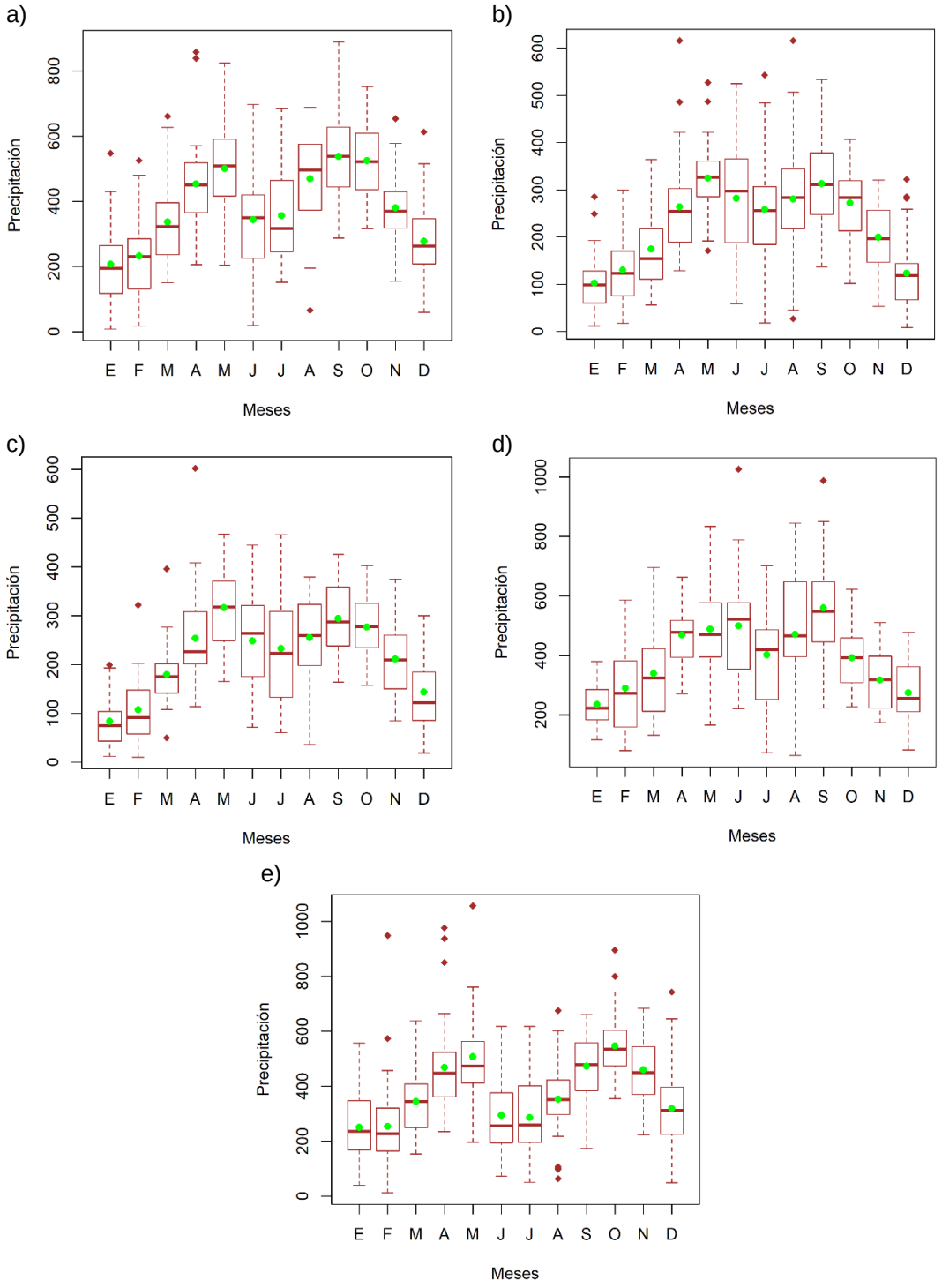


Figura 5-35. Diagrama de cajas y bigotes para los registros acumulados mensuales de Precipitación (mm) en las estaciones sobre y cercanas a la Cuenca del Río Cocorná: a) Tafetanes, b) Campo Alegre, c) El Santuario, d) La Linda y e) Cocorná.

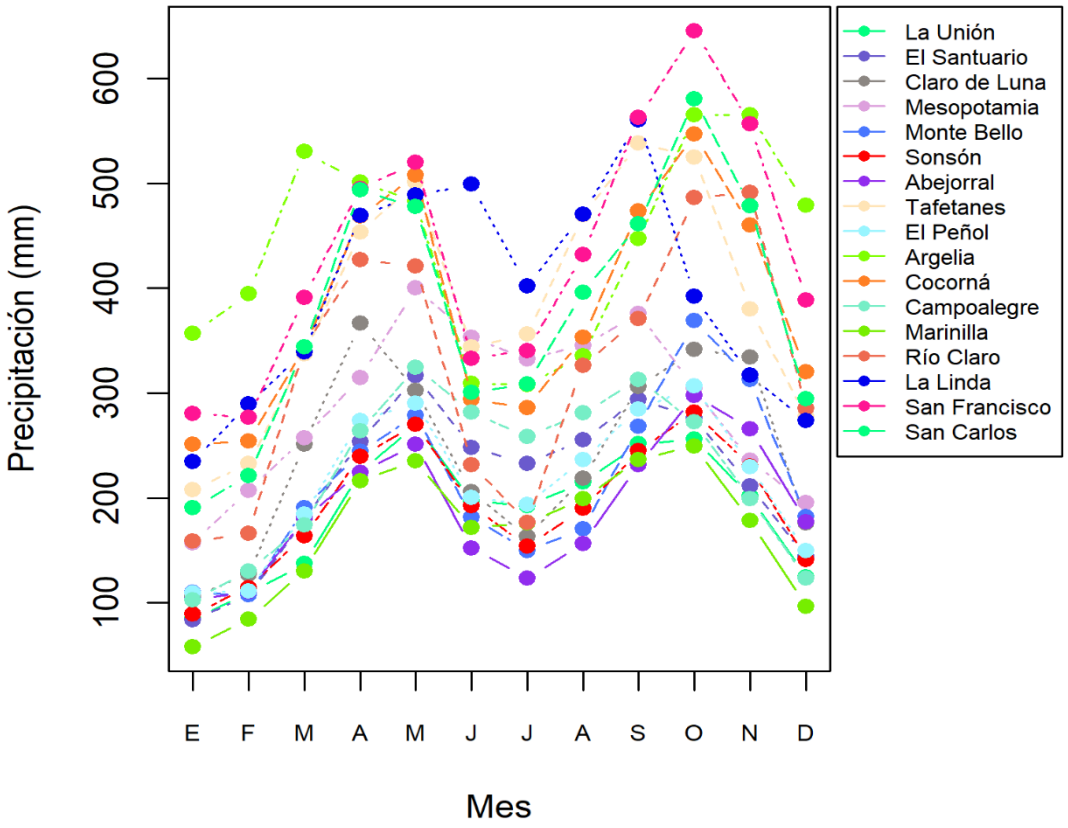


Figura 5-36. Precipitación acumulada mensual promedio multianual en las estaciones usadas para el análisis de esta variable.

Con el objetivo de complementar el análisis, facilitar la observación e incluir todas las estaciones con registros de precipitación en la región de estudio, se muestran los valores medios multianuales de precipitación acumulada mensual en la Figura 5-36, donde se puede observar el ciclo anual asociado a cada una de las 17 estaciones (luego de descartar 6) analizadas. En la figura se observa que el comportamiento anual de los registros de todas las estaciones responde a ciclos anuales bimodales con picos durante las temporadas marzo-abril-mayo y septiembre-octubre-noviembre, que coinciden con las temporadas de año en las que la ZCIT pasa sobre la región andina colombiana (Poveda, 2004; Poveda et al., 2005). Esta estructura de gran escala es caracterizada por ubicarse sobre zonas de bajas presión que permiten la formación de nubes de alto desarrollo vertical y por ende el desarrollo del proceso de precipitación. En las temporadas secas competentes a junio-julio-agosto y diciembre-enero-febrero, la ZCIT se encuentra en sus puntos más alejados de la región de estudio hacia el norte y hacia el sur, respectivamente (Poveda, 2004; Poveda et al., 2005).

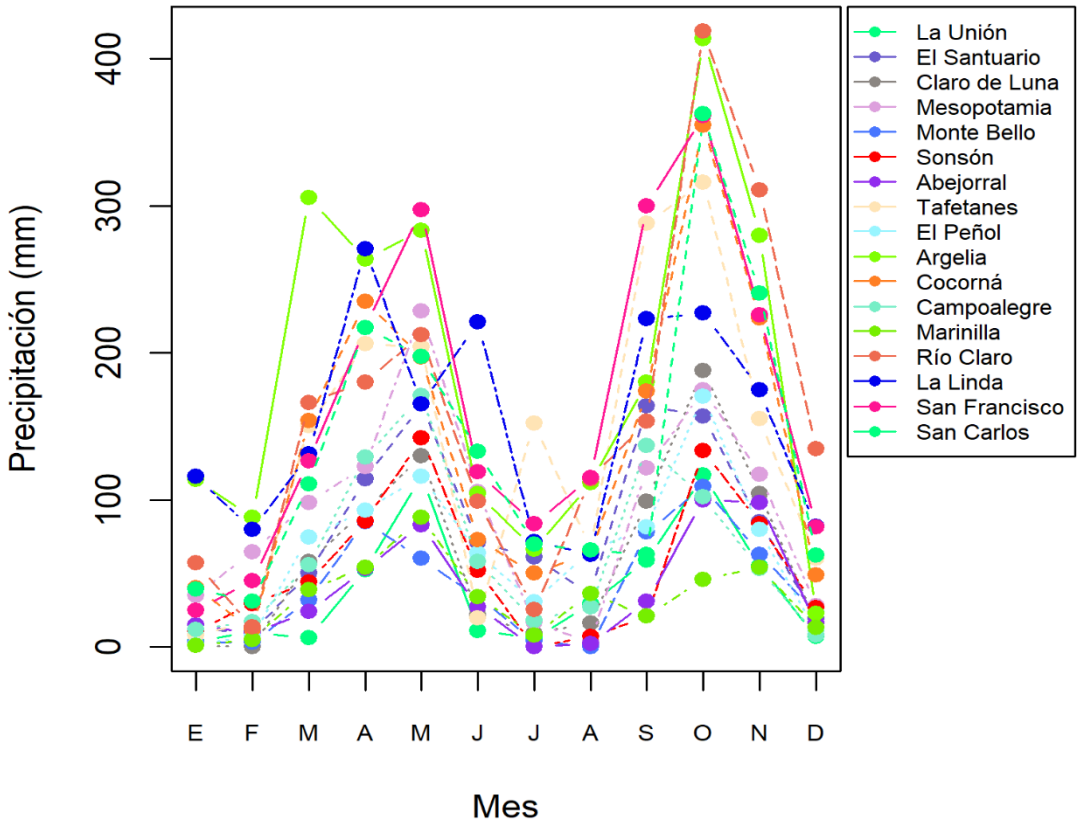


Figura 5-37. Precipitación mínima acumulada mensual multianual en las estaciones usadas para el análisis de esta variable.

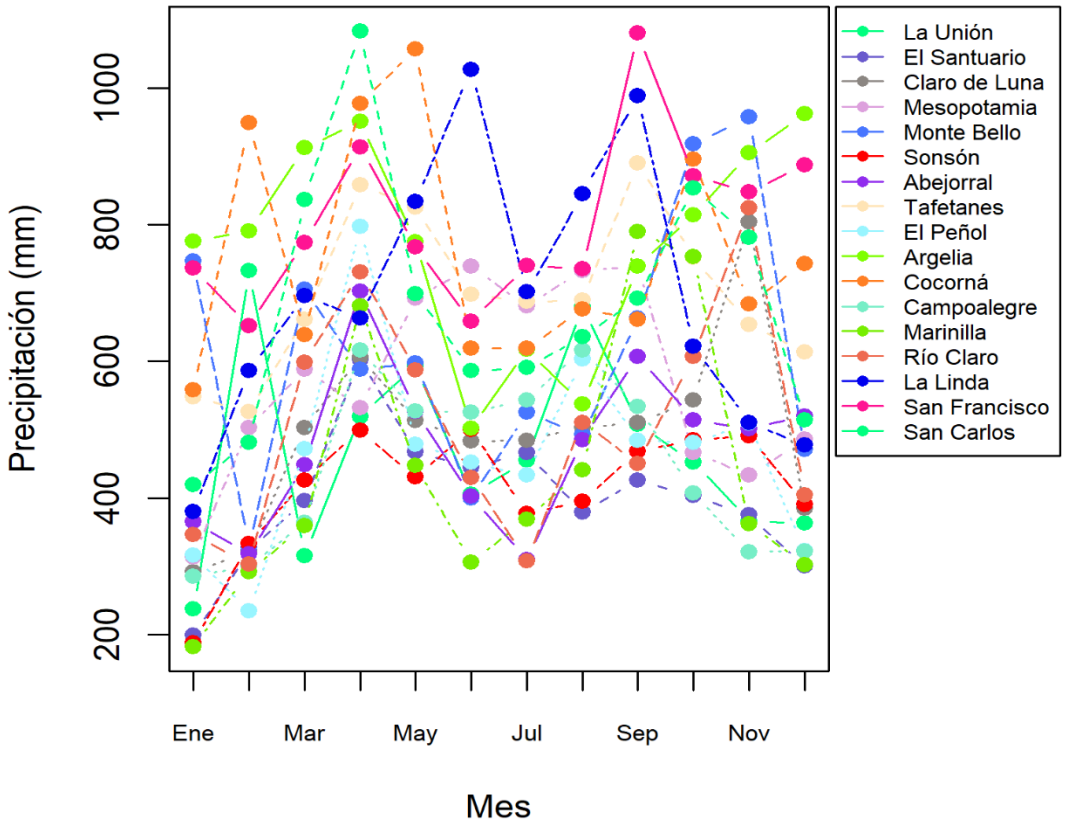


Figura 5-38. Precipitación máxima acumulada mensual multianual en las estaciones usadas para el análisis de esta variable.

Por otro lado, en la Figura 5-37 se presentan los ciclos anuales multianuales de los valores mínimos acumulados mensuales multianuales, para cada una de las 17 estaciones de análisis. En la figura se observa que el comportamiento de los valores mínimos es consistente con el de los valores medios, presentando ciclos anuales bimodales con máximos en las temporadas marzo-abril-mayo y septiembre octubre noviembre y mínimos en junio-julio-agosto y diciembre-enero-febrero. Es de resaltar que el rango de variación de estos valores ese encuentra entre 0 y 410 mm/mes aproximadamente. En el caso de los valores máximos mostrados en la Figura 5-38 se observa que el comportamiento anual asociado no es tan claro como el mostrado por los valores medios y los mínimos, aunque se logra apreciar que en general los valores más altos se presentan durante marzo-abril-mayo y septiembre octubre noviembre, mientras que los más bajos en junio-julio-agosto y diciembre-enero-febrero.

Para analizar la variación espacial de la precipitación en la Cuenca del Río Cocorná, se realiza una interpolación Spline del tipo tensión utilizando las estaciones que no fueron descartadas en el análisis, a excepción de la estación La Linda que fue utilizada para verificar la eficiencia del método dada su posición estratégica en la cuenca. Este método a diferencia de otros como Kriging no hace suposiciones acerca de la distribución de los datos. El método de interpolación de Kriging que también se consideró para la interpolación espacial de los datos, utiliza la suposición de que los datos de las estaciones siguen un comportamiento normal que no es consistente con el comportamiento asociado a los datos de las estaciones utilizadas, por lo que los resultados asociados a este método no se incluyen en el análisis.

En la Figura 5-39 se presenta el mapa de precipitación media acumulada anual multianual en la Cuenca de Río Cocorná, calculado a través de la interpolación Spline del tipo tensión. En esta figura se observa que los valores más altos (entre 4.423 y 5.389 mm/año) de precipitación se presentan en la parte baja de cuenca, mientras que los más bajos (entre 2.788 y 3.323 mm/año) se presentan en la parte alta de la cuenca. En general, los valores de precipitación acumulados medios multianuales sobre la Cuenca del Río Cocorná se encuentran por encima de 3.000 mm/año. Es importante resaltar que la topografía es un elemento que podría inducir sesgo en la interpolación realizada, puesto que es un elemento de carácter local que influencia de manera significativa a la precipitación y no es tenida en cuenta por el método de interpolación utilizado. La estación La Linda presenta un promedio multianual de precipitación levemente superior a los 4.500 mm/año, mientras que, con la interpolación, esta zona se encuentra entre 3.500 y 4.000 mm/año evidenciando una subestimación de las partes altas de la cuenca; sin embargo, la diferencia no es lo suficientemente grande como para descartar la interpolación realizada.

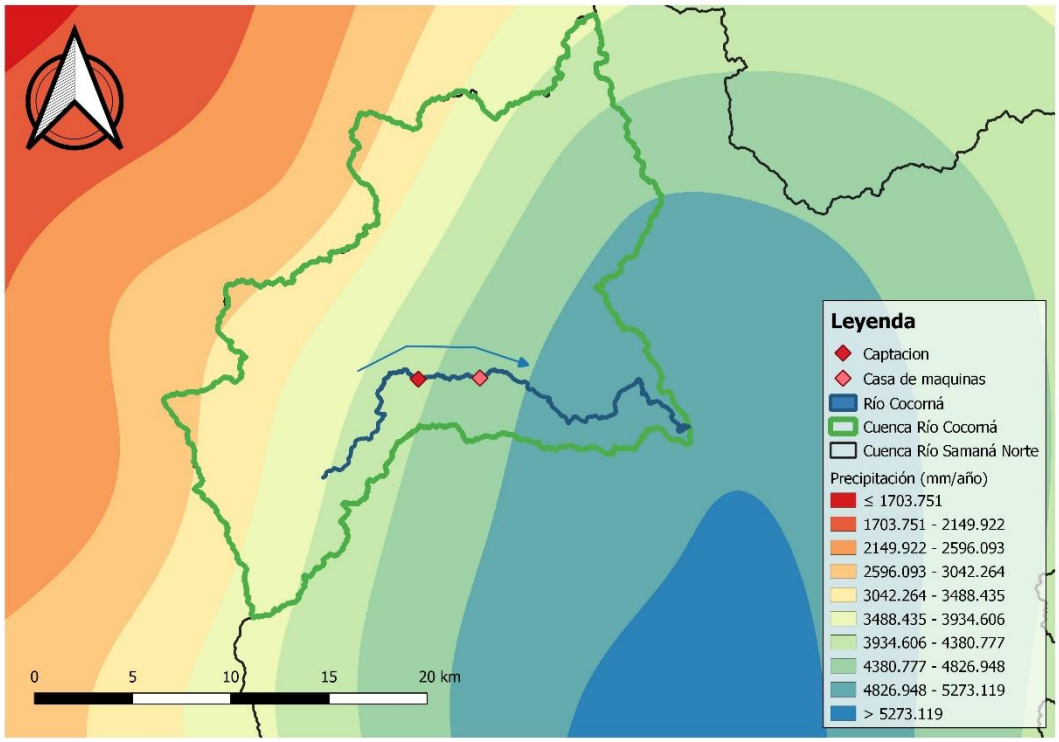


Figura 5-39. Distribución espacial de la precipitación en la Cuenca del Río Cocorná

Para complementar el análisis espacial de la precipitación sobre la Cuenca del Río Cocorná, se construye la Figura 5-40, en la que se presenta la distribución espacial de la precipitación acumulada promedio multianual, consultada de forma virtual a través del servidos WFS del IDEAM. En general se observa que la Figura 5-40 es consistente con lo encontrado en la interpolación de la precipitación mostrada en la Figura 5-39, puesto que se presentan los valores más bajos de precipitación en la parte alta de la cuenca, mientras que los más altos en la parte más baja de la cuenca. Es de resaltar que los mapas presentados no solo indican consistencia en los patrones de precipitación sobre la cuenca, sino también en las magnitudes asociadas a los mismos, con la única diferencia de que la interpolación realizada con las estaciones del IDEAM presenta una resolución espacial más alta que la descargada del servidor WFS del IDEAM (Figura 5-40).

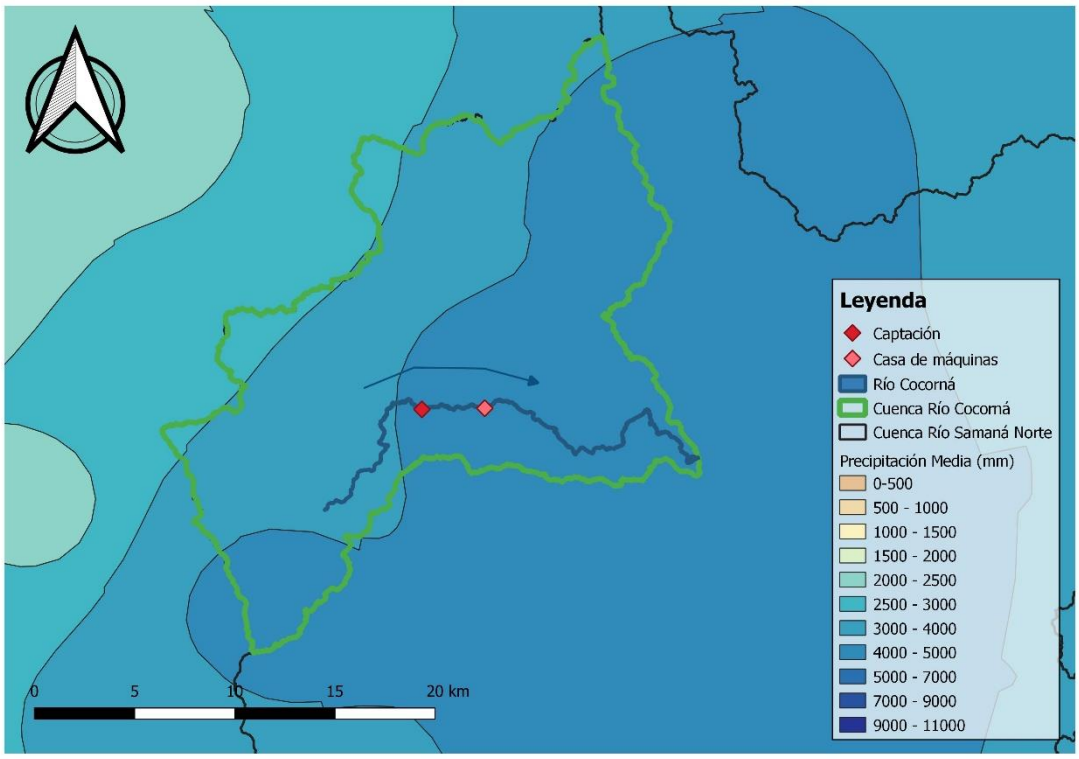


Figura 5-40. Distribución espacial de la precipitación anual acumulada promedio multianual en la Cuenca del Río Cocorná

Fuente: Adaptado del servidor WFS del IDEAM

5.1.3.1.7 Radiación

Debido a la ausencia de registros de radiación solar en las estaciones solicitadas en el área de influencia, se recurrió al mapa nacional del IDEAM para esta variable, el cual se puede consultar de forma virtual a través del servidor WFS, así como al Atlas de Radiación Solar, en donde presenta también una tabla anexa con el listado de las estaciones utilizadas para caracterizar las ciudades principales, acompañado de sus valores medios mensuales. Para el caso específico de la Cuenca del Río Cocorná, la información asociada a las estaciones, disponible en el Atlas de radiación, no se tiene en cuenta para este análisis, puesto que la más cerca está la ubicada en la ciudad de Medellín, entre 36 y 60 km de distancia. Sin embargo, por tratarse de la radiación se podría suponer que su comportamiento anual promedio podría estar asociado a variables como la precipitación, la temperatura y la nubosidad; esperando que, en temporadas más nubosas, más lluviosas y más frías, la radiación incidente en superficie sea mucho menor que en temporadas más despejadas (sin nubes), menos lluviosas y más calientes (mayor temperatura). Teniendo en cuenta lo anterior y los ciclos anuales de nubosidad (Figura 5-15), precipitación (Figura 5-36) y temperatura (Figura 5-25) analizados anteriormente, se podría pensar que los picos de radiación en un año promedio se presentaría en la mitad del año (junio-julio-agosto) y en la

temporada diciembre-enero-febrero, temporadas en las que la precipitación y la nubosidad son mínimas, y la temperatura máxima.

Hasta ahora el análisis se basa en la observación de variables secundarias de las que se tiene registro en la cuenca. Con el objetivo de tener una visión global del comportamiento y la magnitud de la radiación solar en la Cuenca del Río Samaná Norte y en especial en la Subcuenca del Río Cocorná, que es donde se proyecta llevar a cabo el proyecto hidroeléctrico Cocorná III, se presenta el mapa de radiación solar promedio obtenido del servidor WFS del IDEAM (Figura 5-41). El mapa representa el promedio anual multianual de la irradiación global recibida en superficie sobre el territorio. Variable medida como el valor de la energía que corresponde al valor agregado de los kWh que en promedio inciden durante el día sobre un metro cuadrado, expresado en kWh/m^2.

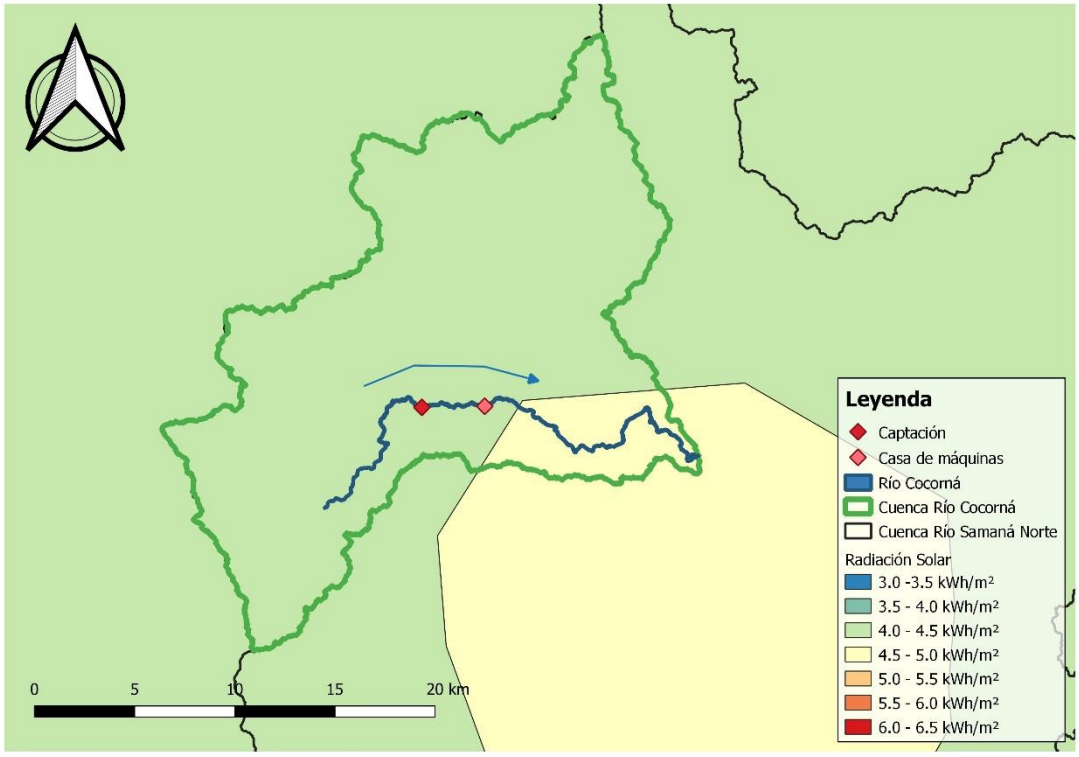


Figura 5-41. Distribución espacial de la radiación solar diaria incidente en la Cuenca del Río Cocorná, promedio anual multianual

Fuente: Adaptado del servidor WFS del IDEAM

En la Figura 5-41 se observa que, en promedio, durante un día del año en la cuenca del Río Cocorná, inciden entre 4.0 y 4.5 kWh/m^2, especialmente en la parte alta. En el caso de la parte baja de Cuenca del Río Cocorná, alrededor del punto de salida de esta cuenca, se presentan valores de radiación entre 4.5 y 5.0 kWh/m^2.

5.1.3.1.8 Vientos

Debido a la ausencia de registros de velocidad y dirección del viento en las estaciones solicitadas en el área de influencia, se debió recurrir tanto al mapa nacional del IDEAM para esta variable (servidor WFS), como al Atlas de Vientos, el cual adicionalmente presenta una tabla de anexos en la cual incluye el listado de las estaciones utilizadas para caracterizar las ciudades principales, acompañado de sus valores medios mensuales. Para el caso específico de la Cuenca del Río Cocorná no se encontró ninguna estación sobre esta cuenca; la estación más cercana a la Subcuenca del Río Cocorná es la ubicada en el Aeropuerto José María Córdoba en Rionegro, entre 17 y 40 km de distancia de la cuenca (ver Figura 5-42).

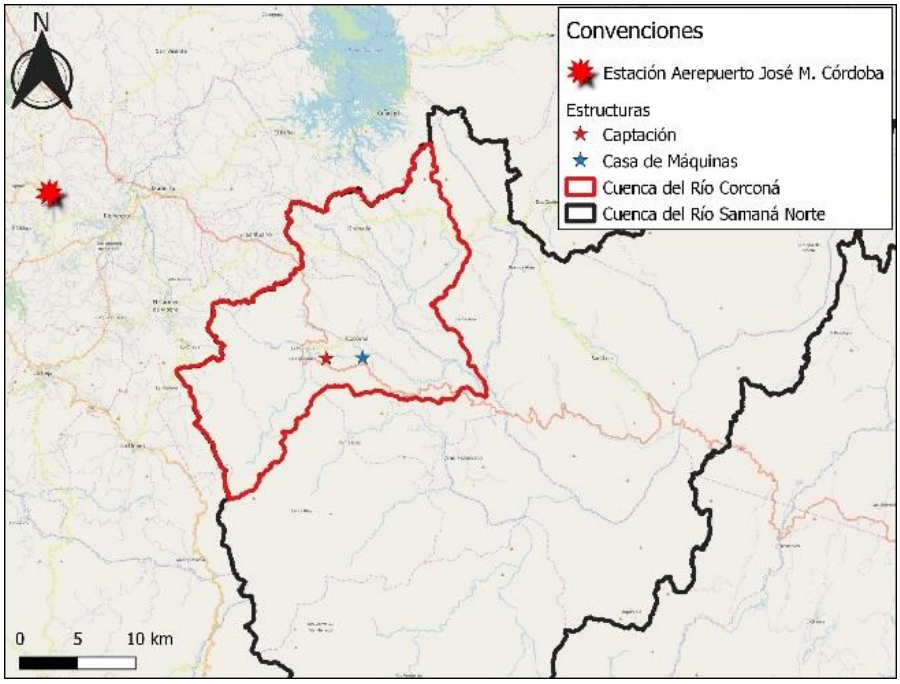


Figura 5-42. Ubicación estación Aeropuerto José M. Córdoba respecto a la Cuenca del Río Cocorná

La Figura 5-43 muestra la rosa de vientos extraída del Atlas interactivo del IDEAM de la estación ubicada en el Aeropuerto José María Córdoba en Rionegro Antioquia, la cual fue construida con registros comprendidos entre los años 1981 y 2010. En la figura se observa que en la zona los vientos predominantes provienen del este y en menor proporción el norte y el noreste. En el caso de los provenientes del este, su magnitud varía entre valores de 0,5 y superiores a 5,5 m/s, mientras que los provenientes del noreste presentan magnitudes que varían entre 0,5 y 4,5 m/s.

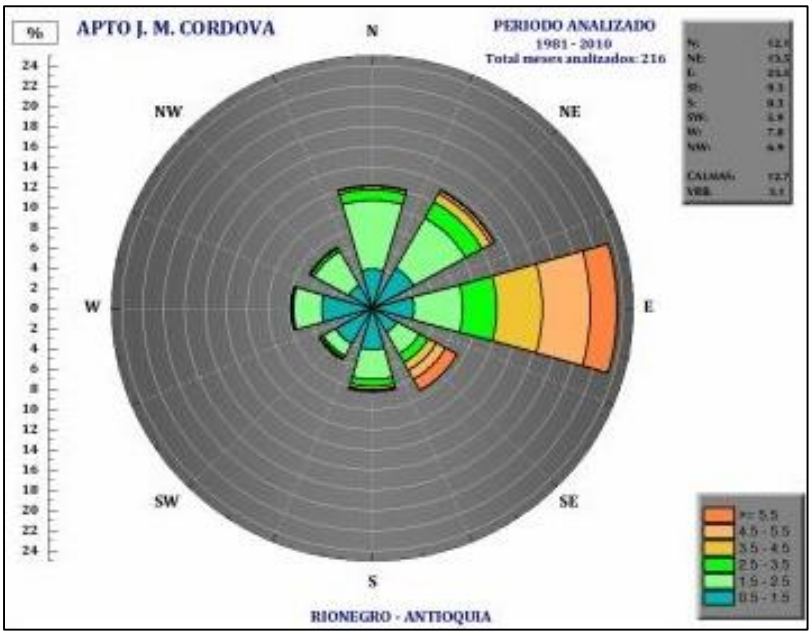


Figura 5-43. Rosa de vientos de la estación Aeropuerto J. M. Córdoba, para el periodo de análisis 1981-2010

Fuente: Atlas de viento interactivo del IDEAM

Adicionalmente se presenta el mapa de velocidad del viento promedio (magnitud de velocidad) en la cuenca de interés para el proyecto obtenido del servidor WFS del IDEAM (Figura 5-44). En la figura se observa que la magnitud del viento es uniforme en la Cuenca del Río Cocorná, presentando una velocidad promedio multianual entre 2-3 m/s en toda la cuenca. Los resultados mostrados en la figura, aunque dan idea de las magnitudes del viento en la cuenca, no muestran nada respecto a la distribución espacial del mismo, esto como resultado quizás de la metodología utilizada para la interpolación, las estaciones y la escala espacial utilizada. Puesto que, para el caso de esta variable, se esperarían cambios asociados a la topografía regional y a la función que la vegetación pueda ejercer.

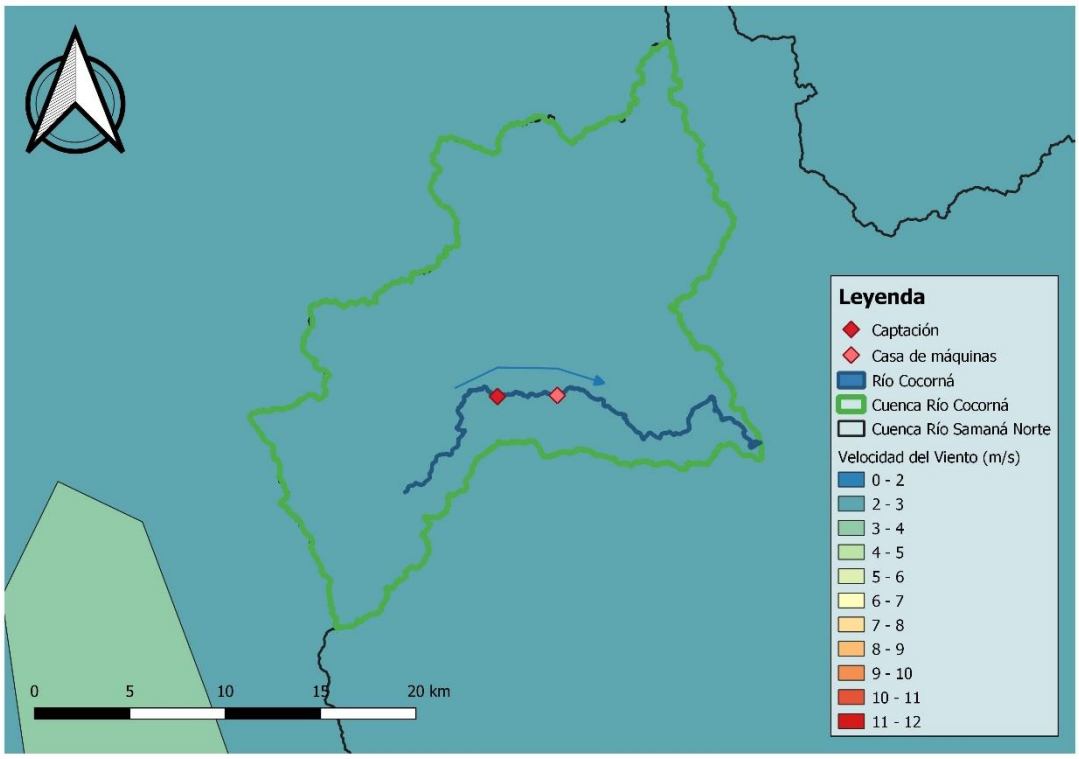


Figura 5-44. Velocidad del viento a escala regional

Fuente: Adaptado del Atlas del Viento de Colombia

Por otra parte, en la Figura 5-45 se presenta el mapa de dirección del viento para la región de estudio tomado del atlas de vientos del IDEAM, el cual presenta una resolución espacial demasiado baja para la escala que se quiere analizar. En la figura se observa que los vientos que entran a la Cuenca del Río Samaná Norte provienen del norte y justo en la zona de la cuenca presentan un cambio de dirección quizás influenciado por la topografía regional. De la figura también se observa que en la Cuenca del Río Cocorná los vientos en superficie soplan predominantemente desde el noreste hacia el suroeste.

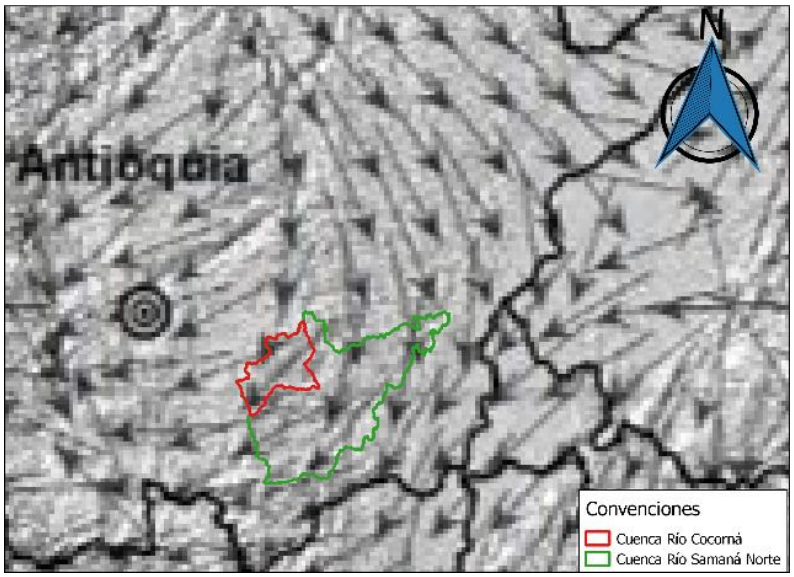


Figura 5-45. Dirección del viento a escala regional

Fuente: Adaptado del Atlas del Viento de Colombia

De lo descrito anteriormente con base en información secundaria, se podría esperar que en la Cuenca del Río Cocorná los vientos predominantes soplen del noreste al suroeste con una velocidad promedio anual de 2-3 m/s.

5.1.3.1.9 Diagramas precipitación-temperatura

Dada la información disponible en la cuenca para la temperatura se construyen diagramas de precipitación vs temperatura para las estaciones Mesopotamia, El Peñol, San Francisco y San Carlos. Estos diagramas se muestran en la Figura 5-46 y se construyen con la finalidad de identificar épocas secas y húmedas. En la figura se observa que en general para las estaciones El Peñol, San Francisco y San Carlos, durante la temporada junio-julio-agosto se presentan altos valores de temperatura (dada la poca nubosidad) y bajos valores de precipitación, los cuales son característicos de una época seca. Por otro lado, para estas mismas estaciones, se encuentra que la temporada diciembre-enero-febrero también presenta características de una época seca, con valores bajos de precipitación y la particularidad de presentar bajos valores de temperatura, lo cual no es común en una época con estas características de precipitación, aunque es de resaltar que al menos para las estaciones San Francisco y San Carlos la precipitación en esta temporada del año es mayor que la presente en la mitad del año.

Para el caso de épocas lluviosas, se encuentra que estas se presentan en las temporadas marzo-abril-mayo y septiembre-octubre-noviembre para las estaciones El Peñol, San Francisco y San Carlos, en las que se observan picos de precipitación que ocurren durante las épocas de transición de la temperatura de valores bajos a valores altos (en marzo-abril-mayo) y viceversa (septiembre-octubre-noviembre).

El caso de la estación Mesopotamia se encuentran resultados poco esperados, ya que la temperatura y la precipitación presentan un comportamiento muy parecido con máximos y mínimos durante las mismas temporadas. Lo que se podría asociar a la altura de esta estación sobre el nivel mar y a las características de nubosidad en la zona, puesto que noches muy nubosas intensifican la retención de calor en la escala local, ya que las nubes funcionan como una barrera que no permite la salida del calor y por ende se presenta un aumento de la temperatura en temporadas nubosas.

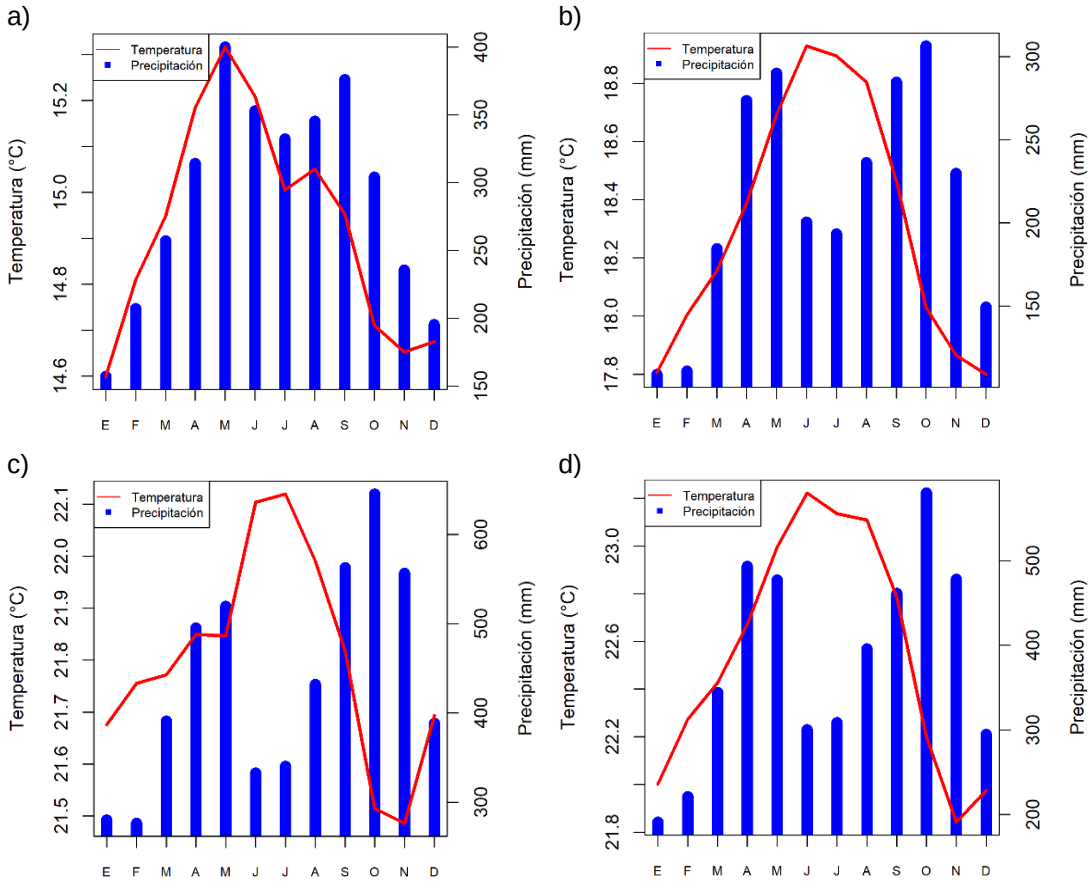


Figura 5-46. Diagramas precipitación vs temperatura en las estaciones: a) Mesopotamia, b) El Peñol, c) San Francisco y d) San Carlos

En síntesis, dada la ubicación de las estaciones analizadas respecto a la Cuenca del Río Cocorná, se esperaría que en la cuenca se presenten temporadas climáticas similares a las encontradas para las estaciones El Peñol, San Francisco y San Carlos. Teniendo así, temporadas secas durante junio-julio-agosto y diciembre-enero-febrero y húmedas durante marzo-abril-mayo y septiembre-octubre-noviembre.

5.1.3.1.10 Observaciones y conclusiones

Teniendo en cuenta el análisis anterior se espera que en la cuenca del Río Cocorná se tenga un ciclo bimodal no muy marcado, incluso tendiendo a unimodal, para las variables hidroclimatológicas con picos máximos en marzo-abril-mayo y septiembre-octubre-noviembre (siento este último más pronunciado) para las variables precipitación, nubosidad y humedad relativa; mientras que, para las variables radiación, evaporación, presión atmosférica y temperatura se esperan picos mínimos en las mismas temporadas, siendo más pronunciado también en septiembre-octubre-noviembre. Este comportamiento general es influenciado en mayor medida por la variación latitudinal anual de la ZCIT; mientras que, en menor medida por variaciones locales, las cuales pueden estar relacionadas con la influencia de la topografía en las variables hidroclimatológicas. La influencia de la topografía en la variación de las condiciones atmosféricas no fue analizada ya que la escala espacial de la información disponible para la zona no permite hacer un análisis detallado de este efecto.

5.1.3.2 Calidad del aire

5.1.3.2.1 Normatividad

5.1.3.2.1.1 Resolución 2254 de 2017

La Resolución 2254 de 2017 establece la norma de calidad del aire o nivel de inmisión y adopta disposiciones para la gestión del recurso aire en el territorio nacional, con el objeto de garantizar un ambiente sano y minimizar el riesgo sobre la salud humana que pueda ser causado por la exposición a los contaminantes en la atmósfera.

De igual forma, incorpora un ajuste progresivo de los niveles máximos permisibles de contaminantes, incluye nuevos contaminantes y define elementos técnicos integrales para mejorar la gestión de la calidad del aire.

5.1.3.2.1.1.1 Niveles máximos permisibles

En el Artículo 2 de la Resolución Número 2254 del 01 de noviembre de 2017 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, que modificó la Resolución 610 de 2010, se establecen los niveles máximos permisibles para contaminantes criterio en condiciones de referencia (25 ºC y 760 mm Hg), estos niveles se muestran en la Tabla 5-28:

Tabla 5-28 Límites máximos permitidos para parámetros de calidad de aire en diferentes tiempos de medición para los parámetros evaluados

Contaminante	Concentración (µg/m³)			
	Diaria	Anual	Horaria	Octohoraria
PM2.5	37	25	---	---
PM10	75	50	---	---

Contaminante	Concentración (µg/m^3)			
	Diaria	Anual	Horaria	Octohoraria
SO_2	50	---	100	---
NO_2	---	60	200	---
CO	---	---	35000	5000
O_3	---	---	---	100

Fuente: Resolución 2254 de 2017

En el parágrafo 2 se establece que para verificar el cumplimiento de los niveles máximos permisibles establecidos en la Tabla 5-28, la concentración de los contaminantes del aire deberá evaluarse por cada punto de monitoreo; el promedio de concentraciones de diferentes puntos de monitoreo no será válido para evaluar el cumplimiento de dichos niveles.

5.1.3.2.1.1.2 Índice de calidad del aire

El Índice de Calidad del Aire (ICA) permite comparar los niveles de contaminación de calidad del aire, de la estación de monitoreo. El ICA, se define como un valor representativo de los niveles de contaminación atmosférica y sus efectos en la salud, dentro de una región determinada. Para efectos del presente estudio, se tienen en cuenta los lineamientos del Manual de Operación de Sistemas de Vigilancia de Calidad de Aire.

El índice de Calidad del Aire permite establecer cómo se encuentra la calidad del aire con respecto a los efectos a la salud. El indicador es adimensional y posee una escala de 0 a 500 que depende del grado de contaminación presente en la atmósfera, tal como se describe en la Tabla 5-29.

Tabla 5-29. Índice de Calidad del Aire, ICA

ICA	Descripción	Color
0 – 50	Bueno	Verde
51 – 100	Aceptable	Amarillo
101 – 150	Dañina para la salud de grupos sensibles	Naranja
151 – 200	Dañina para la salud	Rojo
201 – 300	Muy Dañina para la salud	Púrpura
301 – 500	Peligroso	Marrón

Fuente: Resolución 2254 de 2017

El ICA es una herramienta importante en la determinación de indicadores que correlacionan las actividades propias del área y el impacto que éstas generan sobre las condiciones de calidad de la atmósfera, que orienten decisiones sobre la base del

conocimiento, para de esta forma, materializar condiciones sostenibles de ocupación y crecimiento económico y urbano de la región.

El ICA será calculado a partir de la siguiente ecuación, que corresponde a la metodología utilizada por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos de América (US EPA, por sus siglas en inglés) para el cálculo del ICA y será reportado el mayor valor que se obtenga del cálculo de cada uno de los contaminantes medidos:

$$ICA_p = \frac{I_{Alto} - I_{bajo}}{PC_{Alto} - PC_{bajo}} * (C_p - PC_{bajo}) + I_{bajo}$$

En la cual:

ICAp = Índice de calidad para el contaminante p
Cp = Concentración medida para el contaminante p
PC_{alto} = Punto de corte mayor o igual a Cp
PC_{bajo} = Punto de corte menor o igual a Cp
I_{alto} = Valor del ICA correspondiente a PC_{alto}
I_{bajo} = Valor del ICA correspondiente a PC_{bajo}

Los puntos de corte que determinan los rangos de ICA para cada uno de los contaminantes evaluados son mostraos en la Tabla 5-30.

Tabla 5-30 Puntos de corte del ICA

Índice de Calidad del Aire			Puntos de corte del ICA						
ICA	Color	Categoría	PM10 µg/m3 24 horas	PM2,5 µg/m3 24 horas	CO µg/m3 8 horas	SO2 µg/m3 1 hora	NO2 µg/m3 1 hora	O3 µg/m3 8 horas	O3 µg/m3 1 hora
0-50	Verde	Buena	0-54	0-12	0-5094	0-93	0-100	0-106	……..
51-100	Amarillo	Aceptable	55-154	13-37	5095-10819	94-197	101-189	107-138	……
101-150	Naranja	Dañina a la Salud de Grupos Sensibles	155-254	38-55	10820-14254	198-486	190-677	139-167	245-323
151-200	Rojo	Dañina a la Salud	255-354	56-150	14255-17688	487-797	678-1221	168-207	324-401
201-300	Púrpura	Muy dañina a la salud	355-424	151-250	17689-34862	798-1583	1222-2349	208-393	402-794
301-500	Marrón	Peligrosa	425-604	251-500	34863-57703	1584-2629	2350-3853	394	795-1185

Fuente: Resolución 2254 de 2017

De acuerdo con las concentraciones obtenidas para campaña de monitoreo por cada parámetro y por cada estación, se calculan los índices de calidad del aire, que permiten establecer cómo se encuentra la calidad del aire en el área de influencia del proyecto, con respecto a la normatividad actual vigente llevadas a las condiciones atmosféricas de referencia.

5.1.3.2.1.2 Resolución 2154 de 2010

La Resolución 2154 de 2010 ajusta el Protocolo para el Monitoreo y Seguimiento de la Calidad del Aire adoptado por la Resolución 650 de 2010; en este se establecen dos documentos: el Manual de Diseño y el Manual de Operación.

El Manual de Diseño de Sistemas de Vigilancia de la Calidad del Aire incorpora los lineamientos para tener en cuenta para llevar a cabo el diseño y la operación de los Sistemas de Vigilancia de la Calidad del Aire en el país. Contiene las generalidades sobre los sistemas de vigilancia de calidad del aire, la explicación de los sistemas de vigilancia de la calidad del aire en el marco de los planes de gestión de calidad del aire, las etapas generales para el diseño de un sistema de vigilancia de la calidad del aire y los pasos relacionados con la revisión inicial y la fase final de elaboración del diseño del sistema, dependiendo del sistema de vigilancia que se requiera instalar. De igual manera, presenta los parámetros de diseño de un sistema de vigilancia de la calidad del aire y criterios para realizar modificaciones a los sistemas de vigilancia, así como los recursos necesarios para el montaje, operación y seguimiento de estos sistemas de vigilancia, y cuenta información relacionada con clasificación de áreas-fuente de contaminación y validez de la información recolectada en campañas de monitoreo.

Por su parte, el Manual de Operación de Sistemas de Vigilancia de la Calidad del Aire incorpora los lineamientos a tener en cuenta para llevar a cabo la operación de los Sistemas de Vigilancia de la Calidad del Aire en el país. Contiene los tipos de sistemas de vigilancia de la calidad del aire según su tecnología y presenta en detalle los sistemas manuales, automáticos e híbridos de vigilancia de la calidad del aire. Así mismo, se presentan elementos comunes a todos los sistemas de vigilancia de la calidad del aire como el programa de control y aseguramiento de la calidad del aire, el análisis de la información generada y la generación de reportes.

5.1.3.2.2 Monitoreo

Con el objetivo de identificar los niveles de contaminación atmosférica en la zona de estudio fueron realizados dos (2) monitoreos de calidad del aire; el primero fue realizado entre el 05 y el 22 de diciembre de 2018, en el cual se instalaron 2 estaciones de calidad del aire que contaban con equipos para medir los niveles de material particulado inhalable (PM10), material particulado inhalable fino (PM2.5), dióxidos de azufre (SO_2) y dióxidos de nitrógeno (NO_2); y una estación meteorológica portátil localizada en cercanías de una de las estaciones de calidad del aire. El segundo monitoreo fue realizado entre el 19 de agosto y el 05 de septiembre de 2020, para en cual se instalaron 2 estaciones de calidad del aire que contaban con equipos

para el monitoreo de monóxido de carbono (CO) y ozono (O_3), y únicamente una de ellas contaba con equipos para medir material particulado inhalable (PM10), material particulado inhalable fino (PM2.5), dióxidos de azufre (SO_2) y dióxidos de nitrógeno (NO_2).

Los muestreos de calidad del aire (excepto la toma de muestras de PM2.5 en el monitoreo del 2018) y los análisis de laboratorio fueron desarrollados por el laboratorio SIAM INGENIERÍA S.A.S, acreditado por el IDEAM mediante la Resolución No.1742 del 30 de julio de 2018; La toma de muestras de $PM_{2.5}$ en el monitoreo del 2018 se realizó con el Laboratorio PSL Proanálisis Ltda acreditado mediante Resolución IDEAM No. 191 del 06 de febrero de 2017.

En las mediciones se utilizaron los métodos de muestreo y de cálculo recomendados por la US EPA y avalados en la Normativa Legal Vigente Colombiana, así como los términos de referencia dados por el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial – MAVDT (actualmente Ministerio de Ambiente y Desarrollo sostenible - MADS) mediante el Protocolo para el Monitoreo y Seguimiento de la Calidad del Aire adoptado por la Resolución 2154 de 2010.

5.1.3.2.2.1 Metodología

Los dos monitoreos llevados a cabo contaron con el montaje de dos estaciones cada uno, para el muestreo de contaminantes atmosféricos (PM2.5, PM10, SO_2, NO_2, CO y O_3) Las muestras fueron identificadas mediante etiquetas, con su respectivo código, punto de muestreo, fecha y tipo de muestra. Para las muestras de calidad del aire se contó con los filtros en fibra de cuarzo y teflón previamente pesados e identificados; soluciones absorbentes para los parámetros SO_2 y NO_2 con sus respectivas fichas de seguridad y los elementos de seguridad necesarios para su manipulación.

La concentración de material particulado grueso (PM10) suspendido en la atmósfera se determina mediante el método US EPA 40 CFR Parte 50 Apéndice J para el parámetro PM10. En este método la toma de muestra se realiza mediante un muestreador Hi-Vol, el cual arrastra una cantidad medible de aire ambiente que pasa a través de un filtro de fibra de vidrio, durante un período de muestreo (nominal) de 24 horas. El filtro se pesa (después de equilibrar la humedad) antes y después de usarlo, para determinar el peso (masa) neto ganado. El volumen de aire se determina con base en el flujo estándar promedio y el tiempo de muestreo.

Para el PM2.5 el método de referencia que aplica es el US EPA Titulo 40 Parte 50 Apéndice: L, PM2.5; donde un muestreador de aire impulsado eléctricamente aspira aire ambiente a un caudal volumétrico constante en una entrada de forma especial y a través de un separador de tamaño de partícula inercial (impactador) donde el material particulado suspendido en el rango de tamaño PM2.5 se separa para su recolección en un filtro de teflón. El filtro es previamente acondicionado de acuerdo con los requerimientos del método de la US EPA, y posteriormente es pesado en una micro-balanza antes y después de usarlo, para determinar el peso (masa) neto ganado. El volumen de aire se determina con base en el flujo estándar promedio y el

tiempo de muestreo. Dentro del proceso, se realiza control de calidad que se base en duplicados de muestra, blanco de laboratorio, blanco de campo y pruebas rutinarias de la micro balanza con el fin de garantizar la idoneidad de los resultados.

Las muestras para análisis de NO_2 y SO_2 se toman simultáneamente mediante el tren de muestreo que va conectado a la bomba de vacío y consta de un tubo distribuidor conectado en paralelo a tres colectores de vidrio de borosilicato (burbujeadores) que contienen la solución absorbente para los gases, y el otro vacío que hace las veces de la trampa (burbujeador trampa). El flujo de aire pasa a través del sistema y es controlado por orificios críticos, el cual es calibrado antes y después de la colección de la muestra. La determinación de la concentración de los gases en el aire se realiza mediante métodos analíticos establecidos en normas internacionales (ISO), acogidas y establecidas por entidades nacionales como el ICONTEC, el IDEAM y señalados en la Legislación Nacional como los apropiados para tal fin. Para la determinación del SO_2 se tuvo como referencia el Método de Tetracloruromercurato (TCM)/Pararrosanilina US EPA 40 CFR Parte 50 - Apéndice A. y para NO_2 el Método colorimétrico indicado en la Resolución 03194 de 1983 expedida por el Ministerio de Salud, equivalente al método Jacobs Hochheiser fijado en el Decreto 02 de 1983.

La concentración de CO fue determinada siguiendo el Método US EPA Título 40 Parte 50 Apéndice: C, infrarrojo no dispersivo. Equivalente: RFCA-0981-05; en este las mediciones se basan en la absorción de radiación infrarroja por el monóxido de carbono (CO) en un fotómetro no dispersivo. La energía infrarroja de una fuente se pasa a través de una celda que contiene la muestra de gas a analizar, y la absorción cuantitativa de la energía por CO en la celda de muestra se mide mediante un detector adecuado. El fotómetro se sensibiliza a CO mediante el empleo de gas CO ya sea en el detector o en una celda de filtro en la trayectoria óptica, limitando de este modo la absorción medido a una o más de las longitudes de onda características a la que CO absorbe fuertemente. La absorción medida se convierte en una señal eléctrica de salida, que está relacionada con la concentración de CO en la celda de medición.

El Ozono (O_3) fue medido con un equipo automático, teniendo como referencia el Método US EPA Título 40 Parte 50 Apéndice: D equivalente EQOA-0880-047. La medición automática se basa en el principio de que las moléculas de ozono absorben luz a una longitud de onda de 254 nm. El grado en el cual la luz es absorbida está directamente relacionado con la concentración de ozono según la ley de Beer. Cuando la muestra de aire ambiente ingresa en el equipo, esta es dividida en dos flujos, uno de gas de referencia o blanco (contiene scrubber de ozono), y otro de muestra que van a dos celdas, ambas pasan el fotómetro y el detector y al final la concentración de ozono es obtenida automáticamente.

5.1.3.2.2.2 Información del monitoreo

5.1.3.2.2.2.1 Fecha y hora

Las mediciones de calidad del aire se realizaron en los sitios, fechas y coordenadas presentes en la Tabla 5-31:

Tabla 5-31.Fecha y Hora de monitoreo.

Estación	Fecha Inicial	Fecha Final	Coordenadas Magna Colombia Bogotá		Altura (msnm)
			Y (m)	X (m)	
Estación 1: El Diamante	2018-12-05	2018-12-22	1.159.506	877.281	1361
Estación 2: Las Arenosas	2018-12-05	2018-12-22	1.160.401	878.329	1123
Estación 3: Zona de Captación	2020-08-19	2020-09-05	1.160.447	874.578	1450
Estación 4: Zona casa de máquinas	2020-08-19	2020-09-05	1.159.813	877.800	1235

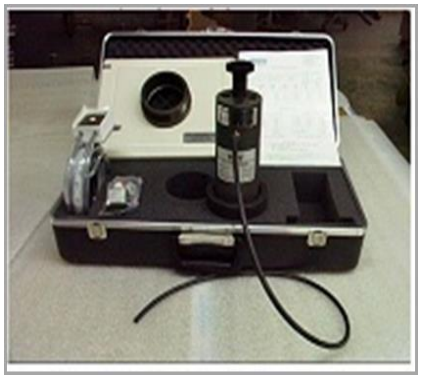
En el Anexo 5.1.4.2, se encuentran los formatos de campo de cada uno de los monitoreos realizados, donde se especifica la fecha de inicio y fecha final como la hora inicial y final de cada una de las mediciones diarias; para las mediciones de material particulado PM10 y PM2.5, gases NO_2 y SO_2

5.1.3.2.2.2.2 Equipos de medición

Las estaciones de monitoreo se equiparon con las siguientes unidades de monitoreo, las cuales se presentan en la Tabla 5-32, con certificados de calibración respectivos, mostrados en el Anexo 5.1.4.2

Tabla 5-32 Equipos empleados en el monitoreo de calidad de aire

Equipo	Fotografía	Número de Serie	Fecha de calibración (C) o Verificación (V)
Equipo PM_{10} con controlador de flujo volumétrico (VFC) Enviromental Tisch TE-6070		E1: E-CAM-PM10-008	05-12-2018 (V)
		E2: E-CAM-PM10-005	05-12-2018 (V)
		E3: E-CAM-PM10-005	19-08-2020 (V)
Equipo muestreador de bajo volumen para medición de $PM_{2.5}$		E1: E-CAM-LOW-001	05-12-2018 (V)
		E2: E-CAM-LOW -003	05-12-2018 (V)
		E3: E-CAM-LOW-005	19-08-2020 (V)
Tren de muestreo para medición de gases (NO_2, SO_2) mediante absorción en soluciones especiales (Rack de gases)		E1: E-CAM-RACK-012	05-12-2018 (V)
		E2: E-CAM-RACK-014	05-12-2018 (V)
		E3: E-CAM-RACK-011	19-08-2020 (V)

Equipo	Fotografía	Número de Serie	Fecha de calibración (C) o Verificación (V)
Equipo Analizador de CO medición directa NDIR		E3: E-CAM-AUTO-004	19-08-2020 (V)
		E4: E-CAM-AUTO-001	19-08-2020 (V)
Equipo analizador Thermo 49C medición directa O3 por UV		E3: E-CAM-AUTO-018	19-08-2020 (V)
		E4: E-CAM-AUTO-012	19-08-2020 (V)
Calibrador tipo variflow de equipo Hi Vol		E1 y E2: SERIAL/MODELO 2403	2018-04-20 al 2019-04-20 (C)
		E3: SERIAL/MODELO 2403	2020-07-27 al 2021-07-27 (C)
Caudalímetro de Gases Deltacal		E1 y E2: S/N 520	2018-02-20 al 2019-02-19 (C)
		E3: S/N 94	2020-06-24 al 2021-06-21 (C)

Equipo	Fotografía	Número de Serie	Fecha de calibración (C) o Verificación (V)
Caudalímetro de gases BIOS		E1 y E2: 5370	2018-02-20 al 2020-02-19 (C)
		E3: DEFENDER 510	2020-06-01 al 2021-06-01 (C)
Estación Meteorológica Ambient Weather WS-1075		MO-2542A	02-03-2018 (V)
Estación Meteorológica Davis VUE		E-CAM-MET-03	19-08-2020 (V)

5.1.3.2.2.2.3 Localización

Para la ubicación de las estaciones de monitoreo se tuvieron en cuenta los criterios de ubicación establecidos por el Protocolo para el Monitoreo y Seguimiento de la Calidad del Aire en su Manual de Diseño de Sistemas de Vigilancia de la Calidad del Aire, numeral 6.4; la cercanía a algunas de las principales obras del proyecto (Casa de Máquinas). Se garantizó que los sitios seleccionados cumplieran con las condiciones adecuadas de acceso, suministro eléctrico y seguridad para equipos y personal. La ubicación general de los sitios de monitoreo seleccionados se muestra en la Figura 5-47.

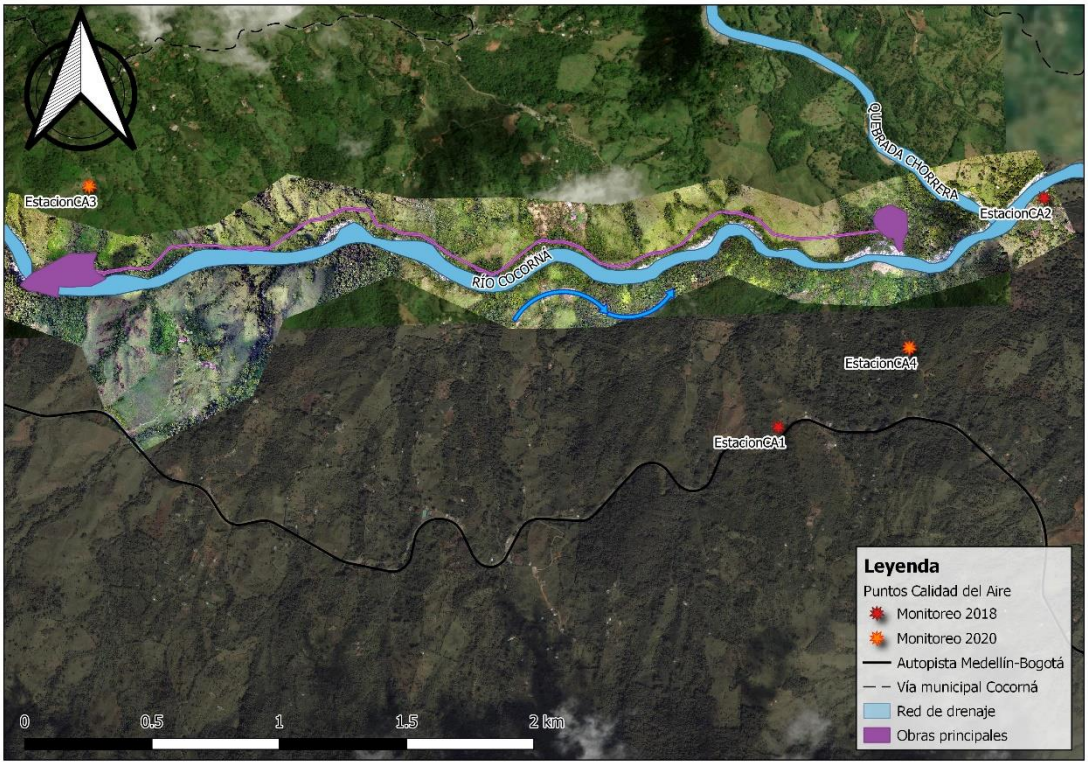


Figura 5-47. Puntos seleccionados para monitoreo de calidad del aire

5.1.3.2.2.3 Descripción del área de estudio y fuentes de emisión

Las estaciones de medición de calidad del aire se ubicaron de tal manera que registraran el grado de contaminación actual, en cada una de ellas se identificaron las fuentes predominantes del sector. En la Tabla 5-33 y la Tabla 5-36se describen las fuentes identificadas de acuerdo con la ubicación de cada estación de monitoreo. Las coordenadas están dadas en el sistema de coordenadas Magna Sirga origen Bogotá. La descripción técnica de las estaciones y el registro fotográfico de las actividades del monitoreo se encuentran en el Anexo 5.1.4.2

Tabla 5-33. Descripción del entorno y las fuentes de emisión Estación 1

Estación	Fuentes de emisión identificadas
Estación 1: El Diamante	En el sector de monitoreo se observaron las siguientes fuentes de emisión como: Vía primaria Medellín-Bogotá con gran flujo vehicular en ambos sentidos
Registro fotográfico	

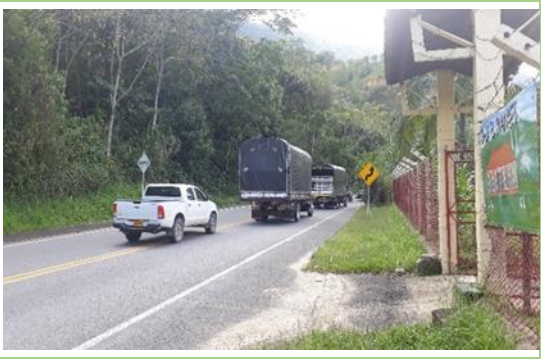
Estación	Fuentes de emisión identificadas
Estación de calidad del aire	
 Vía primaria (Autopista Medellín-Bogotá)	

Tabla 5-34. Descripción del entorno y las fuentes de emisión Estación 2

Estación	Fuentes de emisión identificadas
Estación 2: Las Arenosas	En el sector de monitoreo se observaron las siguientes fuentes de emisión como: Vía secundaria con bajo flujo vehicular en ambos sentidos Trapiche
Registro fotográfico	

Estación	Fuentes de emisión identificadas
Estación de calidad del aire	
Vía secundaria	
Trapiche	

Tabla 5-35. Descripción del entorno y las fuentes de emisión Estación 3

Estación	Fuentes de emisión identificadas
Estación 3: Zona de Captación	En el sector de monitoreo se observaron las siguientes fuentes de emisión como: Vía privada destapada de acceso a la finca con bajo flujo vehicular. Establo de ganadería bovina y dos galpones de gallinas ponedoras que se encuentran en funcionamiento diario. Chimenea de la finca, la cual se usa de manera esporádica.
Registro fotográfico	
 Estación de calidad del aire	
 Vía destapada (Acceso a la finca)	 Chimenea doméstica

Establo	Galpones

Tabla 5-36. Descripción del entorno y las fuentes de emisión Estación 4

Estación	Fuentes de emisión identificadas
Estación 4: Zona Casa de máquinas	En el sector de monitoreo se observaron las siguientes fuentes de emisión como: Autopista (Medellín – Bogotá) con flujo vehicular alto en su mayoría mulas. Viviendas aledañas con chimeneas de madera como fuente de combustible.
Registro fotográfico	
 Estación de calidad del aire	

Estación	Fuentes de emisión identificadas
Vía primaria (Autopista Medellín-Bogotá)	Chimenea doméstica

5.1.3.2.2.4 Resultados y análisis

5.1.3.2.2.4.1 Meteorología

Durante el tiempo de realización del monitoreo de calidad de aire se tomaron mediciones meteorológicas mediante el uso de equipo portátil instalado en la Estación 1: El Diamante para el monitoreo 2018 (Foto 5-1) y en la Estación 3: Zona de Captación para el monitoreo 2020 (Foto 5-2), registrándose datos con intervalos de 30 minutos en los parámetros de presión atmosférica, temperatura, humedad relativa, precipitación, dirección y velocidad de viento, los valores diarios registrados se muestran en la Tabla 5-37.

Foto 5-1. Estación meteorológica ubicada en la Estación 1: El Diamante

Georreferenciación: Y: 1.159.506; X 877.821; H: 1361

Foto 5-2. Estación meteorológica ubicada en la Estación 3: Zona de Captación

Georreferenciación: Y: 1.160.447 X: 874.578 H: 1450

Tabla 5-37 Resumen variables meteorológicas, valores diarios

Monitoreo	Fecha	Temperatura Promedio (°C)	Presión atmosférica Promedio (mm Hg)	Humedad Promedio (%)	Velocidad del viento Promedio (m/s)	Precipitación Acumulada (mm H_2O)
Monitoreo 2018	2018-12-05	20,46	649,93	92,19	0,61	0,02
	2018-12-06	20,61	651,36	86,08	0,69	0,95
	2018-12-07	20,07	650,08	89,90	0,56	0,15
	2018-12-08	20,31	650,13	92,33	0,44	0,30
	2018-12-09	20,67	650,68	90,69	0,59	0,00
	2018-12-10	21,08	649,66	89,92	0,61	0,30
	2018-12-11	20,72	649,56	92,08	0,66	0,66
	2018-12-12	21,09	649,24	91,94	0,56	1,02
	2018-12-13	21,72	648,68	89,73	0,58	0,00
	2018-12-14	21,32	649,25	86,75	0,67	0,00
	2018-12-15	20,92	649,29	88,50	0,69	0,00
	2018-12-16	20,73	648,93	87,65	0,76	0,18
	2018-12-17	20,83	648,65	89,13	0,56	0,05
	2018-12-18	20,59	648,48	92,06	0,57	0,31
	2018-12-19	20,89	648,03	90,17	0,71	1,16
	2018-12-20	21,03	648,32	89,00	0,67	0,81
	2018-12-21	20,07	648,62	89,10	0,76	0,00
	2018-12-22	19,70	648,29	88,54	0,63	0,11
	2018-12-23	19.16	648,44	89,41	0,65	0,00
Promedio Monitoreo 2018		**20,69**	**649,24**	**89,75**	**0,63**	**6,41***
Monitoreo 2020	2020-08-19	20,59	643,07	88,18	1,04	28,40
	2020-08-20	20,00	646,06	88,19	0,71	7,88
	2020-08-21	20,02	646,08	88,73	0,53	26,66
	2020-08-22	19,40	646,39	87,15	0,37	19,35
	2020-08-23	19,73	646,29	86,94	0,69	4,55
	2020-08-24	19,85	645,49	82,15	0,96	17,51
	2020-08-25	20,57	653,20	85,96	0,15	5,84
	2020-08-26	18,82	664,02	88,52	0,38	0,00
	2020-08-27	23,54	772,11	80,75	0,00	0,25

Monitoreo	Fecha	Temperatura Promedio (°C)	Presión atmosférica Promedio (mm Hg)	Humedad Promedio (%)	Velocidad del viento Promedio (m/s)	Precipitación Acumulada (mm H_2O)
	2020-08-28	20,49	773,06	83,73	0,34	0,00
	2020-08-29	19,90	764,26	81,04	0,40	0,76
	2020-08-30	18,37	756,68	83,98	0,71	1,26
	2020-08-31	20,44	756,09	85,83	1,07	29,29
	2020-09-01	20,50	755,09	83,90	1,02	15,49
	2020-09-02	19,48	755,55	84,60	0,64	7,61
	2020-09-03	20,34	754,34	83,49	0,65	3,55
	2020-09-04	20,69	755,08	85,52	0,94	28,96
	2020-09-05	21,65	755,19	81,65	1,31	19,29
Promedio Monitoreo 2020		**20,24**	**710,45**	**85,02**	**0,66**	**216,65**

*El valor “promedio” de precipitación, corresponde al valor acumulado durante el periodo de muestreo

- Comportamiento de la velocidad del viento

La dispersión de contaminantes de una fuente depende de la cantidad de turbulencia en la atmósfera cercana que es creada por el movimiento horizontal (viento) y vertical de la atmósfera. La velocidad del viento afecta en gran medida le concentración de contaminantes en un área, mientras mayor sea la velocidad del viento mayor será la dilución y dispersión de contaminantes. La Figura 5-48 y la Figura 5-49 muestra el comportamiento de la velocidad del viento durante las campañas de monitoreo, en ellas se observa que los registros estuvieron en el orden de los 0 a 2,2 m/s para el monitoreo 2018 y entre 0 y 2,7 para el monitoreo 2020.

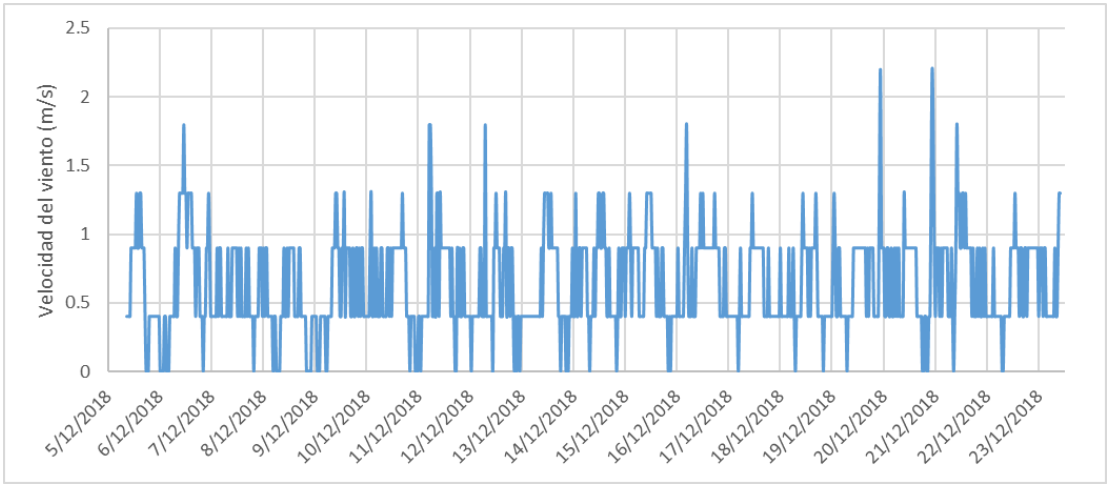


Figura 5-48. Velocidad del viento durante el monitoreo 2018

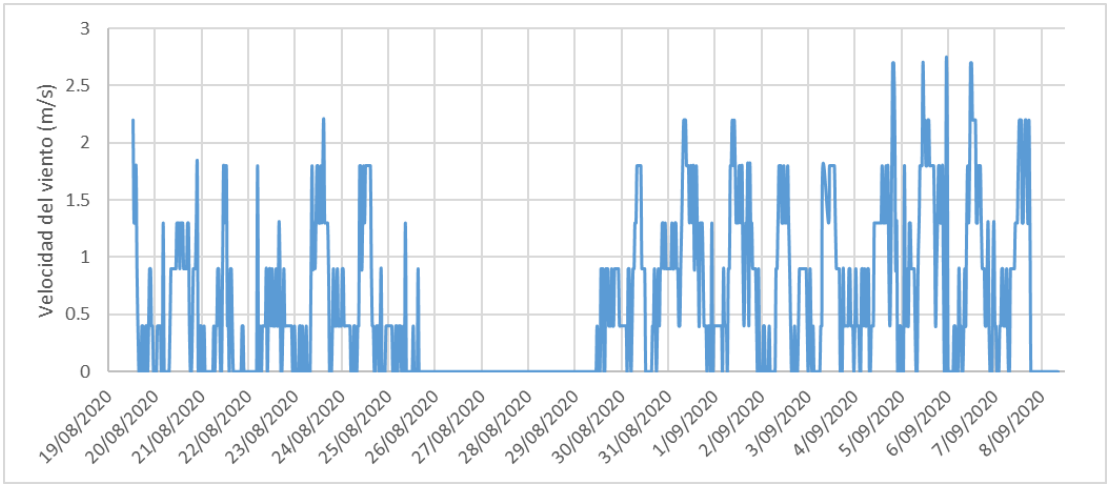


Figura 5-49. Velocidad del viento durante el monitoreo 2020

La mayor velocidad del viento registrada en el monitoreo 2018 fue de 2,2 m/s, el día 20 de diciembre de 2018 a las 22:00, mientras que la máxima registrada en el monitoreo 2020 fue de 2,7 m/s; la velocidad mínima en ambos monitoreos fue 0,0 m/s y la velocidad promedio estuvo por el orden de 0,6 m/s en los dos monitoreos que según la escala Beaufort (Ver Tabla 5-38) se clasifica en Ventolina por su velocidad media.

Tabla 5-38. Escala de Beaufort.

Definición	Nudos	m/s	km/h	Condición en tierra
F0 - Calma	s< 1	0-0,2	< 1	El humo sube verticalmente
F1 - Ventolina	1-3	0,3-1,5	1-5	La dirección del viento se define por la del humo, pero no por las veletas y banderas

Definición	Nudos	m/s	km/h	Condición en tierra
F2 - Flojito (Brisa muy débil)	4-6	1,6-3,3	6-11	El viento se siente en la cara. Se mueven las hojas de los árboles, veletas y banderas
F3 - Flojo (Brisa débil)	7-10	3,4-5,4	12-19	Las hojas de los árboles se agitan constantemente. Se despliegan las banderas
F4 – Bonacible (Brisa moderada)	11-16	5,5- 7,9	20-29	Se levanta polvo y papeles, se agitan las copas de los árboles

Fuente: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. IDEAM.

- Dirección del viento

De la Figura 5-50 a la Figura 5-52 se presenta la rosa de los vientos para el Monitoreo 2018. En la rosa de vientos diurna se puede resaltar que los vientos alcanzaron velocidades hasta 1,8 m/s, los cuales provienen predominantemente desde el Norte (N) con una frecuencia mayor al 23%. De igual forma en dirección Nor-Noreste (NNE) se concentran vientos con velocidades menores representando una repetitividad del 15% aproximadamente; y finalmente se registraron ráfagas de viento con velocidades mayores a los 2 m/s en todas las direcciones. En la rosa de vientos nocturna se puede resaltar que los vientos alcanzaron velocidades hasta los 2,2 m/s y provienen predominantemente desde el Sur (S) con una frecuencia cercana al 25%. De igual forma en Sentido Sur- Suroeste (SSO) se concentran vientos con velocidades menores representando una repetitividad mayor al 16%. Finalmente, en la rosa de vientos total se observa que los vientos alcanzaron velocidades hasta los 2,2 m/s, los cuales provienen predominantemente desde el Sur (S) con una frecuencia mayor al 17%; se registraron ráfagas de viento con velocidades mayores a los 2 m/s en todas las direcciones.

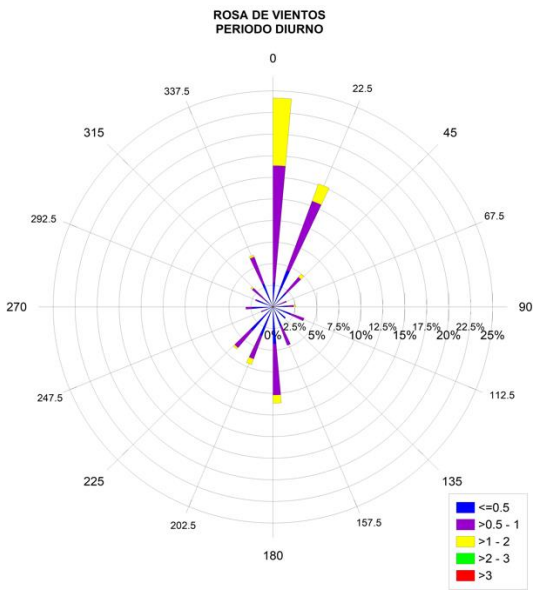


Figura 5-50 Rosa de viento diurna, Monitoreo 2018

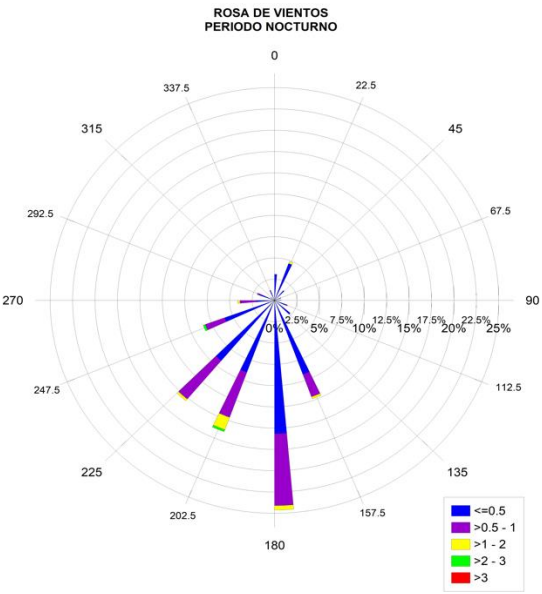


Figura 5-51 Rosa de viento nocturna, Monitoreo 2018

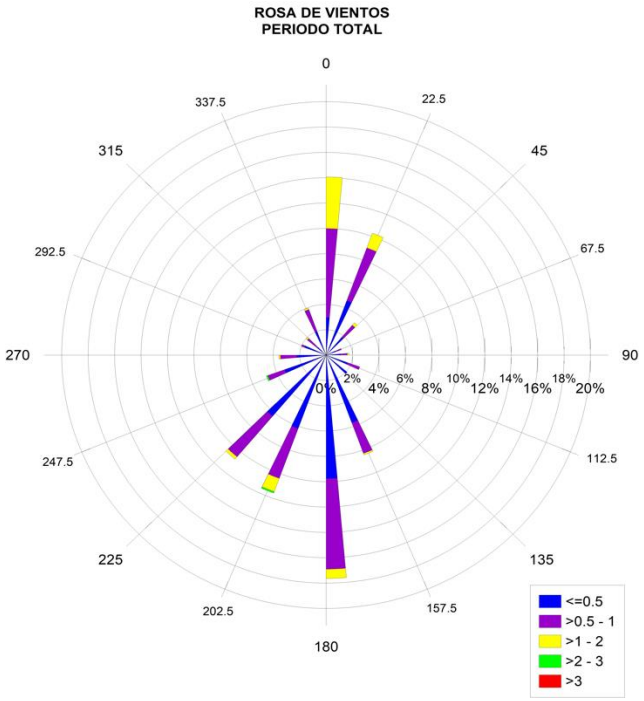


Figura 5-52. Rosa de viento total, Monitoreo 2018

De la Figura 5-53 a la Figura 5-55 se muestra la rosa de vientos para el Monitoreo 2020, En la rosa de vientos diurna se puede resaltar que los vientos alcanzaron velocidades hasta 5,4 m/s, los cuales provienen predominantemente desde el Este Sureste (ESE) con una frecuencia mayor al 35%. De igual forma en dirección Sureste

(SE) se concentran vientos con velocidades menores representando una repetitividad del 25% aproximadamente y finalmente se registraron ráfagas de viento con velocidades mayores a los 3 m/s en todas las direcciones. En la rosa de vientos nocturna, se puede observar que los vientos alcanzaron velocidades hasta los 5,7 m/s y provienen predominantemente desde el Nor-Noroeste (NNO) con una frecuencia cercana al 26%. De igual forma en Sentido Norte (N) se concentran vientos con velocidades menores representando una repetitividad mayor al 25%. Finalmente, la rosa de vientos total, se observa que los vientos alcanzaron velocidades hasta los 5,7 m/s, los cuales provienen predominantemente desde el Este Sureste (ESE) con una frecuencia mayor al 21%; se registraron ráfagas de viento con velocidades mayores a los 3 m/s en todas las direcciones.

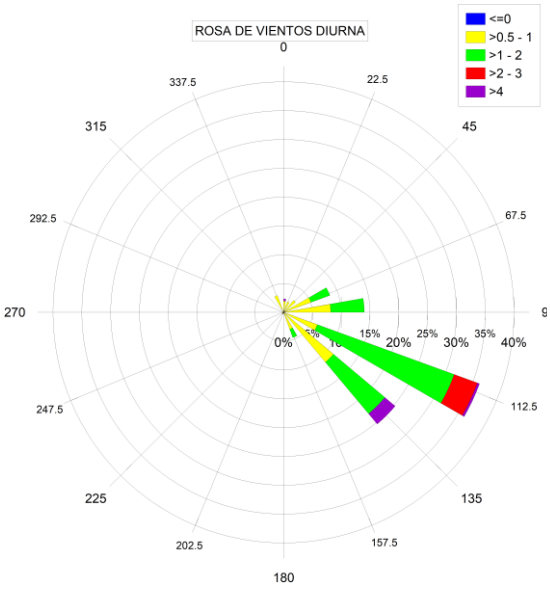


Figura 5-53 Rosa de viento diurna, Monitoreo 2020

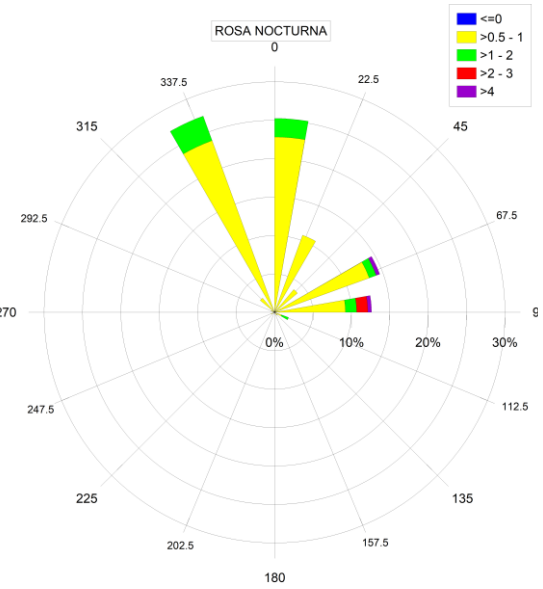


Figura 5-54 Rosa de viento nocturna, Monitoreo 2020

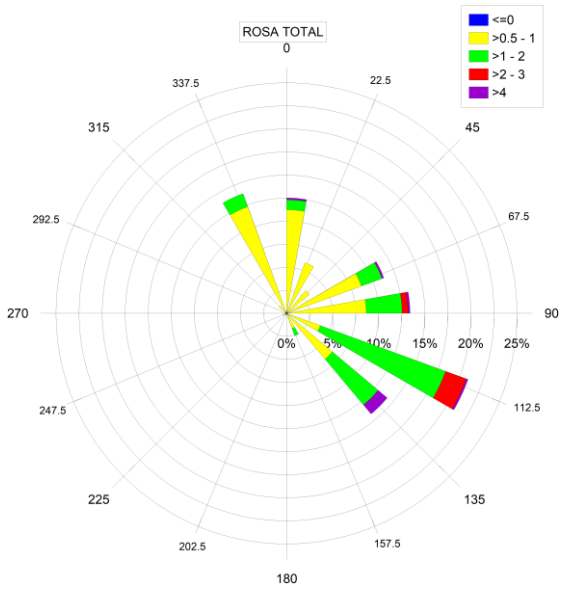


Figura 5-55. Rosa de viento total, Monitoreo 2020

- Comportamiento de la temperatura

La dispersión de contaminantes depende de la cantidad de turbulencia en la atmósfera cercana que puede ser generada por el movimiento horizontal (viento) y vertical de la atmósfera. El movimiento vertical de la atmósfera afecta el transporte y dispersión de los contaminantes del aire, debido a los cambios de temperatura que se presentan durante el día se genera un movimiento constante que crea condiciones inestables y dispersa los contaminantes. Se pueden presentar condiciones atmosféricas estables originando la inversión térmica cuando el aire más caliente se encuentra por encima del aire frío, impidiendo la mezcla vertical, reteniendo el ascenso y dispersión de contaminantes de las capas más bajas de la atmósfera lo que causa un problema localizado de contaminación del aire.

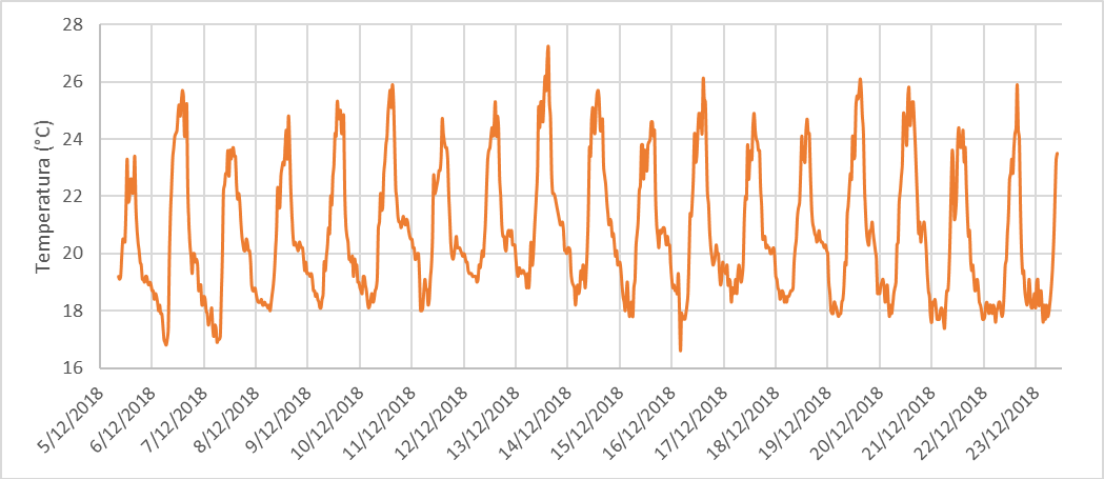


Figura 5-56. Temperatura ambiente en Monitoreo 2018

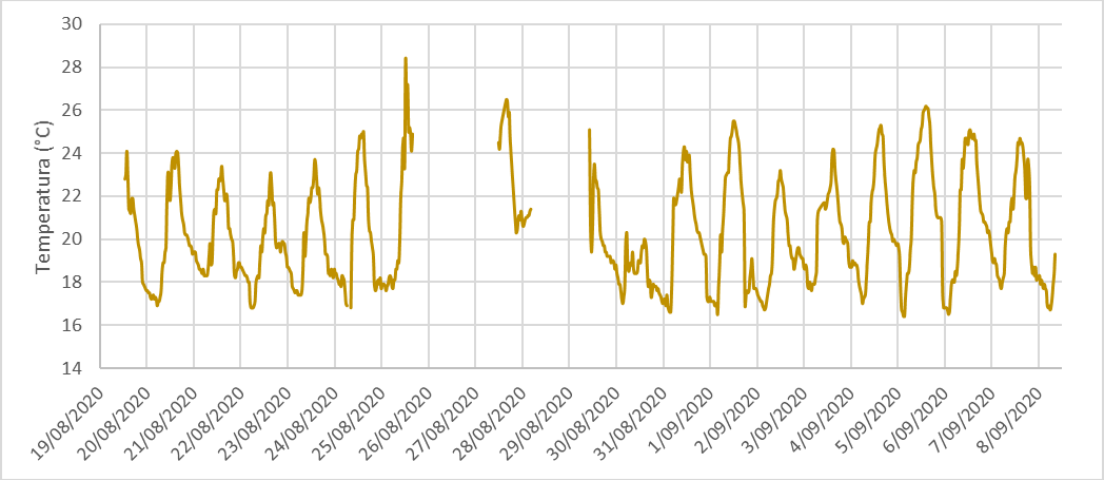


Figura 5-57. Temperatura ambiente en Monitoreo 2020

Según los registros, la temperatura máxima registrada en el monitoreo 2018 fue de 27,2°C registrada el 13 de diciembre de 2018 a las 15:00 p.m., la temperatura mínima fue de 16,6°C registrada el 16 de diciembre a las 4:00 a.m. y la temperatura media es de 20,69°C (ver Figura 5-56). Por otro lado, la temperatura en el monitoreo 2020 osciló entre 28,4°C y 16,4°C; teniendo 20,2°C como temperatura media en el monitoreo (ver Figura 5-57).

La Figura 5-59 presenta el promedio multihorario de temperatura en el monitoreo 2018, es decir, el promedio para todas las horas 1, todas las horas 2, todas las horas 3, etc., en el periodo de monitoreo, la figura evidencia un aumento de temperatura desde las 6:00 horas alcanzando su máximo de aproximadamente 24,64°C a las 14:00 horas donde la temperatura inicia un descenso hacia valores cercanos a los

19,31°C. En cuanto al promedio diario (ver Figura 5-58), se pueden resaltar que los días más cálidos estuvieron por el orden de los 21,72°C. Por su lado, en la Figura 5-60 se muestra el promedio diario de temperatura en el monitoreo 2020, donde se observa una temperatura medianamente estable a lo largo de los días, excepto por el pico máximo el 28/08/2020. El promedio multihorario en el monitoreo 202º, mostrado en la Figura 5-61, muestra un comportamiento similar al mostrado en el monitoreo 2018, con temperaturas más cálidas cerca de las 14 horas y más frías justo antes del amanecer (a las 6 horas).

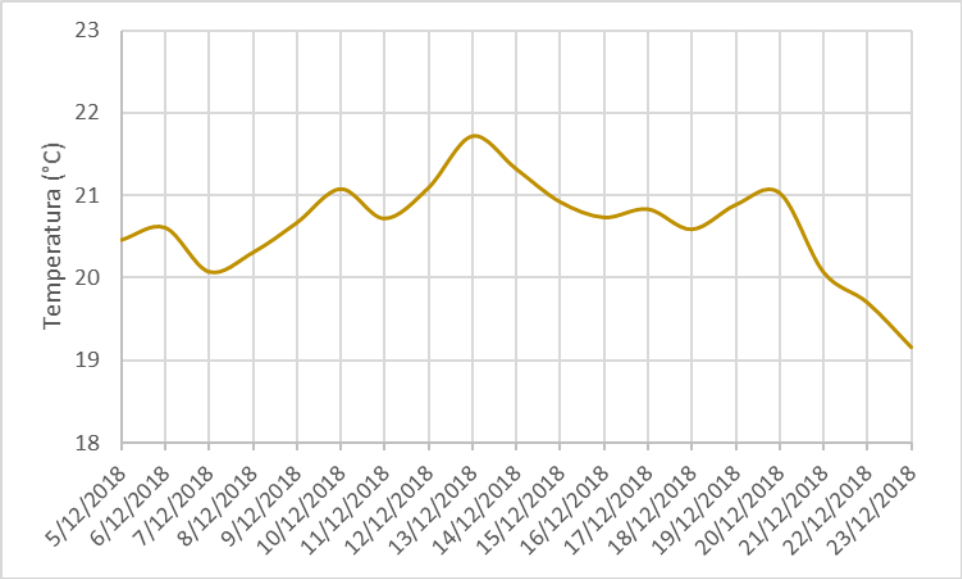


Figura 5-58. Temperatura promedio diaria, Monitoreo 2018

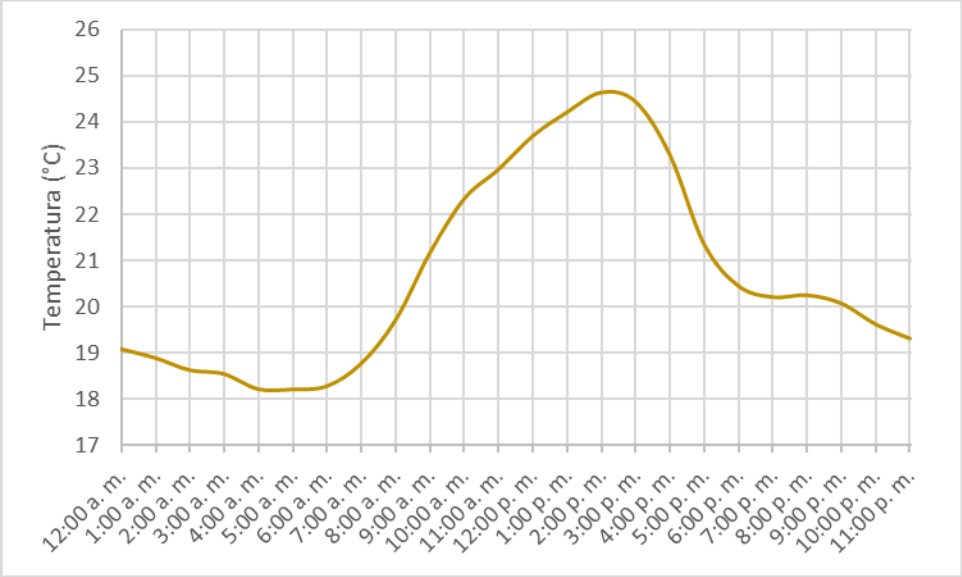


Figura 5-59 Temperatura promedio multihoraria, Monitoreo 2018

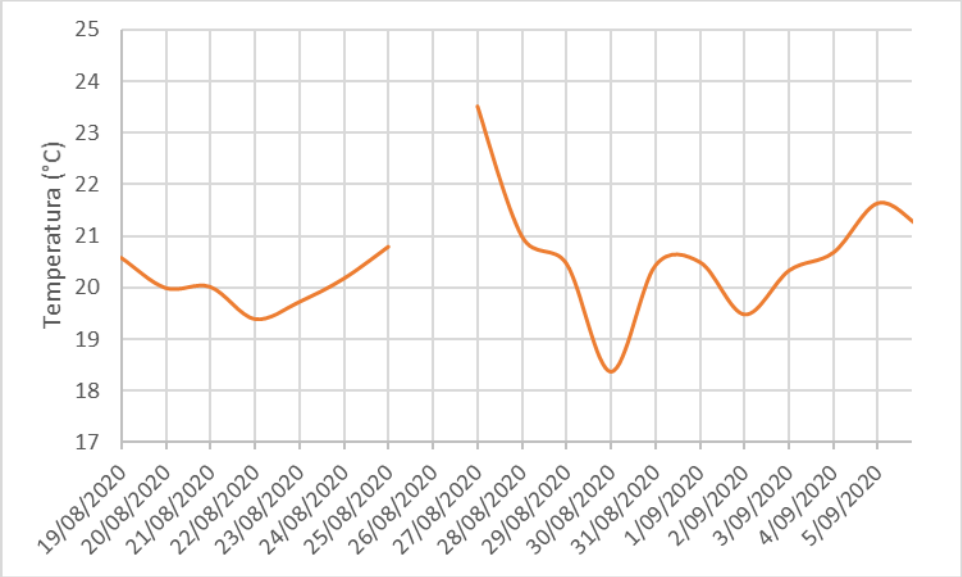


Figura 5-60. Temperatura promedio diaria, Monitoreo 2020

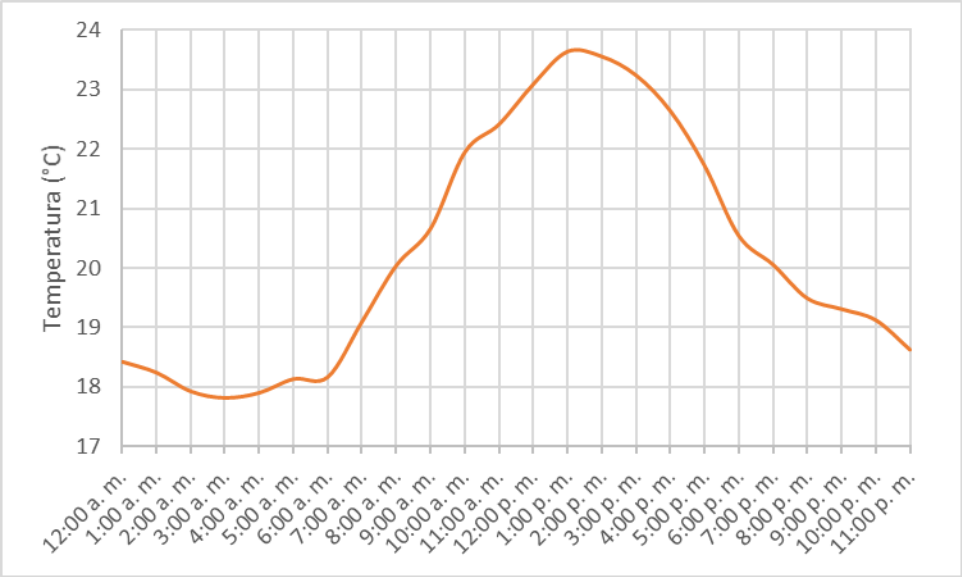


Figura 5-61. Temperatura promedio multihoraria, Monitoreo 2020

- Precipitación

La precipitación es uno de los factores climáticos que mayor incidencia tiene dentro de los procesos de dispersión de contaminantes, pues su presencia hace que las sustancias en suspensión en forma de aerosoles o gases sean arrastradas con ella. En consecuencia, surte un efecto de lavado, manifestado con la disminución en la concentración. Durante los días de monitoreo comprendidos del 05 de diciembre al 22 de diciembre de 2018, se registraron precipitaciones durante 13 días de muestreo. (Ver Figura 5-62). El muestreo 2018 de calidad del aire, dentro del cual se registró este parámetro de precipitación, fue realizado en época seca, lo cual se evidencia en la poca cantidad de lluvia registrada en los días de este monitoreo. Por su parte, el monitoreo 2020 fue realizado en temporada lluviosa, registrándose 16 días con lluvia, de los cuales más de la mitad superaron los 10 mm diarios (ver Figura 5-63).

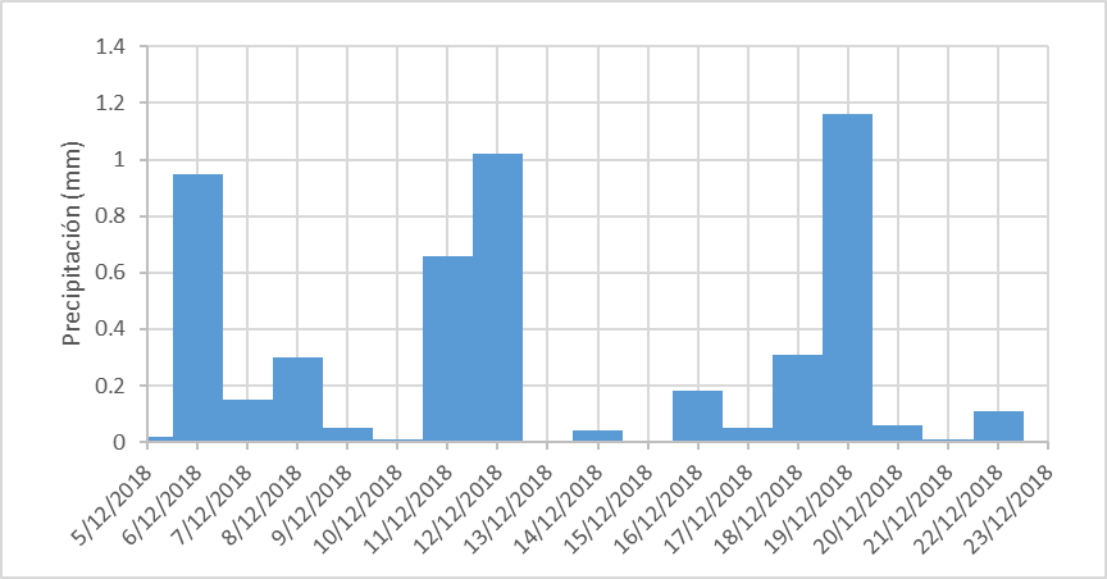


Figura 5-62. Precipitación acumulada diaria, monitoreo 2018

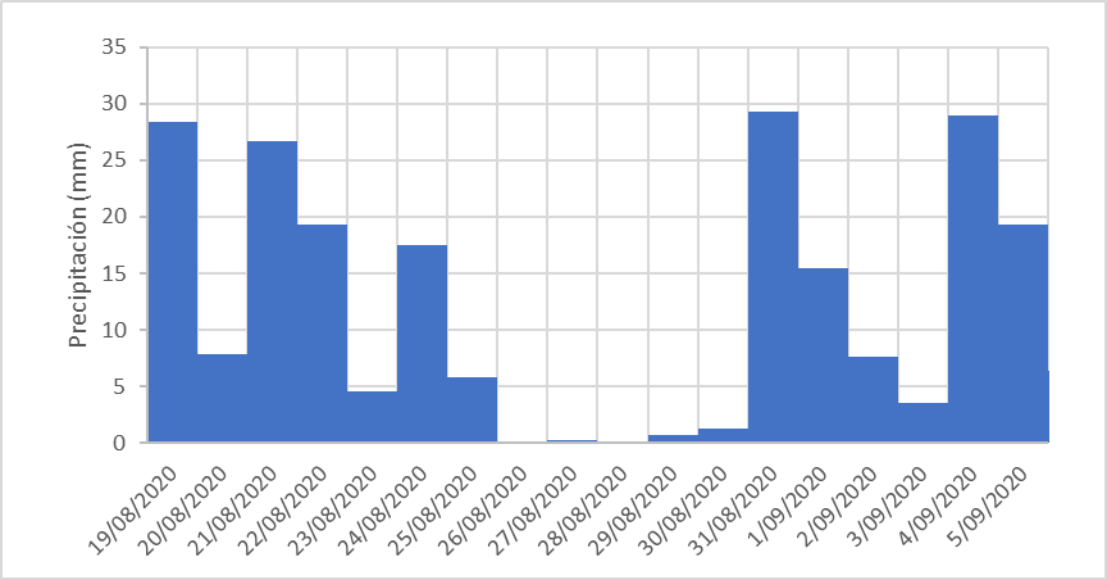


Figura 5-63. Precipitación acumulada diaria, monitoreo 2020

5.1.3.2.2.4.2 Calidad del aire

Una vez tomadas las muestras de campo, analizadas en el laboratorio y posteriormente aprobadas por el Coordinador de Calidad, se determinó si las muestras cumplían con todos los requerimientos para ser validadas y tenidas en cuenta en el tratamiento tratamiento estadístico. Los tiempos de medición para PM10,

PM2.5, NO_2 y SO_2 fueron válidos en todas las estaciones de calidad del aire pues se mantuvieron entre 23 y 25 horas cumpliendo con el tiempo requerido para las mediciones. Las muestras de CO y O_3 también fueron válidas, ya que sus tiempos de muestreo se mantuvieron alrededor de 1 hora para CO y 8 horas para O_3, tal como lo determina la normativa. Los valores de concentración (expresadas a condiciones de referencia de 25 °C y 760 mmHg) diaria y estadísticos por cada contaminante (excepto CO y O_3)y cada estación son mostrados entre la Tabla 5-39 y la Tabla 5-43. Los valores de concentración de CO y O_3 son mostrados en el Anexo 5.1.4.2, debido a la escala horaria en que son presentados.

Tabla 5-39. Concentraciones de contaminantes en la Estación 1: El Diamante

Fecha	PM10 (µg/m³)	PM2.5 (µg/m³)	NO_2 (µg/m³)	SO_2 (µg/m³)
2018-12-05	25,68	12,64	8,94	23,39
2018-12-06	21,12	10,84	0,83	22,62
2018-12-07	24,23	13,06	6,23	19,07
2018-12-08	25,71	12,59	8,15	25,30
2018-12-09	23,45	11,38	6,33	26,36
2018-12-10	24,24	10,67	8,52	21,08
2018-12-11	21,86	9,26	6,68	24,37
2018-12-12	29,11	16,99	6,88	22,92
2018-12-13	25,15	11,22	7,27	20,90
2018-12-14	23,44	15,78	8,27	21,76
2018-12-15	20,51	10,91	4,37	26,23
2018-12-16	19,74	9,50	12,75	22,07
2018-12-17	20,99	10,85	13,35	18,84
2018-12-18	21,68	10,37	6,49	24,07
2018-12-19	25,05	13,23	8,66	20,03
2018-12-20	23,65	11,19	11,59	17,72
2018-12-21	15,20	7,95	9,33	20,46
2018-12-22	10,50	5,88	12,83	17,72

Tabla 5-40. Concentraciones de contaminantes en la Estación 2: Las Arenosas

Fecha	PM10 (µg/m³)	PM2.5 (µg/m³)	NO_2 (µg/m³)	SO_2 (µg/m³)
2018-12-05	28,44	14,13	11,20	20,00
2018-12-06	38,31	19,58	9,23	22,27

Fecha	PM10 (µg/m³)	PM2.5 (µg/m³)	NO_2 (µg/m³)	SO_2 (µg/m³)
2018-12-07	28,42	14,23	7,96	23,80
2018-12-08	23,54	11,37	8,82	19,92
2018-12-09	14,85	7,76	7,88	27,00
2018-12-10	49,47	22,63	9,28	27,31
2018-12-11	18,21	9,45	10,27	18,02
2018-12-12	19,65	9,37	14,50	17,55
2018-12-13	16,12	8,64	11,67	21,95
2018-12-14	14,16	7,29	11,34	21,08
2018-12-15	15,62	7,92	13,30	23,06
2018-12-16	11,98	5,98	14,32	17,59
2018-12-17	13,46	6,85	7,80	21,93
2018-12-18	17,39	7,87	11,51	21,05
2018-12-19	16,30	8,05	11,37	22,29
2018-12-20	14,96	7,80	10,86	23,57
2018-12-21	15,25	7,61	8,64	21,86
2018-12-22	13,66	6,70	10,53	23,30

Tabla 5-41. Concentraciones de contaminantes en la Estación 3: Zona de Captación

Fecha	PM10 (µg/m³)	PM2.5 (µg/m³)	NO_2 (µg/m³)	SO_2 (µg/m³)
2020-08-19	18,02	12,05	16,29	<LCM
2020-08-20	19,45	4,47	<LCM	<LCM
2020-08-21	17,35	8,97	<LCM	<LCM
2020-08-22	19,28	4,59	12,82	<LCM
2020-08-23	17,55	3,30	<LCM	<LCM
2020-08-24	15,53	6,46	<LCM	<LCM
2020-08-25	20,23	11,70	<LCM	<LCM
2020-08-26	19,13	8,20	<LCM	<LCM
2020-08-27	20,20	6,20	<LCM	<LCM
2020-08-28	22,59	9,77	<LCM	<LCM
2020-08-29	DESCARTADA	DESCARTADA	DESCARTADA	DESCARTADA
2020-08-30	17,34	4,18	<LCM	<LCM

Fecha	PM10 (µg/m³)	PM2.5 (µg/m³)	NO_2 (µg/m³)	SO_2 (µg/m³)
2020-08-31	20,60	5,48	<LCM	<LCM
2020-09-01	16,56	9,07	<LCM	<LCM
2020-09-02	25,23	4,97	<LCM	<LCM
2020-09-03	25,87	10,35	<LCM	<LCM
2020-09-04	21,30	3,21	<LCM	<LCM
2020-09-05	24,11	5,71	<LCM	8,77

*LCM: Límite de cuantificación del método

Tabla 5-42. Estadísticos de contaminantes en la Estación 1: El Diamante

Operación	PM10	PM2.5	NO_2	SO_2
Numero de datos	18,00	18,00	18,00	18,00
Promedio	22,30	11,35	8,19	21,94
Mediana	23,45	11,05	8,21	21,91
Coeficiente de Variación	18,85%	22,67%	38,21%	12,33%
Desviación estándar	4,20	2,57	3,13	2,71
Intervalo de confianza (10%)	2,22	1,36	1,65	1,43
Intervalo de confianza (5%)	20,07	9,99	6,54	20,51
Intervalo de confianza (2.5%)	24,52	12,71	9,85	23,37
Percentil 25	21,02	10,44	6,54	20,14
Percentil 75	24,85	12,63	9,23	23,90
Valor máximo	29,11	16,99	13,35	26,36
Valor mínimo	10,50	5,88	0,83	17,72
Cumplimiento de norma diaria[1]	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE[2]	CUMPLE
Cumplimiento de norma anual[1]	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE	N/A

1: Respecto al valor máximo registrado
2: Comparación con nivel máximo permisible horario

Tabla 5-43. Estadísticos de contaminantes en la Estación 2: Las Arenosas

Operación	PM10	PM2.5	NO_2	SO_2
Numero de datos	18,00	18,00	18,00	18,00
Promedio	20,54	10,18	10,58	21,86

Operación	PM10	PM2.5	NO_2	SO_2
Mediana	16,21	7,98	10,70	21,94
Coeficiente de Variación	48,20%	45,37%	19,56%	12,49%
Desviación estándar	9,90	4,62	2,07	2,73
Intervalo de confianza (10%)	5,23	2,44	1,09	1,44
Intervalo de confianza (5%)	15,31	7,74	9,49	20,42
Intervalo de confianza (2.5%)	25,78	12,62	11,68	23,31
Percentil 25	14,88	7,64	8,92	20,26
Percentil 75	22,57	10,89	11,48	23,24
Valor máximo	49,47	22,63	14,50	27,31
Valor mínimo	11,98	5,98	7,80	17,55
Cumplimiento de norma diaria[1]	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE[2]	CUMPLE
Cumplimiento de norma anual[1]	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE	N/A

1: Respecto al valor máximo registrado
2: Comparación con nivel máximo permisible horario

Tabla 5-44. Estadísticos de contaminantes en la Estación 3: Zona de Captación

Operación	PM10	PM2.5	NO_2	SO_2
Numero de datos	17	17	17	17
Promedio	20,02	6,98	---	---
Mediana	19,45	6,20	---	---
Coeficiente de Variación	28%	47%	---	---
Desviación estándar	5,55	3,25	---	---
Intervalo de confianza (10%)	3,02	1,77	---	---
Intervalo de confianza (5%)	17,00	5,21	---	---
Intervalo de confianza (2.5%)	22,55	20,25	---	---
Percentil 25	17,55	4,59	---	---
Percentil 75	21,30	9,07	---	---
Valor máximo	25,87	12,05	16,29	8,77
Valor mínimo	15,53	3,21	---	---
Cumplimiento de norma diaria[1]	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE[2]	CUMPLE
Cumplimiento de norma anual[1]	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE	N/A

1: Respecto al valor máximo registrado
2: Comparación con nivel máximo permisible horario

5.1.3.2.2.4.2.1 Material Particulado PM10

En la Figura 5-64 se presentan los datos diarios de PM10 obtenidos en las estaciones donde fue monitoreado este parámetro, y su comparación frente a los valores máximos permisibles para una exposición diaria (Resolución 2254/2017 del MADS). En la figura se puede observar que en ningunos de los días de los dos monitoreos realizados, se superó el límite máximo permisible, mostrando valores muy buenos de calidad del aire. Se pueden observar algunas variaciones diarias y variaciones entre estaciones que son mínimas, mostrando concentraciones estables de PM10 en el área analizada. Es de resaltar el valor máximo registrado en la Estación 2 durante el sexto (6) día de muestreo, que indica una influencia local en la alteración de la concentración, ya que no se vio reflejada una alteración similar en la Estación 1 (correspondiente al mismo monitoreo que la Estación 2). No se observan diferencias importantes entre los monitoreos 2018 y 2020 para las concentraciones de PM10

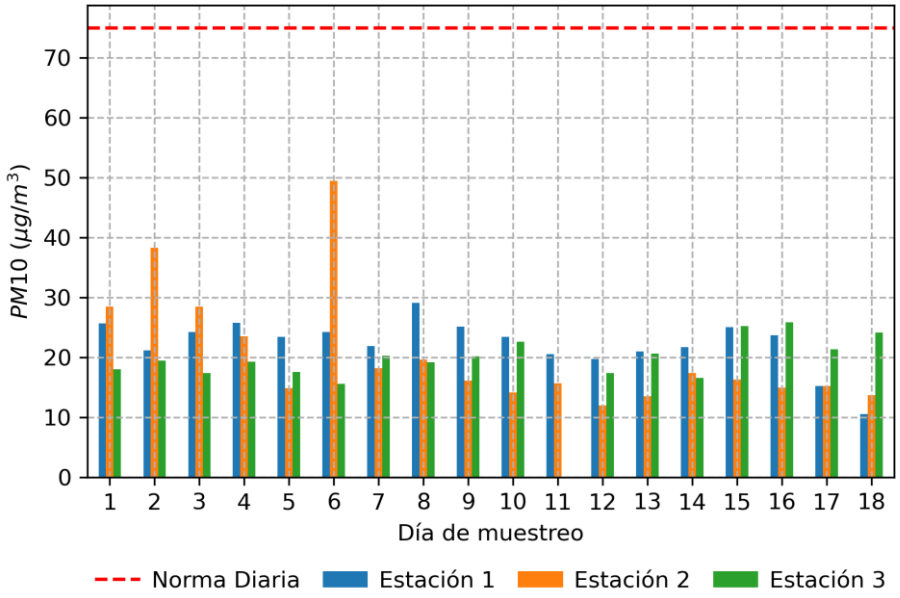


Figura 5-64. Datos de calidad del aire para PM10

Estación 1 y 2 corresponden al Monitoreo 2018, Estación 3 corresponde al Monitoreo 2020

En la Figura 5-65 se presenta el diagrama de cajas y bigotes para la concentración de PM_{10} para las estaciones, comparado de forma indicativa con la norma de exposición anual según se indica en el protocolo de monitoreo y seguimiento de la calidad de aire en la sección 9.3.2.12. Esta figura muestra que el valor máximo presentado en el estudio fue 49,47 µg/m^3 y al comparar de forma indicativa los valores de concentración promedio de PM_{10} se evidencia que estos no son superiores a la norma anual respectiva dada por la Resolución 2254 de 2017, por tanto, se puede inferir que en la zona se espera el cumplimiento de dicho estándar. No se presentan diferencias significativas entre las Estaciones 1 y 2 (correspondientes al mismo

monitoreo) ni con la Estación 3 (Monitoreo 2020); en todas se presentan valores similares y poca variabilidad.

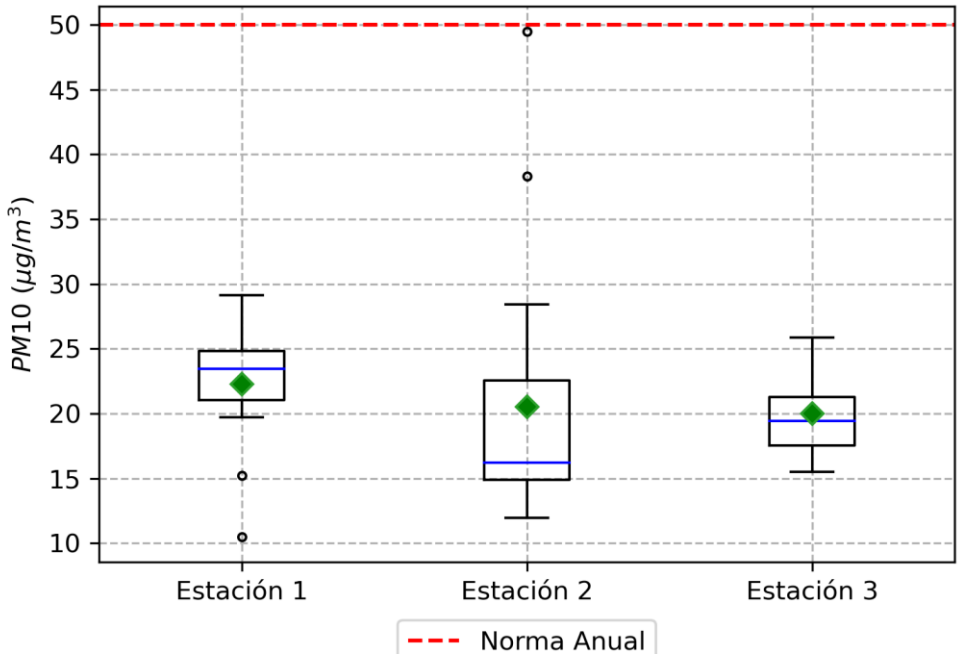


Figura 5-65. Diagrama de caja y bigotes para PM10

Estación 1 y 2 corresponden al Monitoreo 2018, Estación 3 corresponde al Monitoreo 2020

5.1.3.2.2.4.2.2 Material Particulado PM2.5

En la Figura 5-66 se presentan los datos diarios de PM2.5 obtenidos en las estaciones donde fue monitoreado este parámetro, y su comparación frente a los valores diarios máximos permisibles (Resolución 2254/2017 del MADS). Las concentraciones de PM2.5, al igual que el PM10, se muestran estables tanto espacial como temporalmente, mostrando pocas variaciones entre días y estaciones de monitoreo, y sin cambios sustanciales entre el Monitoreo 2018 y su correspondiente en el 2020. También se presenta un valor atípicamente algo en la Estación 2 (Monitoreo 2018) que no tiene correspondencia en la Estación 1, mostrando una prevalencia de las condiciones locales (aledañas a la Estación 2) sobre las condiciones regionales.

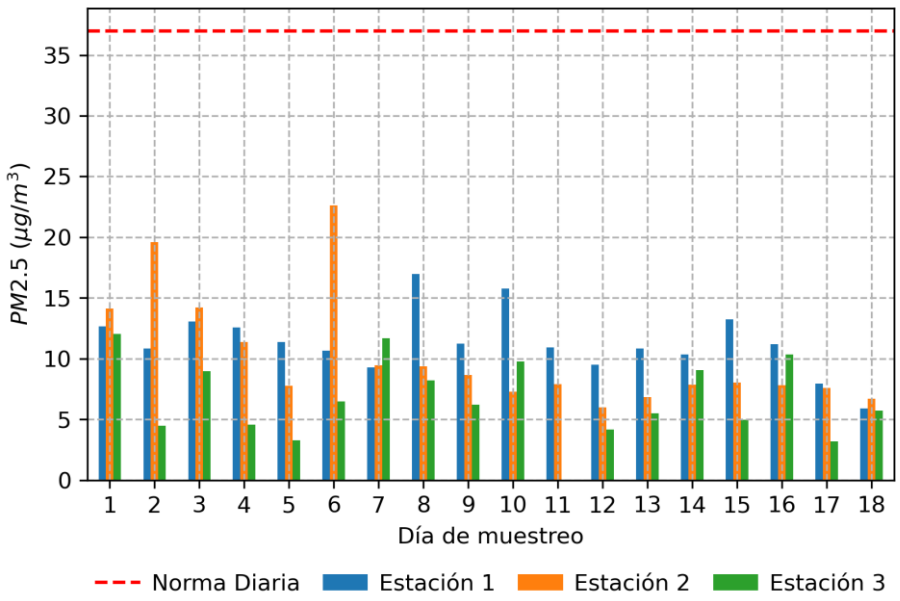


Figura 5-66. Datos de calidad del aire para PM2.5

Estación 1 y 2 corresponden al Monitoreo 2018, Estación 3 corresponde al Monitoreo 2020

En la Figura 5-67 se presenta el diagrama de cajas y bigotes para la concentración de PM2.5 para las estaciones monitoreadas, comparado de forma indicativa con la norma de exposición anual según se indica en el protocolo de monitoreo y seguimiento de la calidad de aire en la sección 9.3.2.12. Esta muestra que el valor máximo presentado en el estudio fue 22,63 µg/m^3, valor que es inferior a la norma anual respectiva. Entre las estaciones del Monitoreo 2018 se evidencian valores similares, mostrando condiciones estables en el área analizada; no obstante, se muestra una leve disminución de las concentraciones de PM2.5 en el Monitoreo 2020, lo cual puede estar relacionado con la temporada lluviosa en que fue realizado este último monitoreo, marcando una influencia de la lluvia en la remoción de PM2.5.

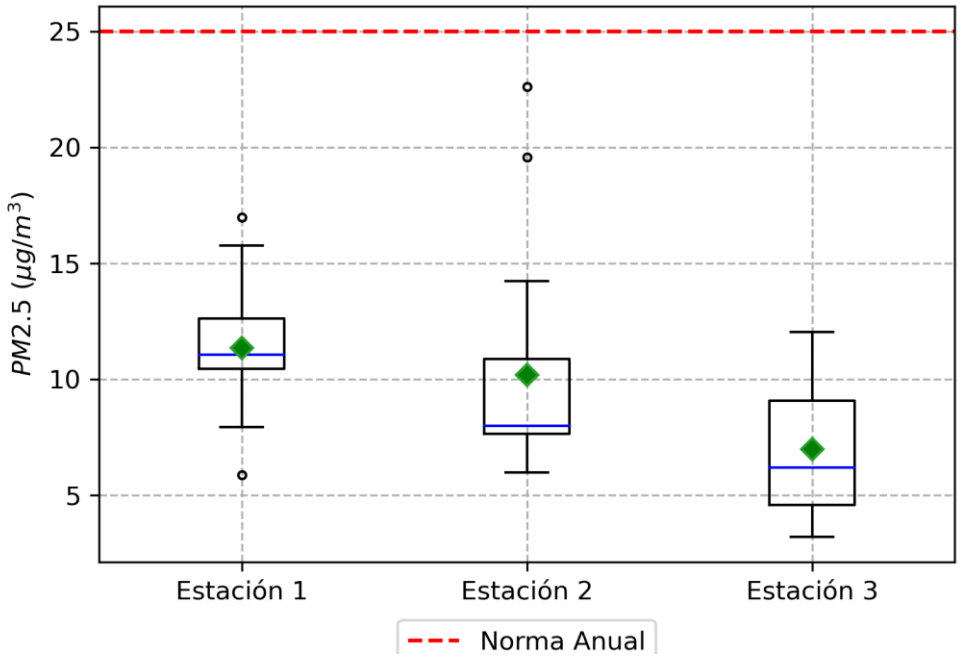


Figura 5-67. Diagrama de caja y bigotes para PM2.5

Estación 1 y 2 corresponden al Monitoreo 2018, Estación 3 corresponde al Monitoreo 2020

5.1.3.2.2.4.2.3 Dióxido de nitrógeno (NO_2)

En la Figura 5-68 se presentan los datos individuales por día de NO_2 obtenidos en las estaciones donde este contaminante fue monitoreado. En general, los valores obtenidos de NO_2 se encuentran en concentraciones inferiores al límite máximo anual (60 µg/m^3) fijado por la Resolución 2254 de 2017. La concentración de NO_2 muestra poca variabilidad a lo largo del monitoreo, y no hay diferencias marcadas entre las estaciones correspondientes al Monitoreo 2018 (Estaciones 1 y 2). La gran mayoría de los valores registrados en el Monitoreo 2020 se encuentran por debajo del Límite de Cuantificación reportado por el laboratorio (9,98 µg/m^3), y dado las concentraciones registradas en el monitoreo 2018 se encuentran alrededor del mismo valor, no es posible determinar si ha habido un aumento o disminución de la contaminación asociada al dióxido de nitrógeno.

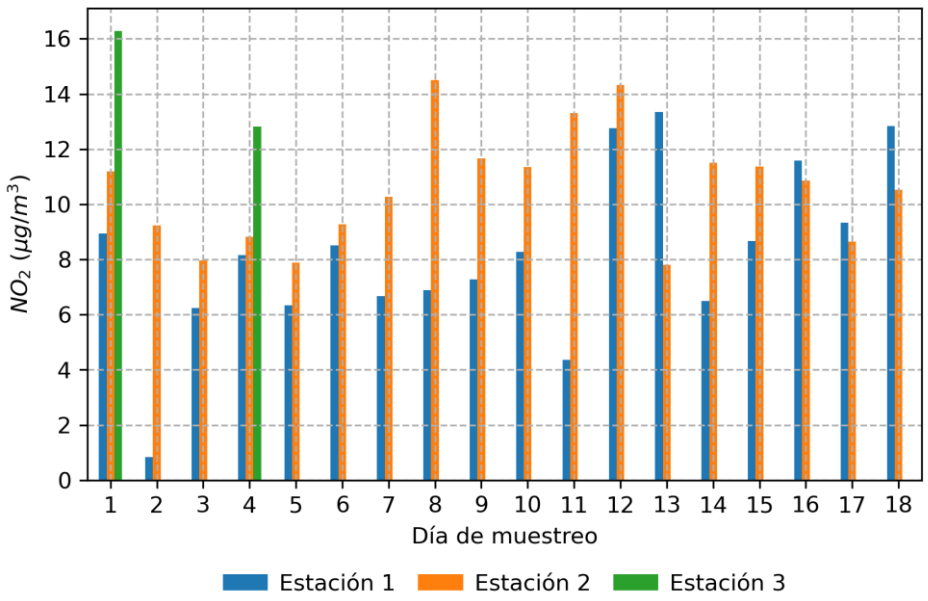


Figura 5-68. Datos de calidad del aire para NO_2

Estación 1 y 2 corresponden al Monitoreo 2018, Estación 3 corresponde al Monitoreo 2020

En la Figura 5-69 se presentan los diagramas de cajas y bigotes para las concentraciones de NO_2 y su comparación indicativa con la norma anual, según se indica en el protocolo de monitoreo y seguimiento de la calidad de aire en la sección 9.3.2.12. El boxplot para la Estación 3 (Monitoreo 2020) no fue presentado dado que la mayoría de sus valores se encuentran por debajo del Límite de Cuantificación. Como se mencionó anteriormente, las concentraciones de NO_2 en la zona de estudio son inferiores al límite máximo anual, los valores de las estaciones son similares y presentan poca variabilidad, indicando ausencia de importantes fuentes de contaminación por NO_2 en la zona

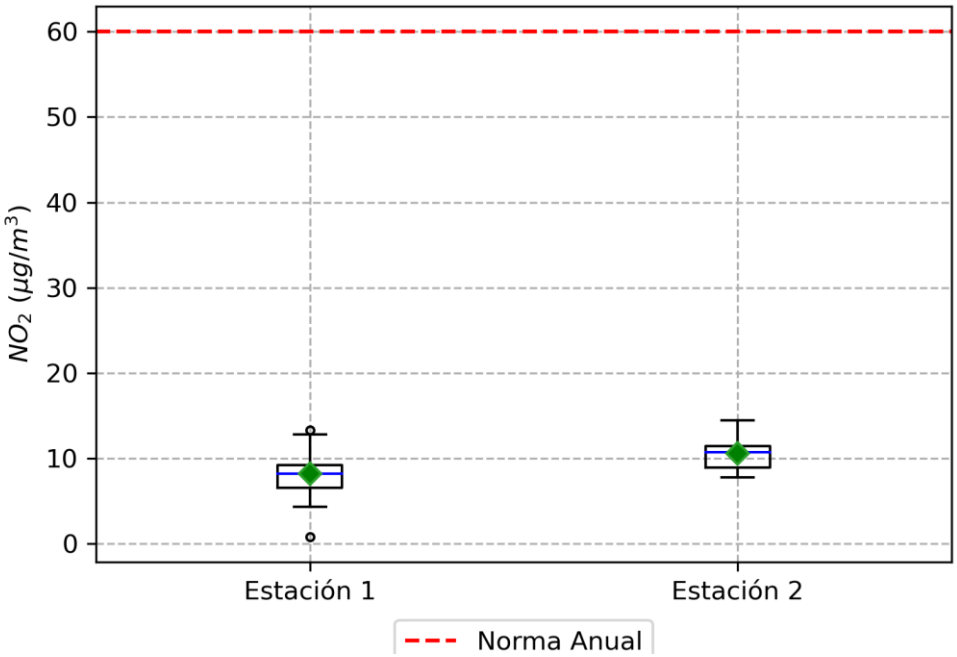


Figura 5-69 Diagrama de cajas para NO_2

Estación 1 y 2 corresponden al Monitoreo 2018

5.1.3.2.2.4.2.4 Dióxidos de azufre SO_2

En la Figura 5-70 se presentan los datos individuales por día de SO_2 obtenidos en las estaciones y su comparación frente a los valores establecidos en la normatividad, Resolución 2254 de 2017, para exposición diaria (50 µg/m^3). En general los valores obtenidos de SO_2 en la estación de monitoreo se encuentran en concentraciones inferiores al estándar máximo permisible. Las diferencias entre las concentraciones registradas en las Estaciones 1 y 2 son mínimas y las diferencias entre los días monitoreados son leves, lo cual muestra poca variabilidad espacial y temporal en el área de estudio en el Monitoreo 2018. Las concentraciones registradas en el Monitoreo 2020 se encuentran por debajo del Límite de Cuantificación (7,82 µg/m^3), no obstante, están son menores que las registradas en el Monitoreo 2020, indicando una leve disminución de contaminación por dióxido de azufre.

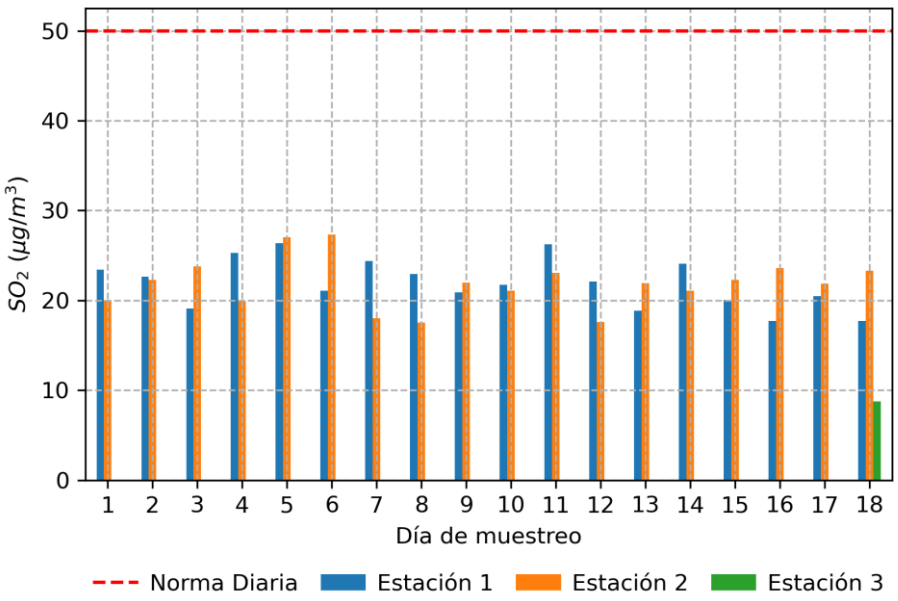


Figura 5-70. Datos de calidad del aire para SO_2

Estación 1 y 2 corresponden al Monitoreo 2018, Estación 3 corresponde al Monitoreo 2020

En la Figura 5-71 se presenta el diagrama de cajas y bigotes para la concentración de SO_2 para las dos estaciones de monitoreo, comparado de forma indicativa con la norma de exposición anual según se indica en el protocolo de monitoreo y seguimiento de la calidad de aire en la sección 9.3.2.12. Esta muestra que el valor máximo presentado en el estudio fue 27,31 µg/m^3 y la desviación en 6 µg/m^3 mostrando que los resultados día a día mantuvieron una baja variación; la distribución de las concentraciones en las dos estaciones mostradas es similar, mostrando ausencia de fenómenos locales que influyan en la concentración de dióxido de azufren en la atmósfera.

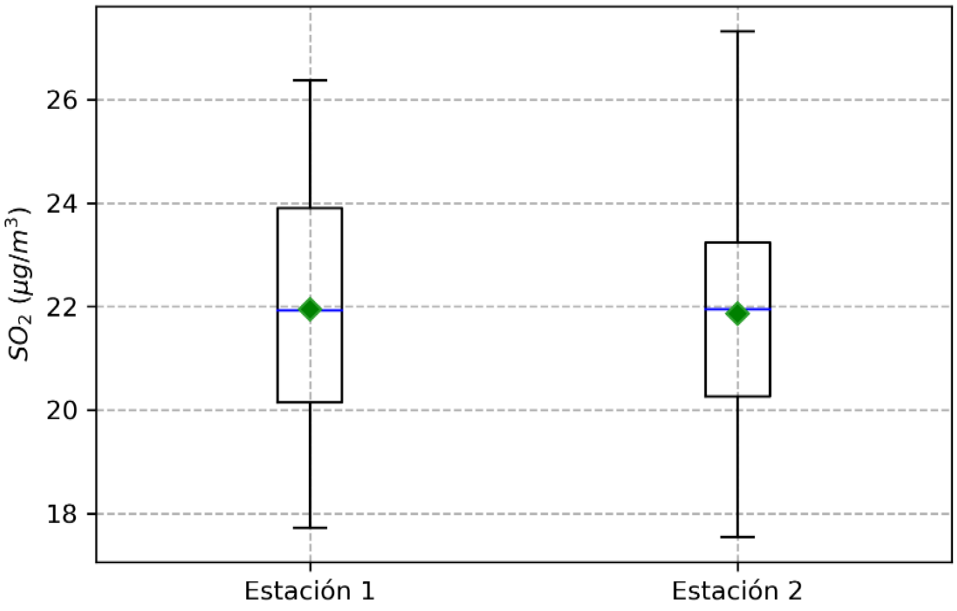


Figura 5-71. Diagrama de cajas para SO_2

Estación 1 y 2 corresponden al Monitoreo 2018, Estación 3 corresponde al Monitoreo 2020

5.1.3.2.2.4.2.5 Monóxido de Carbono (CO)

En la Figura 5-72, se presentan los datos individuales horarios de CO para las dos estaciones y su comparación frente a los valores establecidos en la normatividad, Resolución 2254 de 2017 del MAVDT, para tiempos de exposición horaria (35000µg/m^3). En general, los valores horarios obtenidos de CO se encuentran en concentraciones inferiores a 35000µg/m^3, límite máximo estipulado por la normatividad ambiental vigente para un tiempo de exposición horaria. En la figura se observa mucha variabilidad en las concentraciones, pero de poca amplitud, manteniéndose casi siempre entre los valores de 1000 y 2000 µg/m^3. Entre las Estaciones 3 y 4 no se observan diferencias significativas.

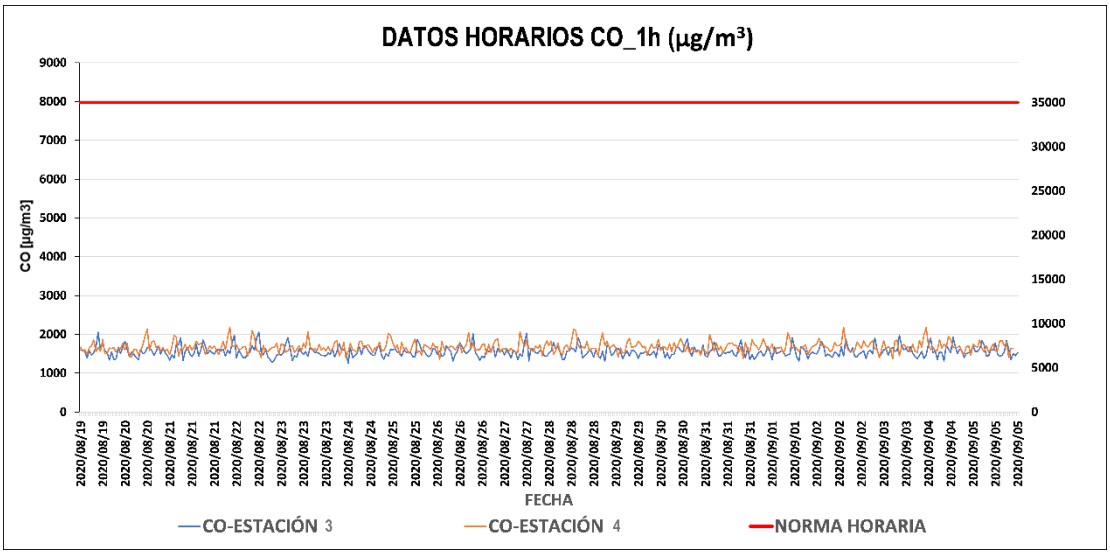


Figura 5-72 Registro horario CO

Estación 3 y 4 corresponde al Monitoreo 2020

En la Figura 5-73, se presentan los datos octohorarios de CO y su comparación frente a los valores establecidos en la normatividad (Resolución 2254 de 2017), para tiempos de exposición octohoraria (5000µg/m^3). Los valores de CO en la zona monitoreada se encuentran por debajo del límite máximo permitido, además presentan poca variabilidad, y concentraciones similares en las dos estaciones donde fue monitoreado el contaminantes.

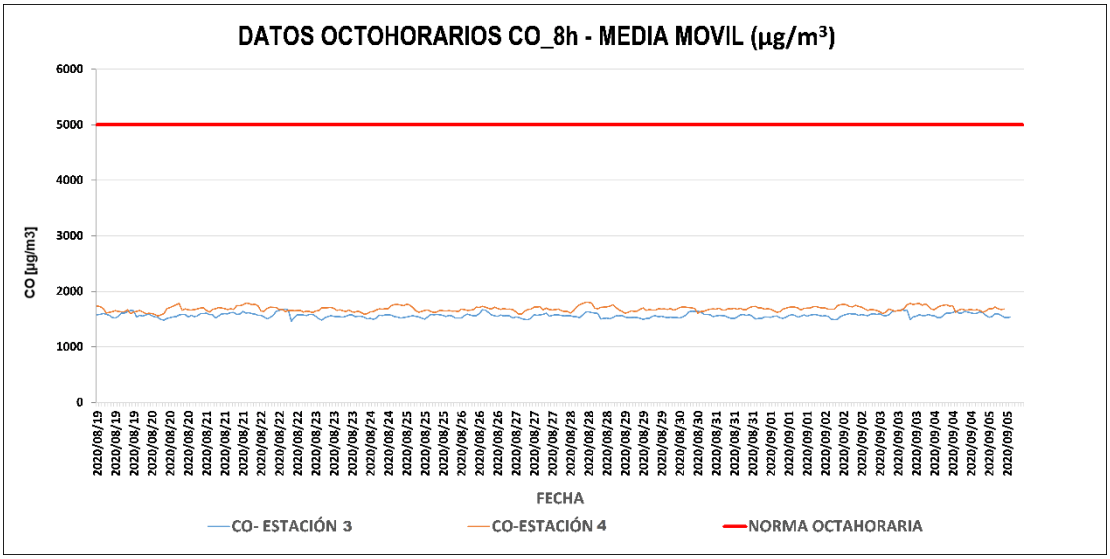


Figura 5-73 Registro Octohorario CO

Estación 3 y 4 corresponde al Monitoreo 2020

5.1.3.2.2.4.2.6 Ozono (O_3)

En la Figura 5-74 se presentan los resultados obtenidos en O_3 y su comparación con el límite máximo permisibles de 100 µg/m^3 para un tiempo de exposición de 8 horas; las concentraciones registradas se encuentran por debajo del límite permisible, siendo 63,57 µg/m^3 el valor máximo, registrado en la Estación 3. El comportamiento en ambas estaciones es similar, con un marcado ciclo diurno, donde las máximas concentraciones se registran cerca del mediodía, bajo la influencia ciclo diurno de solar y las reacciones fotoquímicas con los óxidos de nitrógeno.

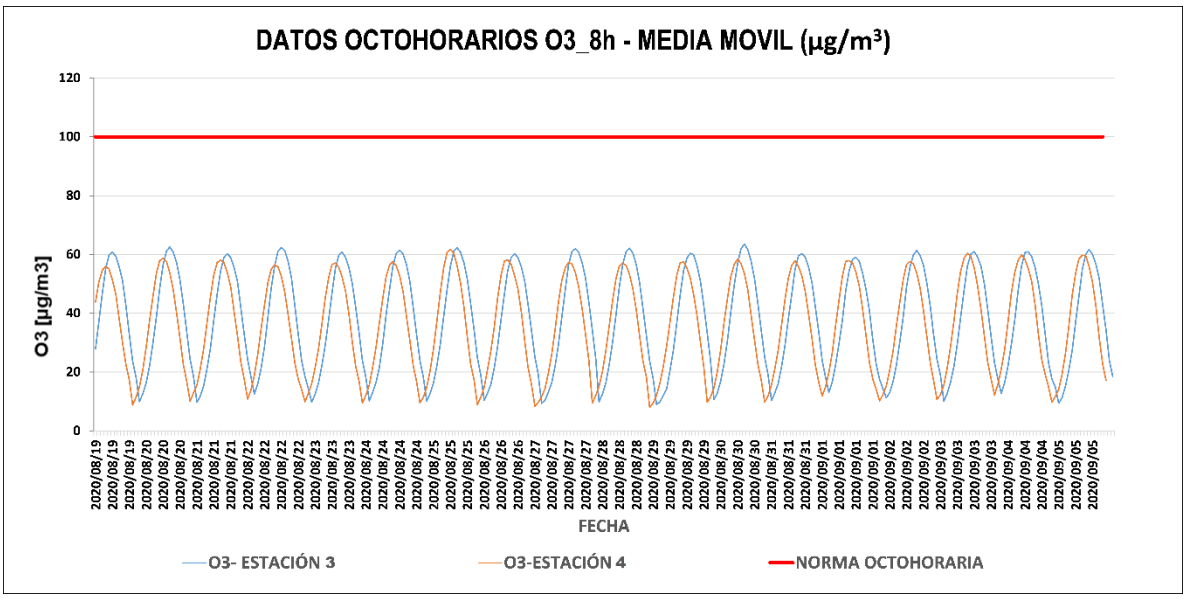


Figura 5-74 Registro día a día O3 respecto a la norma octohoraria

Estación 3 y 4 corresponde al Monitoreo 2020

5.1.3.2.2.4.3 Índice de Calidad del Aire

A partir de los resultados de las concentraciones de material particulado PM10 y PM2.5, CO y O_3 por cada estación, se calcula el Indice de Calidad del Aire (ICA), definido en la Resolución 2254 de 2017 (ver 5.1.3.2.1.1.2) estos permiten establecer cómo se encuentra la línea base de calidad del aire del área de influencia para el proyecto.No fue calculado ICA para los contaminantes NO_2 y SO_2 dado que el ICA no está definido para escala diaria en estos contaminantes. Los resultados del ICA son mostrados en la Tabla 5-45, Tabla 5-46, Figura 5-75 y Figura 5-76.

Tabla 5-45. Índices de Calidad del Aire Monitoreo 2018

Fecha	Estación 1		Estación 2		ICA Estación 1	ICA Estación 2
	ICA-PM10	ICA-PM2.5	ICA-PM10	ICA-PM2.5		
2018-12-05	23,78	50,26	26,33	53,3	50,26	53,3
2018-12-06	19,56	45,15	35,48	64,43	45,15	64,43
2018-12-07	22,43	51,13	26,31	53,51	51,13	53,51
2018-12-08	23,81	50,16	21,8	47,39	50,16	47,39
2018-12-09	21,71	47,4	13,75	32,32	47,4	32,32
2018-12-10	22,45	44,45	45,81	70,67	44,45	70,67
2018-12-11	20,24	38,59	16,86	39,36	38,59	39,36
2018-12-12	26,96	59,15	18,2	39,03	59,15	39,03
2018-12-13	23,29	46,74	14,93	36,02	46,74	36,02
2018-12-14	21,7	56,68	13,11	30,37	56,68	30,37
2018-12-15	18,99	45,46	14,46	33	45,46	33
2018-12-16	18,28	39,58	11,09	24,91	39,58	24,91
2018-12-17	19,43	45,21	12,46	28,56	45,21	28,56
2018-12-18	20,07	43,19	16,1	32,81	43,19	32,81
2018-12-19	23,78	50,26	26,33	53,3	50,26	53,3
2018-12-20	19,56	45,15	35,48	64,43	45,15	64,43
2018-12-21	22,43	51,13	26,31	53,51	51,13	53,51
2018-12-22	23,81	50,16	21,8	47,39	50,16	47,39

Tabla 5-46. Índices de Calidad del Aire Monitoreo 2020

Fecha	Estación 2				Estación 4		ICA Estación 3	ICA Estación 4
	ICA PM10	ICA PM2.5	ICA-O3	ICA-CO	ICA-CO	ICA-O3		
19/08/2020	16.68	51.1	28.66	20.15	20.84	26.39	51.1	26.39
20/08/2020	18.01	18.63	29.48	17.93	21.02	27.68	29.48	27.68
21/08/2020	16.07	37.36	28.42	18.8	19.33	27.38	37.36	27.38
22/08/2020	17.85	19.13	29.42	20.16	21.47	26.65	29.42	26.65
23/08/2020	16.25	13.73	28.7	18.83	20.33	26.92	28.7	26.92
24/08/2020	14.38	26.9	28.99	17.3	17.99	27.14	28.99	27.14
25/08/2020	18.73	48.74	29.38	18.31	19.9	29.11	48.74	29.11

Fecha	Estación 2				Estación 4		ICA Estación 3	ICA Estación 4
	ICA PM10	ICA PM2.5	ICA-O3	ICA-CO	ICA-CO	ICA-O3		
26/08/2020	17.71	34.15	28.43	19.76	20.1	27.43	34.15	27.43
27/08/2020	18.7	25.81	29.22	19.94	20.29	27.05	29.22	27.05
28/08/2020	20.92	40.71	29.31	18.79	20.99	26.91	40.71	26.91
29/08/2020	-	-	28.47	16.84	19.94	27.09	28.47	27.09
30/08/2020	16.06	17.42	29.98	18.48	18.6	27.55	29.98	27.55
31/08/2020	19.08	22.82	28.43	18.19	19.62	27.25	28.43	27.25
1/09/2020	15.33	37.78	27.84	18.83	20	27.32	37.78	27.32
2/09/2020	23.36	20.69	28.93	18.56	21.4	27.17	28.93	27.17
3/09/2020	23.96	43.14	28.75	19.42	18.18	28.48	43.14	28.48
4/09/2020	19.72	13.37	28.73	18.93	21.37	28.23	28.73	28.23
5/09/2020	22.32	23.81	29.13	18.06	18.2	28.18	29.13	28.18

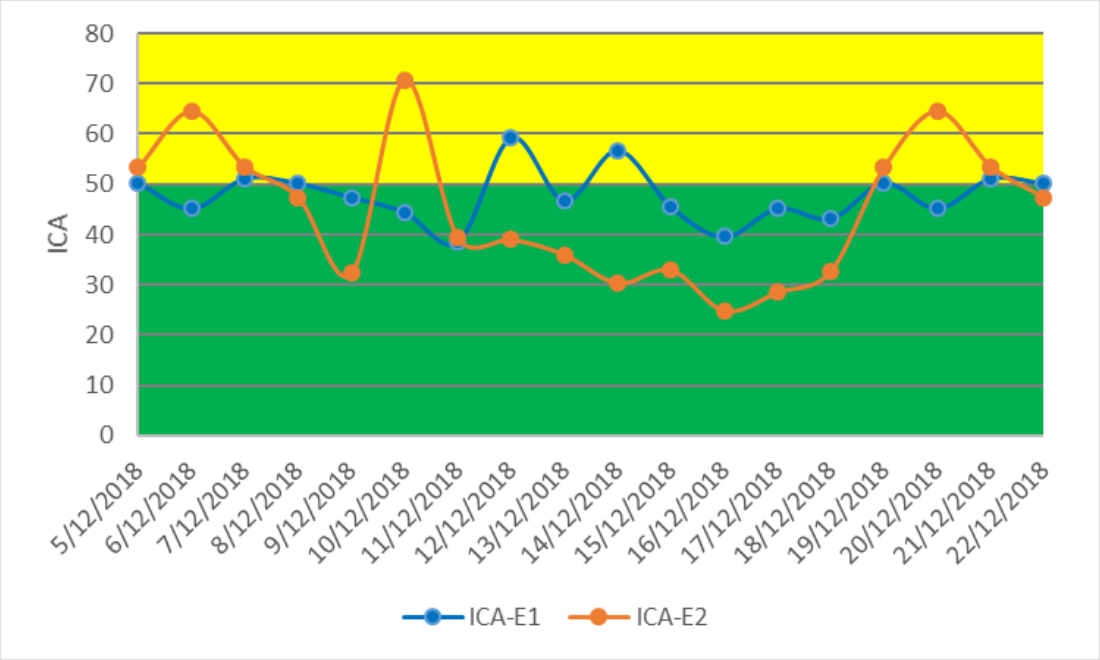


Figura 5-75. Índices de Calidad del Aire Monitoreo 2018

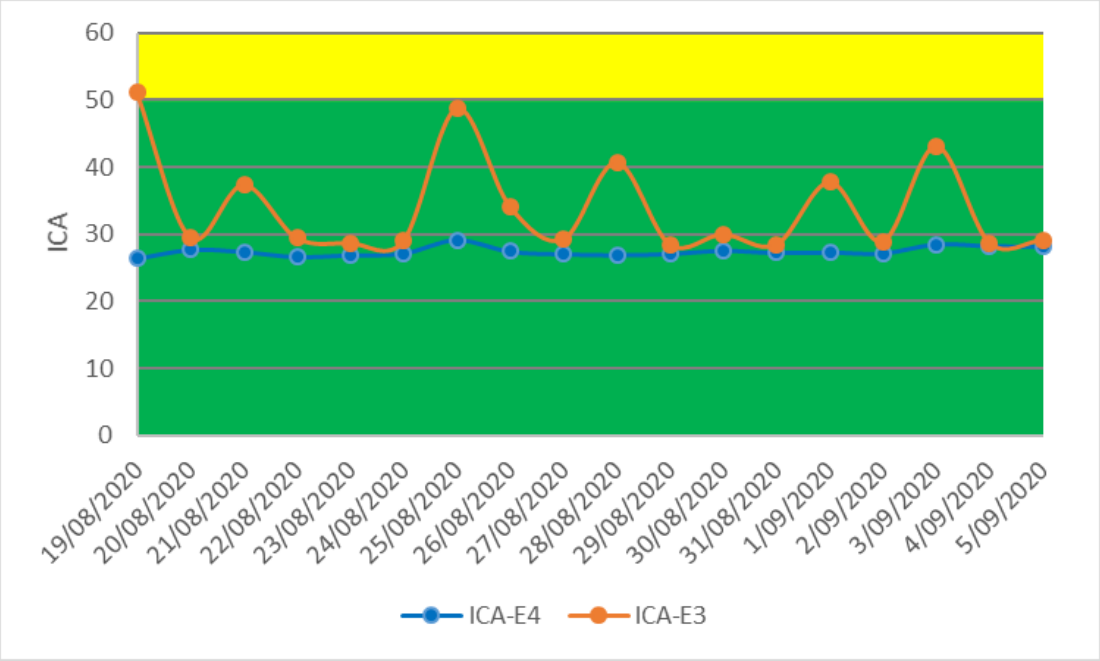


Figura 5-76. Índices de Calidad del Aire Monitoreo 2020

De acuerdo con los valores reportados del ICA para el área de estudio, la contaminación atmosférica **no supone un riesgo para la salud de las personas**, presentando valores del ICA mayoritariamente buenos, con algunos casos particulares de contaminación moderada. Las estaciones del Monitoreo 2018 oscilan alrededor de los mismos valores de ICA, siendo la Estación 1 menos variable. Los valores registrados en el Monitoreo 2020 se encuentran en su mayoría por en el rango bueno del ICA, presentado la Estación 4 casi sin variaciones, y las variaciones observadas en los valores de la Estación 3 son asociados a las variaciones en el PM2.5

5.1.3.2.2.5 Observaciones y conclusiones

El Área de Influencia del Proyecto PCH Cocorná 3 se encuentra en una zona rural con gran cantidad de vegetación, tanto dispersa entre área de producción agropecuaria, como concentrada en cercanía a las fuentes hídricas de la zona; adicionalmente se encuentra lejos de zonas urbanas o zonas con emisiones importantes de contaminantes atmosféricos. Todo lo anterior hace que la zona mantenga condiciones buenas de calidad del aire que pocas veces se ven perturbadas.

En los dos monitoreos realizados (2018 y 2020) no fueron superados los límites máximos establecidos para cada contaminante analizado, en ninguna de las escalas temporadas consideradas en la norma vigente en Colombia. Entre los dos monitoreos

se presentaron diferencias sutiles que pueden estar mayormente relacionadas a la temporada climática en que fue realizado cada uno, dada la alta influencia de la lluvia en la remoción de contaminantes del aire, y a la influencia indirecta a la resuspensión de contaminantes ya removidos de la atmósfera.

5.1.3.3 Ruido ambiental

5.1.3.3.1 Normatividad

El marco legal que regula actualmente en Colombia los procedimientos de medida y evaluación de la contaminación acústica ambiental, se estipulan en la Resolución 627 del 2006 emitida por el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (MAVDT, actualmente Ministerio de Ambiente y Desarrollo sostenible – MADS), sobre evaluación y gestión del ruido ambiental.

- **Artículos y anexos involucrados:**

Artículo 2. Horarios

Jornada	Horario
Diurno	De las 07:01 a las 21:00 horas
Nocturno	De las 21:01 a las 07:00 horas

Artículo 4. Parámetros de medida

- Nivel de presión sonora continuo equivalente ponderado A, LAeq,T, ponderado lento (S)
- Nivel de presión sonora continuo equivalente ponderado A con respuesta temporal I, Impulso, Leq-A
- Niveles de presión sonora continuo equivalente ponderado A con frecuencias de tercios de octava, LA-1/3

Artículo 5. Intervalo unitario de tiempo de medida

- Se establece en una (1) hora para los parámetros de medida del artículo 4, la cual se puede medir en forma continua o mínimo 15 minutos en intervalos de tiempo uniformemente distribuidos en esa hora.

Artículo 6. Ajustes

- Los niveles de presión sonora continuo equivalente ponderado A, LAeq,T, LAeq,T, residual y nivel percentil L90, se corrigen por impulsividad, tonalidad,

condiciones meteorológicas, horario, tipos de fuentes y receptores para obtener los respectivos niveles corregidos.

Artículo 14. Aplicabilidad del ruido ambiental

- Los resultados de las mediciones de ruido ambiental, según los procedimientos estipulados en los Capítulos II y III del Anexo 3 de la Resolución 627 de 2006, se utilizan para realizar el diagnóstico del ambiente por ruido, llevando los resultados a mapas de ruido para Visualizar la realidad e identificar las zonas críticas y posibles contaminadores por emisión de ruido.

Artículo 15. Intervalo de tiempo de referencia. T

- Se establece como intervalo de tiempo de referencia T, 14 horas para el periodo diurno y 10 horas para el periodo nocturno de acuerdo con los artículos 2 y 5 de la Resolución 627 de 2006 que permitan determinar los respectivos niveles LAeq,d diurno y LAeq,n nocturno.

Artículo 17. Estándares Máximos Permisibles de niveles de Ruido Ambiental

- Luego de realizar la captura de datos de ruido ambiental, cada uno de los puntos seleccionados fue clasificado según el sector y el subsector al que pertenecen, de acuerdo con el artículo 17 de la Resolución 627 del 2006 del MADS; mostrado también en la Tabla 5-47.

Tabla 5-47. Estándares máximos permisibles de niveles de ruido ambiental expresados en decibeles ponderados A dB(A)

Sector	Subsector	Día 7:01 AM-9:00 PM	Noche 9:01 PM-7:00 AM
Sector A. Tranquilidad y Silencio	Hospitales, bibliotecas, guarderías, sanatorios, hogares geriátricos.	55	45
Sector B. Tranquilidad y Ruido Moderado	Zonas residenciales o exclusivamente destinadas para desarrollo habitacional, hotelera y hospedajes.	65	50
	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,	70	55

Sector	Subsector	Día 7:01 AM- 9:00 PM	Noche 9:01 PM- 7:00 AM
	locales o instalaciones de tipo comercial, talleres de mecánica automotriz e industrial, centros deportivos y recreativos, gimnasios, restaurantes, bares, tabernas, discotecas, bingos, casinos.		
	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 627 de 2006

Artículo 24. Requisitos mínimos para la elaboración de los mapas de ruido.

- Las autoridades competentes, según el artículo 66 de la Ley 99 de 1993 y el artículo 13 de la Ley 768 de 2002, deben realizar dos (2) mapas de ruido, uno para periodo diurno y otro para periodo nocturno.
- Las representaciones graficas deben ser por curvas Iso-ruido a una altura de 4 metros respecto al nivel del piso.
- El software utilizado debe estar basado en métodos científicos reconocidos e indicar el método de calculo

Artículo 31. Anexos.

- Los anexos 1, 2, 3, 4 y 5 a los que alude dicho acto administrativo hacen parte integral de la Resolución
- Anexo 2: Determinación de los valores de ajuste K
- Anexo 3 - Capitulo II: Procedimiento de medición para ruido ambiental

Artículo 32. Vigencia y derogatorias.

- La Resolución rige a partir de la fecha de su publicación en el diario oficial y deroga todas las normas que le fueran contrarias.

5.1.3.3.2 Monitoreo

Con el objetivo de identificar los niveles de presión sonora en la zona de estudio, fueron realizados dos (2) monitoreos de ruido ambiental, el primero los días 16,17 y 18 de diciembre de 2018, y el segundo los días 23, 24, 27, 28, 30 y 31 de agosto de 2020. Los monitoreos fueron realizados en 4 puntos, los cuales se ubicaron teniendo en cuenta la disposición de las obras principales del proyecto, el trazado de la conducción, las facilidades de acceso, y la ubicación de las principales fuentes de ruido. El monitoreo de ruido ambiental fue desarrollado por el laboratorio SIAM INGENIERÍA S.A.S, acreditado por el IDEAM mediante las Resoluciones 1742 del 30 de julio de 2018 y 1487 del 5 de diciembre del 2019.

En las mediciones se utilizaron los métodos de muestreo y de cálculo estipulados en la Resolución 627 de 2006 del MAVDT (actualmente MADS), en la cual se establece la norma nacional de emisión de ruido y ruido ambiental y se determinan las metodologías de muestreo y de cálculo de los niveles de presión sonora.

5.1.3.3.2.1 Metodología

5.1.3.3.2.1.1 Etapa I. Identificación y selección de los puntos a evaluar

Los puntos de monitoreo, mostrados en la Figura 5-77 fueron seleccionados de acuerdo con lo recomendado en la Resolución 627 de 2006, teniendo en cuenta la ubicación de las obras principales del proyecto, el trazado de la tubería de conducción, las vías principales de la zona, las actividades generadoras de ruido en la zona y la disposición de los receptores de ruido. También fueron tenidos en cuenta los criterios de microlocalización, estipulados en el Capítulo II del Anexo 3 de la Resolución 627 de 2006.

5.1.3.3.2.1.2 Etapa II. Ejecución de las mediciones en campo

En la Tabla 5-48 se reflejan las especificaciones de campo para el monitoreo de ruido ambiental.

Tabla 5-48. Especificaciones de Campo

Aspecto	Características
Procedimiento de verificación de las Condiciones Meteorológicas	Según la condición meteorológica verificada en campo y adjunta en el Capítulo 4 del presente informe, se dio viabilidad y cumplimiento en las mediciones de cada punto de monitoreo de ruido ambiental, teniendo en cuenta lo descrito en el Artículo 20 del Capítulo IV Resolución 627 de abril 7 de 2006 del MAVDT, ahora MADS. Procedimiento

Aspecto	Características	
	SIAM Ingeniería cuenta con una estación meteorológica con anemómetro la cual mide todos los parámetros requerido por la normativa legal vigente. Este equipo se instala y opera teniendo en cuenta las características técnicas y/o las especificaciones del fabricante y los ítems de cumplimiento por parte de la autoridad ambiental para el procedimiento análisis y validación de la matriz aire y ruido. Ubicada en el área de influencia del sitio de interés establecida por el cliente del actual proyecto, los datos son verificados en cada uno de los puntos con un equipo portátil para la verificación de la velocidad del viento durante la medición.	
Configuración del Sonómetro	Medidor 1: Filtro de ponderación de frecuencia A modo respuesta exponencial lenta. **(Slow)** Intervalo de frecuencia: 1/3 octava	Medidor 2: Filtro de ponderación de frecuencia A modo respuesta exponencial Impulso. **(Impulse)** Intervalo de frecuencia: 1/3 octava
	Configurado para registrar en memoria a los niveles integrados en cada medición.	
Ubicación del Sonómetro	Mediciones de ruido ambiental: Micrófono ubicado sobre trípode a cuatro (4) metros de altura respecto al nivel de piso.	
Calibración	Se realizó calibración acústica a una frecuencia de 1 kHz y a un nivel de presión sonora de 114,0 dB antes y después de las mediciones. El Pistófono cuenta con certificado de calibración vigente (Anexo 5.1.4.3).	
Intervalo Unitario de Tiempo de Medida	El intervalo unitario de tiempo de medida T, descrito en el Artículo 5 de la Resolución 627 de 2006, se establece en una hora, la cual puede ser medida en forma continua o con intervalos de tiempos distribuidos uniformemente hasta obtener como mínimo quince (15) minutos de captura de información, debe constar de 5 mediciones parciales distribuidas en tiempos iguales, cada una de las cuales debe tener una posición orientada del micrófono así: Norte, Sur, Este, Oeste y Vertical hacia arriba.	
Desarrollo de las Mediciones	Para la ejecución de cada una de las mediciones de ruido, fueron implementados los procedimientos de medición de la Resolución 627 de abril 7 de 2006 del MAVDT, ahora MADS, los cuales se describen en el 5.1.3.3.2.1.3 Etapa III. Cálculos de Ruido Ambiental.	

5.1.3.3.2.1.3 Etapa III. Cálculos de Ruido Ambiental

De acuerdo con los resultados obtenidos en la etapa II, se realizó en cada punto la medición de ruido durante una hora, con un tiempo mínimo de captura igual a 15 minutos (parciales de 3 minutos en cada una de las cinco (5) direcciones), según se estipula en el Artículo 5 de la Resolución 627 de abril 7 de 2006 del MAVDT, ahora MADS. El resultado de esta medición fue obtenido mediante la siguiente fórmula:

$$L_{Aeq}= 10.\log ((1/5)*(10^{LN/10} + 10^{LO/10} + 10^{LS/10} + 10^{LE/10} + 10^{LV/10}))$$

Donde:

LAeq = Nivel equivalente resultante de la medición.
LN = Nivel equivalente medido en la posición del micrófono orientado en sentido norte.
LO = Nivel equivalente medido en la posición del micrófono orientado en sentido oeste.
LS = Nivel equivalente medido en la posición del micrófono orientado en sentido sur.
LE = Nivel equivalente medido en la posición del micrófono orientado en sentido este.
LV = Nivel equivalente medido en la posición del micrófono orientado en sentido vertical.

5.1.3.3.2.1.3.1 Determinación de los valores de ajuste K

Para corregir los niveles equivalentes de emisión total y residual por tonos y por impulsividad para ruido ambiental se procedió como se especifica en las premisas descritas a continuación:

a) La corrección de nivel K_S es un ajuste (positivo) para ciertas fuentes y situaciones, por ejemplo, bajas frecuencias (dB(A)) y se aplica de la siguiente manera:

   Si el ruido proviene de las instalaciones de ventilación y climatización, bajas frecuencias:

   - 5dB(A) en período diurno;
   - 8dB(A) en período nocturno.

b) La corrección de nivel KR es un ajuste por la hora del día (dB(A)) y se aplica de la siguiente manera:

   Si se desea calcular el nivel equivalente corregido ponderado por frecuencia A para el día y la noche $L_{RAeq,}$ efectúa la medición nocturna de ruido de la fuente específica, si esta funciona durante la noche, para tener en cuenta el grado de molestia que pueda causar a las personas se hace una corrección por adición de 10 dB(A) para el período nocturno en el cual funcione la fuente específica.

c) La corrección de nivel KT es un ajuste por tono y contenido de información (dB(A)) se toma en consideración los componentes tonales del ruido en el lugar de la medición y durante el tiempo que estén presentes estos tonos.

   - Por percepción nula de componentes tonales: 0 dB(A).
   - Por percepción neta de componentes tonales: 3 dB(A).
   - Por percepción fuerte de componentes tonales: 6 dB(A).

d) La corrección de nivel KI toma en consideración los componentes impulsivos en el lugar de la medición y durante el tiempo que estén presentes los respectivos impulsos.

- Por percepción nula de componentes impulsivos: 0 dB(A).
- Por percepción neta de componentes impulsivos: 3 dB(A).
- Por percepción fuerte de componentes impulsivos: 6 dB(A).

e) La manera detallada de evaluar la presencia de componentes tonales para ruido ambiental se presenta a continuación:

- Se hace un análisis con resolución de 1/3 de octava.
- Se calcula la diferencia:

$$L = L_t - L_s$$

Donde:

Lt es el nivel de presión sonora de la banda f que contiene el tono puro;

Ls es la media de los niveles de las dos bandas situadas inmediatamente por encima y por debajo de f.

Se determina la presencia o ausencia de componentes tonales, entre 20 a 125 Hz:

- Si L < 8 dB(A), no hay componentes tonales.
- Si 8 dB(A) ≤ L ≤ 12 dB(A), hay componente tonal neto.
- Si L > 12 dB(A), hay componente tonal fuerte.

Se determina la presencia o ausencia de componentes tonales, entre 160 a 400 Hz:

- Si L < 5 dB(A), no hay componentes tonales.
- Si 5 dB(A) ≤ L≤ 8 dB(A), hay componente tonal neto.
- Si L > 8 dB(A), hay componente tonal fuerte.

Se determina la presencia o ausencia de componentes tonales a partir de 500 Hz:

- Si L < 3 dB(A), no hay componentes tonales.
- Si 3 dB(A) ≤ L ≤ 5 dB(A), hay componente tonal neto.
- Si L > 5 dB(A), hay componente tonal fuerte.

f) El ruido que se evalúa tiene componentes impulsivos si se perciben sonidos de alto nivel de presión sonora y duración corta. Para evaluar de manera detallada la presencia de componentes impulsivos se establece el siguiente procedimiento:

Para una determinada fase de ruido de duración T_i en la cual se percibe un ruido impulsivo:

- Se mide el nivel de presión sonora continuo equivalente ponderado A, durante Ti, LA, Ti.

- Se mide el nivel de presión sonora ponderado A, determinado con la característica temporal Impulso (Impulse, en inglés), promediado en el tiempo Ti, LAI.
- Se calcula la diferencia Li = LAI - LA,TI.
- Si LI < 3 dB(A), no hay componentes impulsivos.
- Si 3 dB(A) ≤ LI ≤ 6 dB(A), hay percepción neta de componentes impulsivos.
- Si LI > 6 dB(A), hay percepción fuerte de componentes impulsivos.

5.1.3.3.2.1.3.2 Incertidumbre de Mediciones

Esta característica se calculó siguiendo el Método y Evaluación de la Incertidumbre en Acústica Ambiental de la Universidad Politécnica de Valencia (2010), teniendo en cuenta los siguientes componentes de la incertidumbre típica:

I: Incertidumbre del instrumento
X: Incertidumbre por condiciones de operación o funcionamiento
Y: Incertidumbre por condiciones del clima y el terreno
Z: Incertidumbre por ruido de fondo

La incertidumbre del instrumento **I** para sonómetros tipo 1 tiene un valor nominal de 1,0 dBA. Para la incertidumbre por condiciones de operación **X**, se considera que el principal factor que introduce una incertidumbre en los resultados es el tránsito de vehículos cercano al punto de medición. Se determina la incertidumbre en cada punto por la expresión:

$$\mathbf{Xi} = 10/\sqrt{(n)}$$

Donde n es el número de vehículos que transitan mientras se está tomando la lectura.

Se obtienen incertidumbres muy altas cuando el número de vehículos es pequeño, por lo cual se hace necesario descartar algunos valores altos. Así, para hallar **X** se toma el promedio solo de aquellos **Xi** que sean menores que la mediana de todos los **Xi**.

En cuanto a la incertidumbre por condiciones del clima y el terreno **Y**, solo aplica para mediciones realizadas en el tiempo, no aplica para mediciones puntuales. Si las mediciones son a largo plazo y el terreno es duro, las lecturas tomadas entre 2 y 50 metros de distancia de la fuente de ruido; se asigna un valor nominal de **Y** = 0,5 dB. En este caso se asigna **Y = 0 dB (A)**, ya que las mediciones son puntuales.

Para la incertidumbre por ruido de fondo **Z** se deben calcular los niveles corregidos por ruido de fondo si la diferencia entre Leq y L99 (o Lmin) está entre 3 y 10 dB (A). En caso contrario, el nivel se deja igual al neto que se leyó (Leq)

$$LR = 10 \log (10^{Leq/10} – 10^{Lmin/10})$$

Con los diferentes valores corregidos (LR), se obtienen las desviaciones estándar tanto de los valores netos como de los corregidos y se calcula:

$$Zi = \sqrt{} [\sigma(s)^2 - \sigma(0)^2]$$

Donde
σ(s) = desviación estándar de los niveles sonoros específicos o corregidos (LR)
σ(0) = desviación estándar de los niveles sonoros totales (Leq)

Se calcula para cada punto la sensibilidad residual, definida como:

$$C(res)i = – 10^{Lmin/10} / [10^{Leq/10} - 10^{Lmin/10}]$$

El valor Z de incertidumbre por ruido de fondo queda determinado por:

$$Z = C(res) \underline{Zi}$$

Donde

C(res) = Promedio de todos los C(res)i

$\underline{Zi}$ = promedio de todos los Zi

Una vez calculados los componentes de la incertidumbre típica se procede a calcular la incertidumbre típica combinada, definida como:

$$\sigma(t) = \sqrt{}(I^2 + X^2 + Y^2 + Z^2)$$

La Incertidumbre de Medición Expandida (IME) se define como:

$$\mathbf{IME = +/- 2\ \sigma(t)}$$

5.1.3.3.2.1.4 Etapa IV. Comparación de las condiciones actuales con normas

En el Artículo 17 de la Resolución 627 de 2006 del MAVDT, ahora MADS, se establecen los estándares máximos permisibles de niveles de Ruido Ambiental expresados en decibeles ponderados A (dB(A)), y se procedió a realizar una comparación entre los resultados de las condiciones acústicas actuales con los niveles de ruido expresados en decibeles (A).

5.1.3.3.2.2 Información monitoreo

5.1.3.3.2.2.1 Fecha y hora de la medición

En la Tabla 5-49 y Tabla 5-50 se muestra la información referente a fechas, horarios y códigos de los puntos de medición donde se realizó el estudio de ruido ambiental. En el Anexo 5.1.4.3 se muestran los formatos de campo con información adicional correspondiente a las mediciones de ruido ambiental.

Tabla 5-49. Información general de los puntos de muestreo – Día Ordinario Jornada diurna y nocturna

Código del Punto de Medición	Fecha de Medición	Horario Diurno Ordinario			Fecha de Medición	Horario Nocturno Ordinario		
		Código Data	Hora inicial	Hora final		Código Data	Hora inicial	Hora final
RA-1-2018	2018-12-17	S337	07:30	08:29	2018-12-18	S344	3:30	04:29
RA-2-2018	2018-12-17	S338	08:52	09:51	2018-12-18	S343	02:23	03:22
RA-3-2018	2018-12-17	S339	10:06	11:05	2018-12-18	S342	01:10	02:09
RA-4-2018	2018-12-17	S340	11:59	12:58	2018-12-17	S341	21:03	22:02
RA-1-2020	2020-08-24	S367	10:41	11:40	2020-08-27	S371	21:31	22:30
RA-2-2020	2020-08-24	S368	11:45	12:44	2020-08-27	S372	22:51	23:50
RA-3-2020	2020-08-24	S369	12:53	13:52	2020-08-28	S373	00:21	01:20
RA-4-2020	2020-08-24	S370	14:05	15:04	2020-08-28	S374	01:41	02:40

Tabla 5-50.Información general de los puntos de muestreo – Día Dominical Jornada diurna y nocturna

Código del Punto de Medición	Fecha de Medición	Horario Diurno Dominical			Fecha de Medición	Horario Nocturno Dominical		
		Código Data	Hora inicial	Hora final		Código Data	Hora inicial	Hora final
RA-1-2018	2018-12-16	S595	09:31	10:30	2018-12-17	S602	01:25	02:25
RA-2-2018	2018-12-16	S596	10:50	11:50	2018-12-17	S601	00:11	01:11
RA-3-2018	2018-12-16	S597	12:05	13:05	2018-12-16	S600	23:00	00:00
RA-4-2018	2018-12-16	S598	14:00	15:00	2018-12-16	S599	21:05	22:04
RA-1-2020	2020-08-23	S365	10:09	11:08	2020-08-30	S379	23:05	00:04
RA-2-2020	2020-08-30	S375	08:31	09:30	2020-08-31	S380	00:25	01:24
RA-3-2020	2020-08-30	S376	09:51	10:50	2020-08-30	S378	21:31	22:30
RA-4-2020	2020-08-30	S377	11:11	12:10	2020-08-23	S366	21:45	22:44

5.1.3.3.2.2.2 Equipos de medición

En la Tabla 5-51 se especifican los equipos utilizados durante las mediciones. Estos equipos están acordes a lo estipulado en el Capítulo IV de la Resolución 0627 del 2006 del MAVDT. En el Anexo 5.1.4.3 se encuentran plasmados los certificados de calibración de estos equipos.

Tabla 5-51. Información técnica de los Equipos de campo

Imagen	Especificaciones		Características
	Tipo	Sonómetro	Pantalla LCD de 5 posiciones Funciones Reporta SPL, MAX, MIN, Peak, Ln, Leq, Lavg, Sel, TWA, Taktm, Dose, PDOSE, Ldn, CNEL, Exposure Escala de ponderación: A, C, Z , Linear Tiempo de respuesta Fast, Slow, Impulse Frecuencia 1KHz Clase 2: 20Hz-8Khz; Filtros: 1/1 octava; 1/3 octava Amplitud 8 rangos de selección dinámico en 100dB Rango dinámico 0 – 140 dB Temperaturas de operación 0 ... +50 °C, < 80 % Hr
	Marca	QUEST TECHNOLOGIES, MODELO SOUND PRO	
	Modelo	SoundPro DL	
	Serie	BLM010002	
	Fechas de Calibración	Periodo de Calibración	Bienal (Cada dos años)
		Fecha de Ultima Calibración	2018-11-02
	Tipo	Calibrador	Frecuencia y Amplitud: 1000 Hz - 114 dB Exactitud: +/- 0.3dB a 20ºC -760 mmHg Distorsión: Less than 1% within temperature and humidity operating ranges. 60 Hz: No measurable effect up to 5 Oersted (1 Oe = 80A/m) 400 Hz: No
	Marca	3M	
	Modelo	AC -300 CALIBRATOR	
	Serie	S/N AC 300001475	

Imagen	Especificaciones		Características
			measurable effect up to 2 Oersted. Especificación: ANSI S1.40-1984 and IEC 942:1988 Class Condiciones de calibración: En Tolerancia (114.0 dB) Ajuste del Instrumento ±1.1% Acoustic (0.1 dB) ±0.012% Hz
	Fechas de calibración	Periodo de Calibración	Anual (Una vez al año)
		Fecha de Ultima Calibración	2017-12-12 y 2019-11-12 para cada monitoreo
	Tipo	Sistema de Posicionamiento Global	Reporta: navegador Brújula digital electrónica Medición Barométrica en mIB 500 waypoinst Rutas: 20 rutas reversibles de hasta 50 waypoints Tracks: Almacena hasta 10 caminos. Funciona de manera automática. Computador de viaje: Velocidad actual, Velocidad media, Tiempo de Salida y Puesta del sol, Velocidad Máxima con puesta a cero, Tiempo de viaje y distancia recorrida.
	Marca	GARMIN ETREX SUMMIT	
	Modelo	Garmin e trex	
	Serie	2DU234276	

5.1.3.3.2.2.3 Localización

La ubicación de los puntos de monitoreo se presenta en la Figura 5-77 y su georreferenciación se muestra en la Tabla 5-52. La ubicación de los puntos, como se explicó en la sección 5.1.3.3.2.1.1, fueron seleccionados teniendo en cuenta las obras principales del proyecto y los criterios de macrolocalización y microlocalización recomendados en la Resolución 627 de 2006.

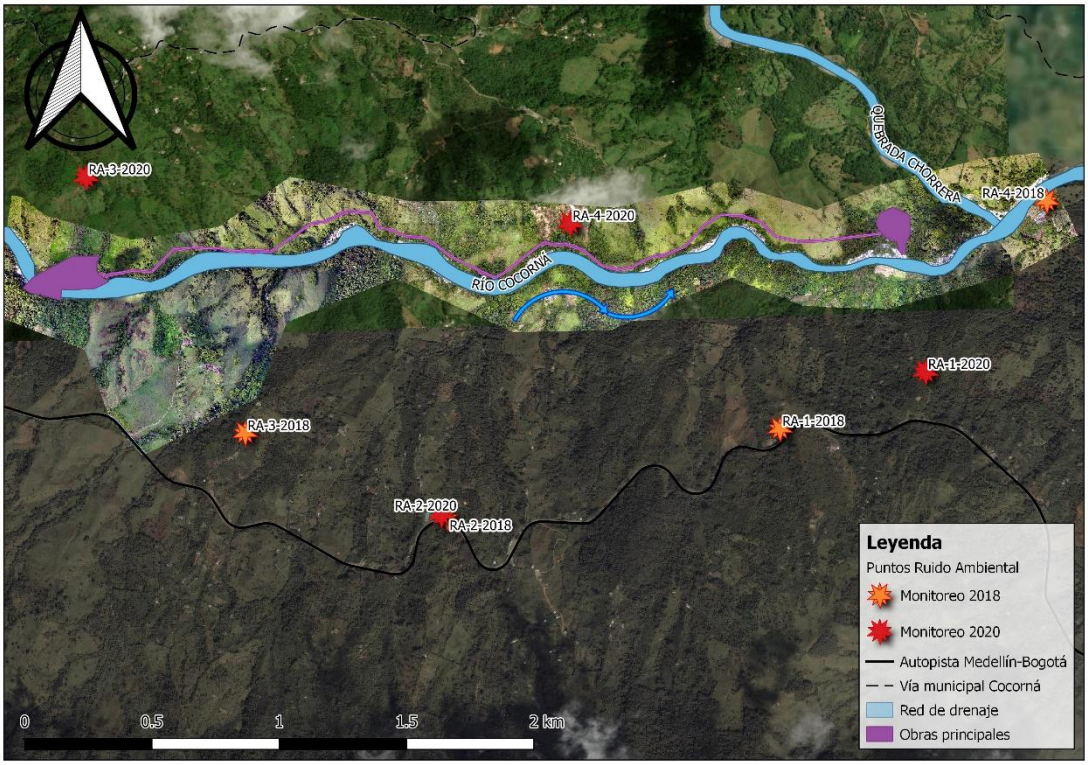


Figura 5-77. Puntos de monitoreo de ruido ambiental

Tabla 5-52. Ubicación geográfica de los puntos de muestreo

Código	Nombre del Punto de Medición	Coordenadas MAGNA Colombia Bogotá		Altura (msnm)
		Norte	Este	
RA-1-2018	El Diamante	1’159.506	877.281	1.361
RA-2-2018	Mirador de Cocorná	1’159.155	875.973	1.453
RA-3-2018	El Tesoro	1’159.489	875.180	1.444
RA-4-2018	Las Arenosas	1’160.401	878.329	1.123
RA-1-2020	Zona Casa de Maquinas	1’159.730	877.853	1273
RA-2-2020	Tramo medio - Mirador Cocorná	1’159.170	875.950	1425
RA-3-2020	Zona de Captación	1’160.494	874.555	1463
RA-4-2020	Tramo medio – Margen Izquierda	1’160.313	876.457	1241

5.1.3.3.2.3 Descripción del área de estudio

En la Tabla 5-53 se presenta la descripción de los puntos de medición (presentados también en el Anexo 5.1.4.3 o rural de tranquilidad y ruido moderado y subsector zona rural destinada a explotación agropecuaria (Definidos en la Resolución 627 de 2006). Se presenta adicionalmente un registro fotográfico por cada punto de monitoreo (Tabla 5-54).

Tabla 5-53. Descripción de los puntos de medición

Código	Punto de Medición	Descripción del Punto de Medición
RA-1-2018	El Diamante	Punto ubicado en la finca el Diamante en la autopista Medellín – Bogotá en la zona verde de la vereda San José del municipio de Cocorná en el departamento de Antioquia. Suelo de tipo prado, pastos de bajo corte y zona de pocos árboles, se puede evidenciar también que en el sector hay alto flujo vehicular y presencia de aves (pájaros) y ganadería.
RA-2-2018	Mirador Cocorná	Punto ubicado en la vereda San José de municipio de Cocorná en el departamento de Antioquia. En frente del restaurante Mirador de Cocorná en el parqueadero cerca de la autopista Medellín – Bogotá, en donde se evidencia alto flujo vehicular y presencia de animales domésticos y aves.
RA-3-2018	El Tesoro	Punto ubicado en la vereda San José del municipio de Cocorná en el departamento de Antioquia, en donde a 140 metros aproximadamente pasa la autopista Medellín – Bogotá, se puede observar pastos de bajo corte y zona de varios árboles en el sector de monitoreo.
RA-4-2018	Las Arenosas	Punto ubicado en la finca las Arenosas en la vereda San José del municipio de Cocorná del departamento de Antioquia, en donde a 50 metros aproximadamente en sentido Sur del punto de monitoreo de ruido, se evidencia que pasa el rio Cocorná, se puede observar pastos de bajo corte y zona de varios árboles en el sector de monitoreo.
RA-1-2020	Zona Casa de Maquinas	Punto ubicado vía destapada y de servidumbre de algunas fincas de la zona, está rodeado de gran vegetación y cultivos, en sentido Norte a unos 410m. Encontramos el rio Cocorná y en sentido Sur a unos 205m la autopista (Medellín - Bogotá). Dúrate el monitoreo hubo influencia de ruido animal (ladrido de perros)
RA-2-2020	Tramo medio - Mirador Cocorná	Punto ubicado en el parqueadero del Mirador Cocorná, está rodeado de poca vegetación en sentido Sur a unos 30m aprox. encontramos la autopista (Medellín – Bogotá) en sentido Norte, Este y Oeste encontramos viviendas dúrate el monitoreo hubo influencia de ruido animal, viviendas (música) y del tránsito de vehículos pesados en su mayoría.

Código	Punto de Medición	Descripción del Punto de Medición
RA-3-2020	Zona de Captación	Punto ubicado sobre un costado de la vía de acceso a la casa de la finca, rodeado de gran vegetación, en sentido Sur a unos 450m aprox. pasa el rio Cocorná dúrate el monitoreo hubo influencia de ruido animal (ladrido de perros) y actividades de ganadería (Picapasto).
RA-4-2020	Tramo medio – Margen Izquierda	Punto ubicado sobre zona de parqueo de una vivienda del sector, rodeado de gran vegetación, en sentido Sur a unos 130m aprox. se encuentra el río Cocorná; dúrate el monitoreo hubo influencia de ruido animal (ladrido de perros cerca al punto de muestreo) y viviendas (música).

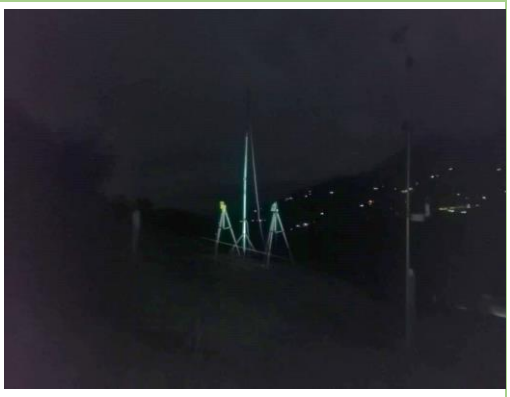
Tabla 5-54 Registro fotográfico de los puntos de monitoreo

	Diurno	Nocturno
RA-1-2018 – El Diamante		
Registro Fotográfico Ordinario		
Registro Fotográfico Dominical		

	Diurno	Nocturno
RA-2-2018 – Mirador Cocorná		
Registro Fotográfico Ordinario		
Registro Fotográfico Dominical		
RA-3-2018 – El Tesoro		
Registro Fotográfico Ordinario		

	Diurno	Nocturno
Registro Fotográfico Dominical		
RA-4-2018 – Las Arenosas		
Registro Fotográfico Ordinario		
Registro Fotográfico Dominical		

	Diurno	Nocturno
RA-1-2020 – Zona Casa de Maquinas		
Registro Fotográfico Ordinario		
Registro Fotográfico Dominical		
RA-2-2020 – Tramo medio - Mirador Cocorná		
Registro Fotográfico Ordinario		

	Diurno	Nocturno
Registro Fotográfico Dominical		
RA-3-2020 – Zona de Captación		
Registro Fotográfico Ordinario		
Registro Fotográfico Dominical		

	Diurno	Nocturno
RA-4-2020 – Tramo medio – Margen Izquierda		
Registro Fotográfico Ordinario		
Registro Fotográfico Dominical		

5.1.3.3.2.4 Resultados y análisis

5.1.3.3.2.4.1 Meteorología

En la Tabla 5-55 y la Tabla 5-56 se plasman las condiciones meteorológicas de los puntos de medición cumpliendo a cabalidad con el artículo 20 de la Resolución 627 de 2006, donde se establece que la velocidad del viento no debe superar los tres metros por segundo (3 m/s), al igual que las mediciones deben efectuarse en tiempo seco.

Tabla 5-55. Datos meteorológicos monitoreo día ordinario en jornadas diurna y nocturna

Punto	Día Ordinario											
	Velocidad del Viento (m/s)		Temperatura (ºC)		Precipitación (mm)		Dirección del Viento		Presión Atmosférica (mm Hg)		Humedad Relativa (%)	
	Diurno	Nocturno	Diurno	Nocturno	Diurno	Nocturno	Diurno	Nocturno	Diurno	Nocturno	Diurno	Nocturno
RA-1-2018	0,4	0,4	19,3	18,6	0,0	0,0	NE	SW	648,2	647,9	95	96
RA-2-2018	0,4	0,4	19,7	18,7	0,0	0,0	NNW	SW	641,4	641,0	97	98
RA-3-2018	0,9	0,4	21.9	19,0	0,0	0,0	NE	S	642,9	641,8	85	97
RA-4-2018	0,9	0,4	23,3	20,2	0,0	0,0	NE	SW	667,6	666,7	82	94
RA-1-2020	2,1	2,5	28,0	27,0	0,0	0,0	NE	NE	657,7	657,4	68	83
RA-2-2020	1,8	2,1	30,0	25,0	0,0	0,0	SE	NW	647,1	645,4	67	78
RA-3-2020	1,9	2,0	31,3	22,0	0,0	0,0	SE	NW	644,8	641,5	66	73
RA-4-2020	1,5	1,7	31,6	20,0	0,0	0,0	SE	SW	661,2	657,6	74	81

Tabla 5-56.Datos meteorológicos monitoreo del día dominical en jornadas diurna y nocturna.

Punto	Día Dominical											
	Velocidad del Viento (m/s)		Temperatura (ºC)		Precipitación (mm)		Dirección del Viento		Presión Atmosférica (mm Hg)		Humedad Relativa (%)	
	Diurno	Nocturno	Diurno	Nocturno	Diurno	Nocturno	Diurno	Nocturno	Diurno	Nocturno	Diurno	Nocturno
RA-1-2018	0,9	0,4	22,3	20,0	0,0	0,0	NNW	WSW	649.2	648,4	82	92
RA-2-2018	1,3	0,4	23,2	19,1	0,0	0,0	NNE	S	642,7	641,2	77	94
RA-3-2018	1,3	0,4	24,2	19,4	0,0	0,0	N	SSW	643,7	642,0	75	92

Punto	Día Dominical											
	Velocidad del Viento (m/s)		Temperatura (ºC)		Precipitación (mm)		Dirección del Viento		Presión Atmosférica (mm Hg)		Humedad Relativa (%)	
	Diurno	Nocturno	Diurno	Nocturno	Diurno	Nocturno	Diurno	Nocturno	Diurno	Nocturno	Diurno	Nocturno
RA-4-2018	0,9	0,4	24,2	19,6	0,0	0,0	SSW	SW	667,9	666,6	74	90
RA-1-2020	1,8	2,1	31,2	29,5	0,0	0,0	SE	NE	658,7	658,2	83	69
RA-2-2020	1,5	1,7	30,4	27,7	0,0	0,0	SE	NE	647,3	646,3	84	68
RA-3-2020	2,1	2,4	30,7	27,3	0,0	0,0	SE	NE	644,6	643,4	88	68
RA-4-2020	2,2	2,3	31,3	26,8	0,0	0,0	SE	E	661,1	659,7	94	67

5.1.3.3.2.4.2 Ruido ambiental

En la Tabla 5-57 se muestran los resultados del nivel presión sonora continua equivalente (L_{AEq}) y los ajustes K de cada uno de los puntos de monitoreo de ruido ambiental para la zona del proyecto. En el Anexo 5.1.4.3 se muestran las gráficas de frecuencia de los puntos muestreados en cada monitoreo.

Tabla 5-57. Resultados y ajustes K mediciones de ruido ambiental

Código	Jornada	LAEq dB(A)	KS dB(A)	KR dB(A)	KT dB(A)	LEQI	LI = LAEq-LEql	Componente impulsivo	KI dB(A)	K dB(A)	LAREq dB(A)
RA-1-2018	Día ordinario, horario diurno	57,1	0	0	0	57,4	0,3	Nulo	0	0	57,1
RA-2-2018		56,7	0	0	0	56,7	0,0	Nulo	0	0	56,7
RA-3-2018		50,6	0	0	0	55,9	5,3	Neto	3	3	53,6
RA-4-2018		57,1	0	0	3	58,1	1,0	Nulo	0	3	60,1
RA-1-2018		58,0	0	0	0	57,0	-1,0	Nulo	0	0	58,0

Código	Jornada	LAEq dB(A)	KS dB(A)	KR dB(A)	KT dB(A)	LEQI	LI = LAEq-LEqI	Componente impulsivo	KI dB(A)	K dB(A)	LAREq dB(A)
RA-2-2018	Día ordinario, horario nocturno	60,8	0	0	3	60,4	-0,4	Nulo	0	3	63,8
RA-3-2018		46,4	0	0	6	48,9	2,5	Nulo	0	6	52,4
RA-4-2018		58,7	0	0	6	59,6	0,9	Nulo	0	6	64,7
RA-1-2018	Día dominical, horario diurno	60,0	0	0	0	64,3	4,3	Neto	3	3	63,0
RA-2-2018		59,8	0	0	0	61,5	1,7	Nulo	0	0	59,8
RA-3-2018		69,7	0	0	3	80,3	10,6	Fuerte	6	6	75,7
RA-4-2018		60,1	0	0	3	74,5	14,4	Fuerte	6	6	66,1
RA-1-2018	Día dominical, horario nocturno	65,7	0	0	0	76,2	10,5	Fuerte	6	6	71,7
RA-2-2018		65,9	0	0	0	66,7	0,8	Nulo	0	0	65,9
RA-3-2018		68,6	0	0	0	80,4	11,8	Fuerte	6	6	74,6
RA-4-2018		57,5	0	0	6	70,3	12,8	Fuerte	6	6	63,5
RA-1-2020	Día ordinario, horario diurno	55,2	0	0	0	47,1	-8,1	Nulo	0	0	55,2
RA-2-2020		57,5	0	0	3	56,5	-1,0	Nulo	0	3	60,5
RA-3-2020		55,3	0	0	3	47,9	-7,4	Nulo	0	3	58,3
RA-4-2020		55,3	0	0	0	56,1	0,8	Nulo	0	0	55,3
RA-1-2020	Día ordinario, horario nocturno	55,3	0	0	0	55,8	0,5	Nulo	0	0	55,3
RA-2-2020		56,1	0	0	3	61,2	5,1	Neto	3	3	59,1
RA-3-2020		55,4	0	0	0	56,6	1,2	Nulo	0	0	55,4
RA-4-2020		55,2	0	0	6	51,8	-3,4	Nulo	0	6	61,2
RA-1-2020	Día dominical, horario diurno	55,2	0	0	0	47,0	-8,2	Nulo	0	0	55,2
RA-2-2020		55,6	0	0	3	56,7	1,1	Nulo	0	3	58,6

Código	Jornada	LAEq dB(A)	KS dB(A)	KR dB(A)	KT dB(A)	LEQI	LI = LAEq-LEqI	Componente impulsivo	KI dB(A)	K dB(A)	LAREq dB(A)
RA-3-2020		55,2	0	0	3	46,2	-9,0	Nulo	0	3	58,2
RA-4-2020		55,3	0	0	0	51,1	-4,2	Nulo	0	0	55,3
RA-1-2020	Día dominical, horario nocturno	55,3	0	0	0	48,5	-6,8	Nulo	0	0	55,3
RA-2-2020		55,9	0	0	3	56,5	0,6	Nulo	0	3	58,9
RA-3-2020		55,2	0	0	3	45,9	-9,3	Nulo	0	3	58,2
RA-4-2020		55,6	0	0	0	57,2	1,6	Nulo	0	0	55,6

5.1.3.3.2.4.2.1 Incertidumbre Expandida

La incertidumbre expandida de las mediciones calculadas de ruido ambiental para cada lectura en su gran mayoría estuvo por el orden de ±2 a ±3 dBA, por lo cual se consideran aceptables para las mediciones realizadas. La Tabla 5-58 muestra la incertidumbre expandida calculada para los días ordinario y dominical en la jornada diurna y nocturna.

Tabla 5-58. Incertidumbre de ruido ambiental día ordinario y dominical en jornada diurna y nocturna

Punto	Jornada	LAREq dB(A)	Incertidumbre de Medición Expandida dB(A)
RA-1-2018	Diurno Ordinario	57,1	±2,8
RA-2-2018		56,7	±2,8
RA-3-2018		53,6	±2,1
RA-4-2018		60,1	±2,0
RA-1-2018	Nocturno Ordinario	58,0	±3,7
RA-2-2018		63,8	±3,8
RA-3-2018		52,4	±2,0
RA-4-2018		64,7	±2,0
RA-1-2018	Diurno Dominical	63,0	±2,6
RA-2-2018		59,8	±2,6
RA-3-2018		75,7	±2,0
RA-4-2018		66,1	±2,0
RA-1-2018	Nocturno Dominical	71,7	±3,3
RA-2-2018		65,9	±3,9
RA-3-2018		74,6	±2,0
RA-4-2018		63,5	±2,8
RA-1-2020	Diurno Ordinario	55,2	±2,0
RA-2-2020		60,5	±2,5
RA-3-2020		58,3	±2,0
RA-4-2020		55,3	±2,0
RA-1-2020	Nocturno Ordinario	55,3	±2,0
RA-2-2020		59,1	±2,6
RA-3-2020		55,4	±2,0
RA-4-2020		61,2	±2,0

Punto	Jornada	LAREq dB(A)	Incertidumbre de Medición Expandida dB(A)
RA-1-2020	Diurno Dominical	55,2	±2,0
RA-2-2020		58,6	±2,4
RA-3-2020		58,2	±2,0
RA-4-2020		55,3	±2,0
RA-1-2020	Nocturno Dominical	55,3	±2,0
RA-2-2020		58,9	±2,7
RA-3-2020		58,2	±2,0
RA-4-2020		55,6	±2,0

5.1.3.3.2.4.2.2 Comparación de los resultados obtenidos con la normatividad

En la Tabla 5-59 y Tabla 5-60 se muestra la comparación de los resultados obtenidos con la norma actual (Resolución 627 de 2006 del MAVDT).

Tabla 5-59.Comparación niveles de ruido ambiental día ordinario con la normatividad

Punto de medición	Sector	LRAeq Horario Diurno [dB(A)]	Máximo Permitido Diurno [dB(A)]	Estado con Norma	LRAeq Horario Nocturno [dB(A)]	Máximo Permitido Nocturno [dB(A)]	Estado con Norma
RA-1-2018	D	57,1	55	NO CUMPLE	58,0	45	NO CUMPLE
RA-2-2018	D	56,7	55	NO CUMPLE	63,8	45	NO CUMPLE
RA-3-2018	D	53,6	55	CUMPLE	52,4	45	NO CUMPLE
RA-4-2018	D	60,1	55	NO CUMPLE	64,7	45	NO CUMPLE
RA-1-2020	D	55,2	55	NO CUMPLE	55,3	45	NO CUMPLE
RA-2-2020	D	60,5	55	NO CUMPLE	59,1	45	NO CUMPLE
RA-3-2020	D	58,3	55	NO CUMPLE	55,4	45	NO CUMPLE
RA-4-2020	D	55,3	55	NO CUMPLE	61,2	45	NO CUMPLE

Tabla 5-60.Comparación de niveles de ruido ambiental día dominical con la normatividad

Punto de medición	Sector	LRAeq Horario Diurno [dB(A)]	Máximo Permitido Diurno [dB(A)]	Estado Con Norma	LRAeq Horario Nocturno [dB(A)]	Máximo Permitido Nocturno [dB(A)]	Estado Con Norma
RA-1-2018	D	63,0	55	NO CUMPLE	71,7	45	NO CUMPLE
RA-2-2018	D	59,8	55	NO CUMPLE	65,9	45	NO CUMPLE
RA-3-2018	D	75,7	55	NO CUMPLE	74,6	45	NO CUMPLE
RA-4-2018	D	66,1	55	NO CUMPLE	63,5	45	NO CUMPLE
RA-1-2020	D	55,2	55	NO CUMPLE	55,3	45	NO CUMPLE
RA-2-2020	D	58,6	55	NO CUMPLE	58,9	45	NO CUMPLE
RA-3-2020	D	58,2	55	NO CUMPLE	58,2	45	NO CUMPLE
RA-4-2020	D	55,3	55	NO CUMPLE	55,6	45	NO CUMPLE

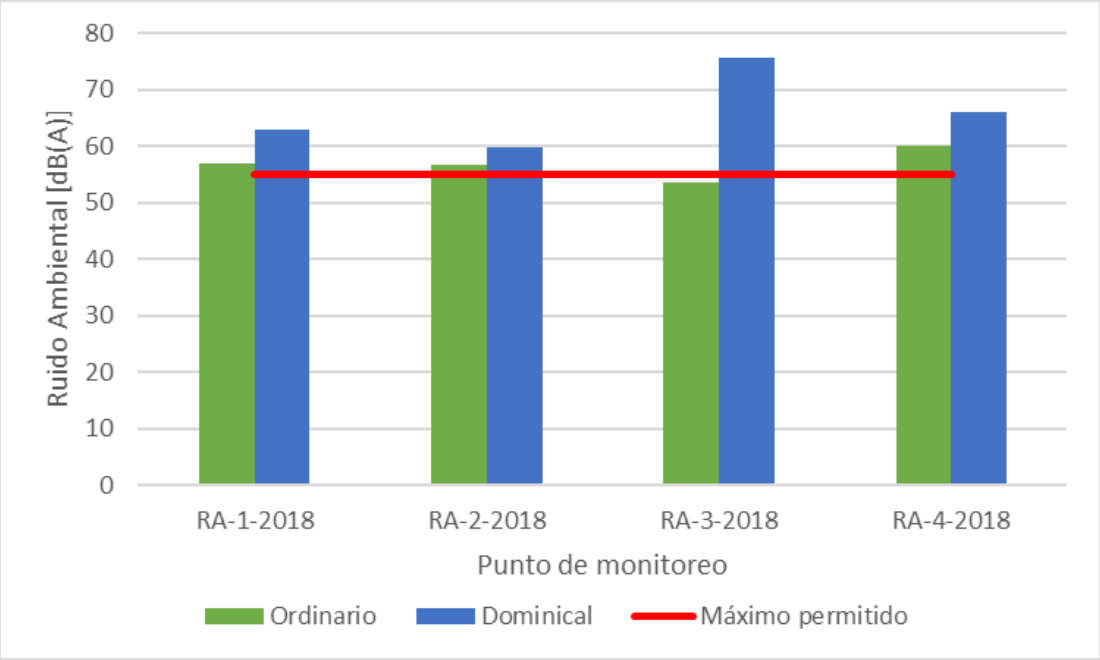


Figura 5-78. Resultados de ruido ambiental jornada diurna día dominical y ordinario, monitoreo 2018

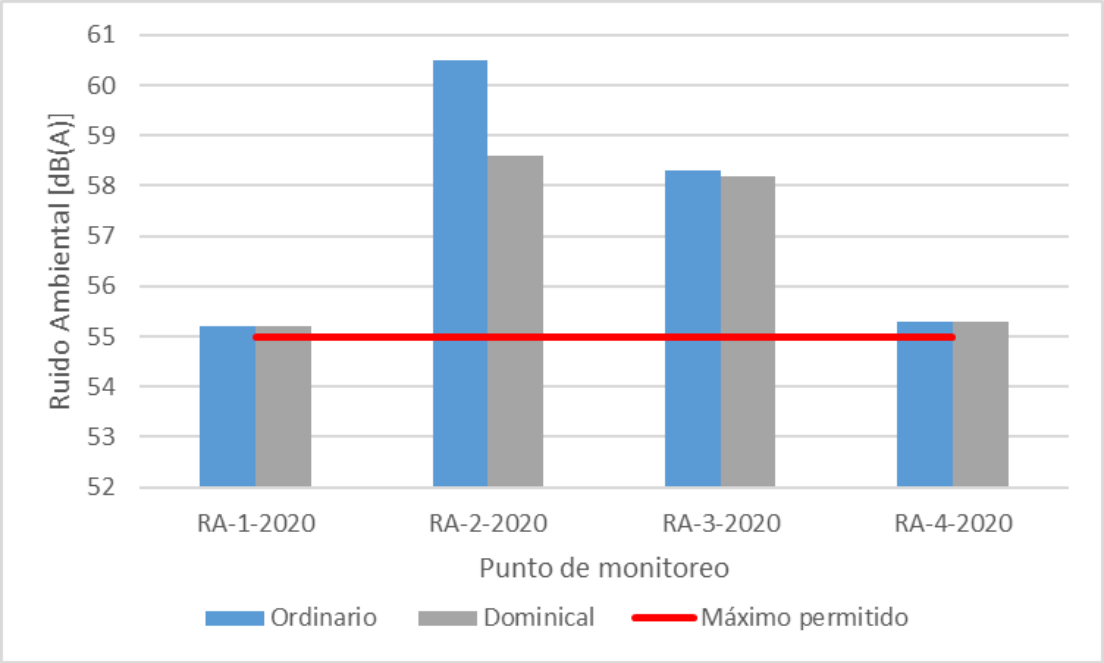


Figura 5-79. Resultados de ruido ambiental jornada diurna día dominical y ordinario, monitoreo 2020

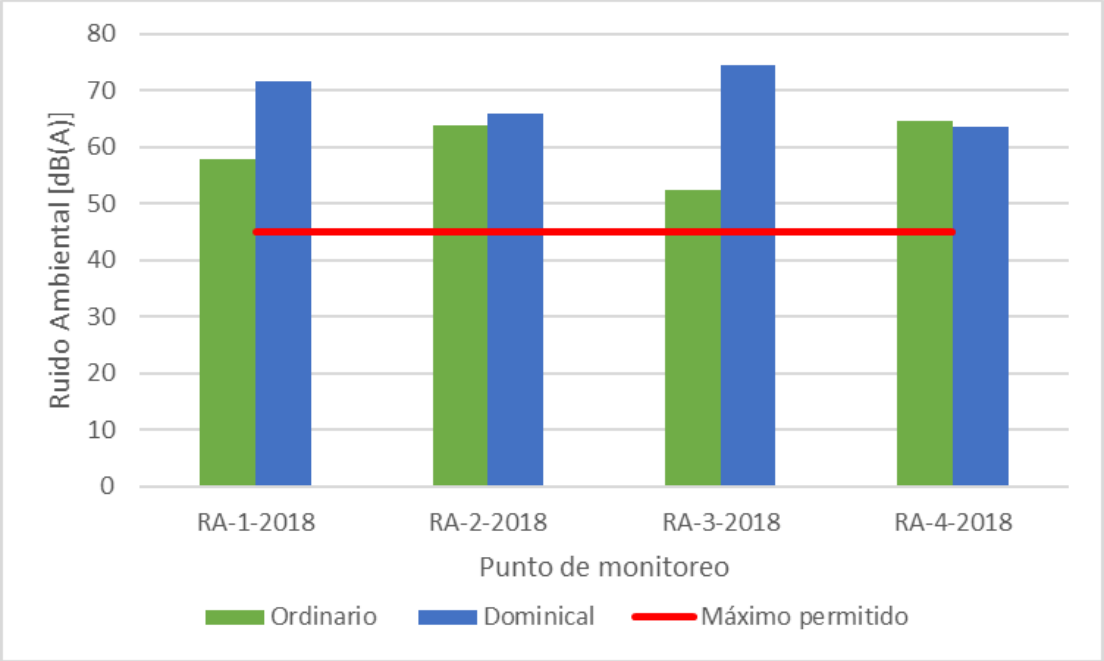


Figura 5-80. Resultados de ruido ambiental jornada nocturna día dominical y ordinario, monitoreo 2018

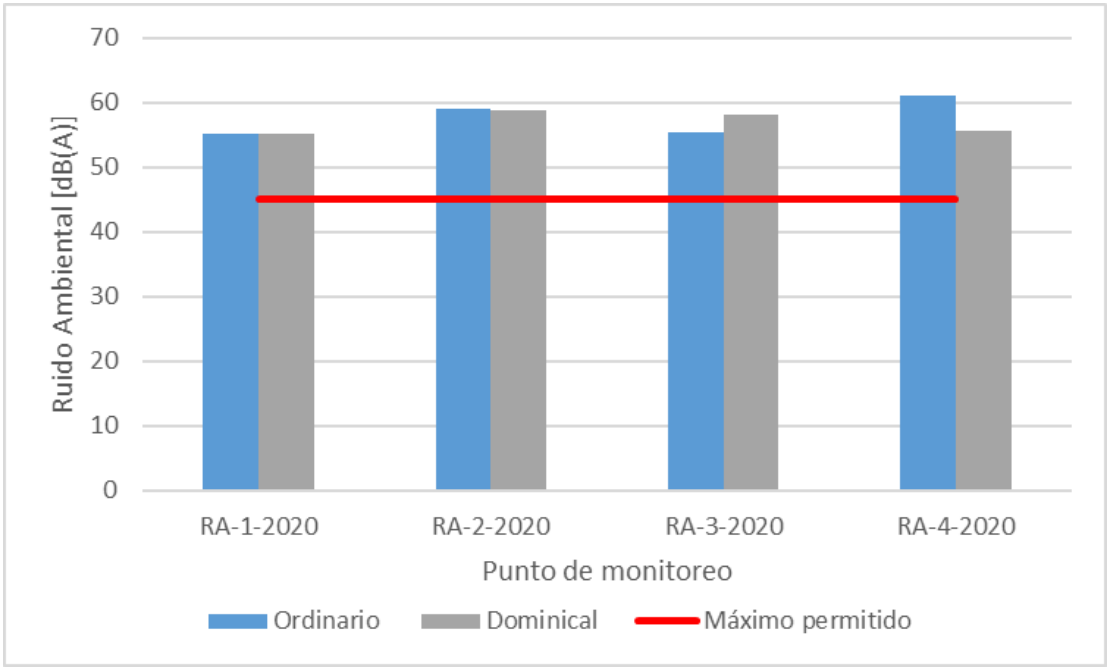


Figura 5-81. Resultados de ruido ambiental jornada nocturna día dominical y ordinario, monitoreo 2020

Con respecto a las mediciones de ruido ambiental puede decirse que, tal como se observa de la Figura 5-78 a la Figura 5-81, casi todos los puntos sobrepasaron el límite máximo permisible en jornada diurna ordinaria (55 dB(A)), siendo el punto RA-3-2018, en jornada diurna ordinaria, el único punto que estuvo por debajo del límite máximo permisible. Por su parte, el día dominical ninguno de los cuatro puntos estuvo por debajo del límite máximo permisible. Es importante mencionar que el ruido proviene mayoritariamente de fuentes naturales, que pueden ser el río, animales silvestres, domésticos y ganado; además del ruido generado por las actividades inherentes de la comunidad en el área de estudio. En los puntos RA-2-2018 y RA-2-2020, correspondientes al mirador Cocorná, los niveles de ruido están altamente influenciados por los vehículos que circulan por la Autopista Medellín-Bogotá. Los niveles de ruido reportados son similares en los distintos puntos y jornadas, lo cual no marca diferencias importantes asociadas a fuentes de ruido particulares.

Con los resultados obtenidos de las mediciones se elaboraron las curvas de ruido que se muestran de la Figura 5-82 a la Figura 5-89; mostradas también en el Anexo 13. GDB.

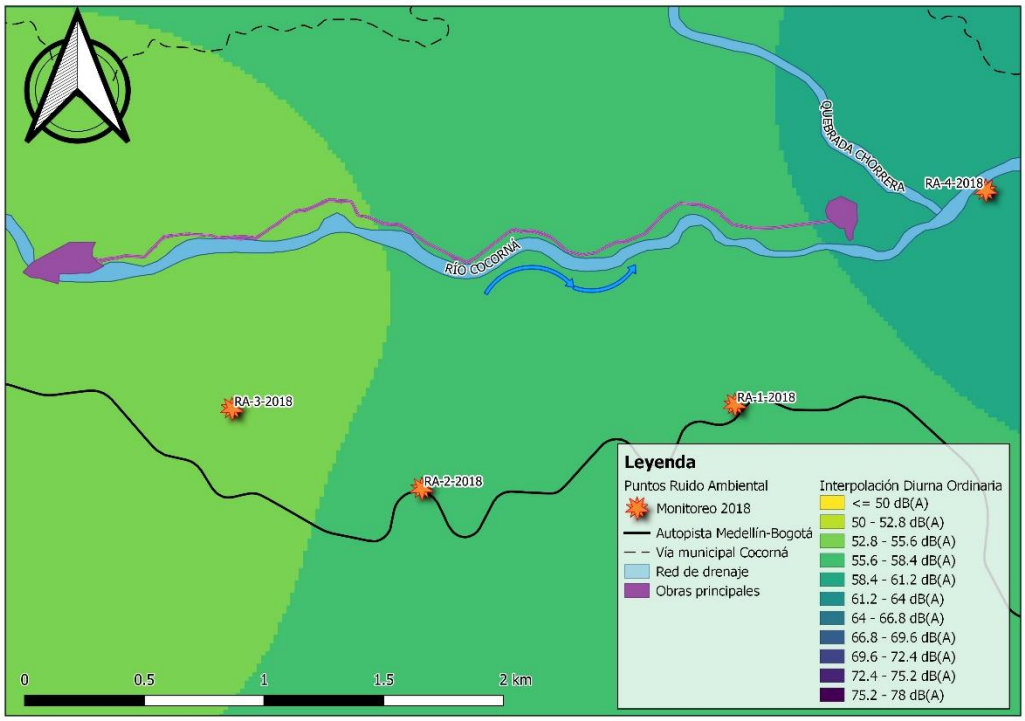


Figura 5-82. Interpolación de ruido ambiental, Monitoreo 2018 - jornada diurna ordinaria

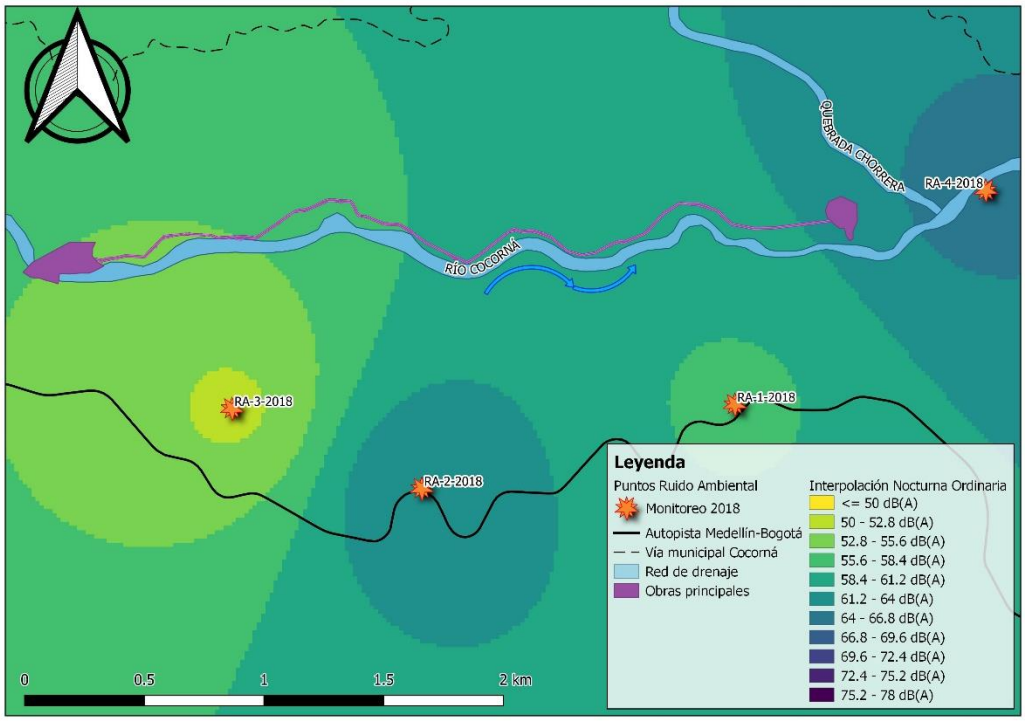


Figura 5-83. Interpolación de ruido ambiental, Monitoreo 2018 - jornada nocturna ordinaria

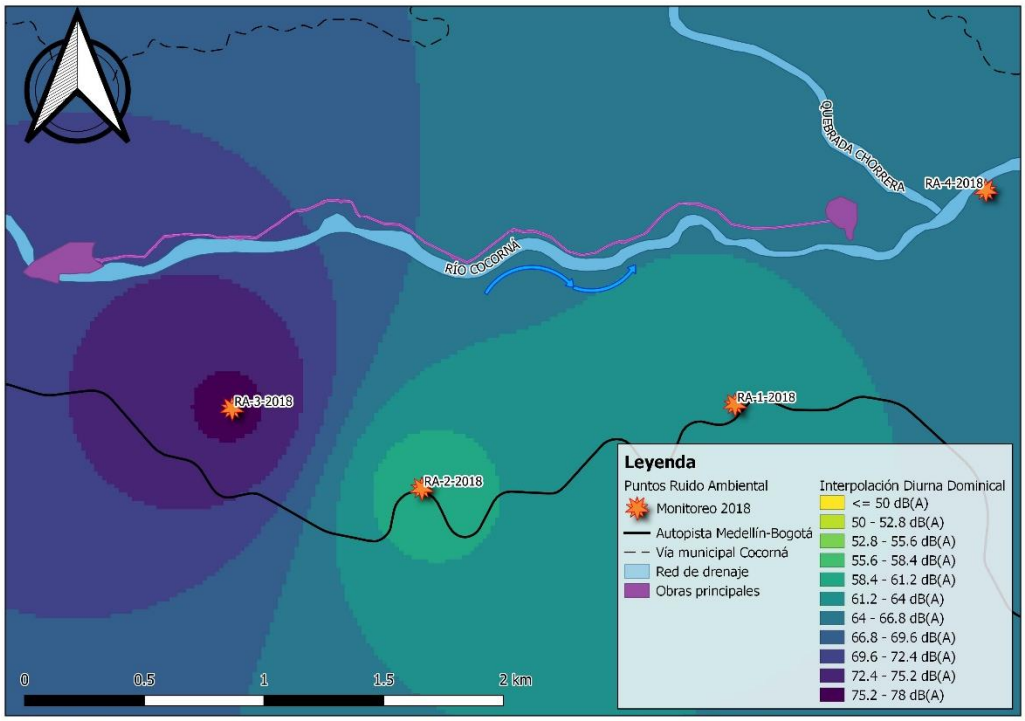


Figura 5-84. Interpolación de ruido ambiental, Monitoreo 2018 - jornada diurna dominical

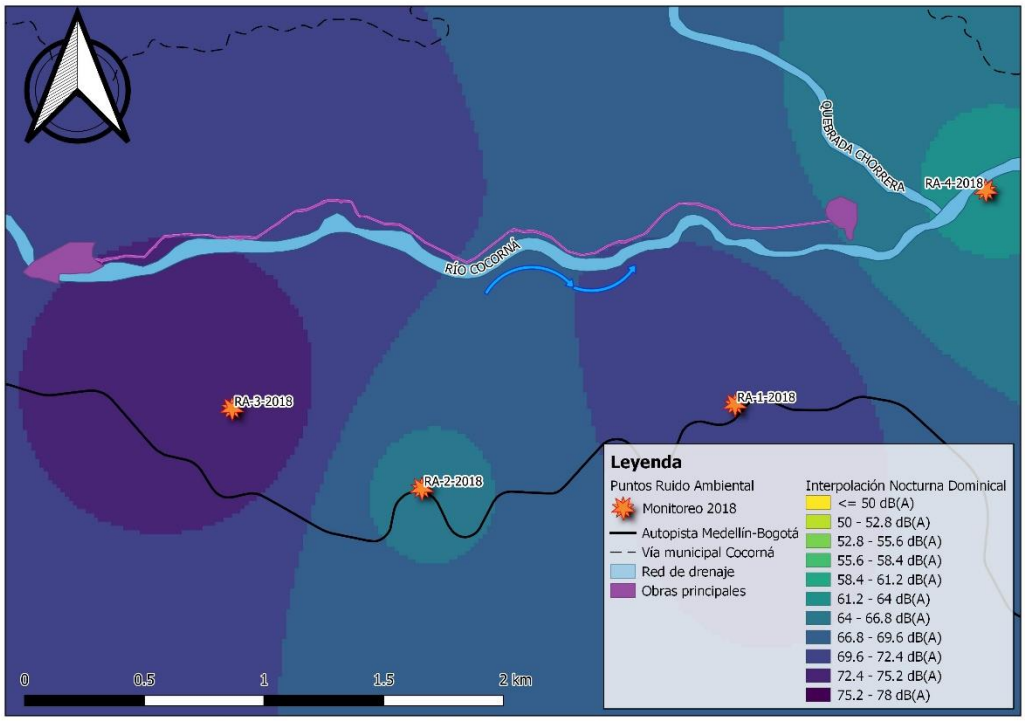


Figura 5-85. Interpolación de ruido ambiental, Monitoreo 2018 - jornada nocturna dominical

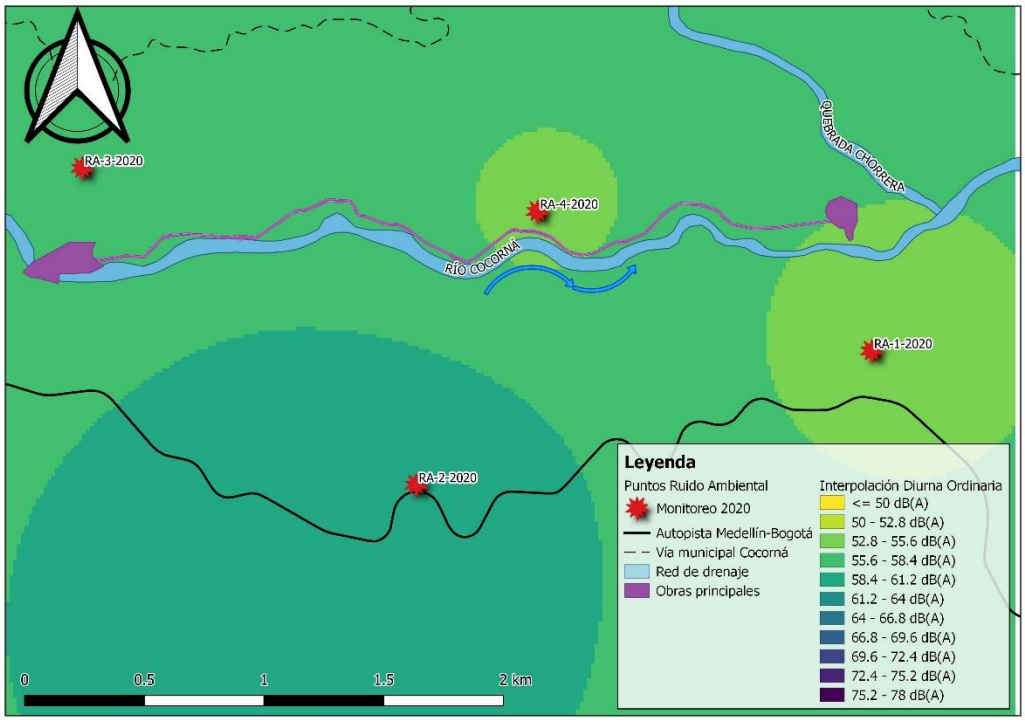


Figura 5-86. Interpolación de ruido ambiental, Monitoreo 2020 - jornada diurna ordinaria

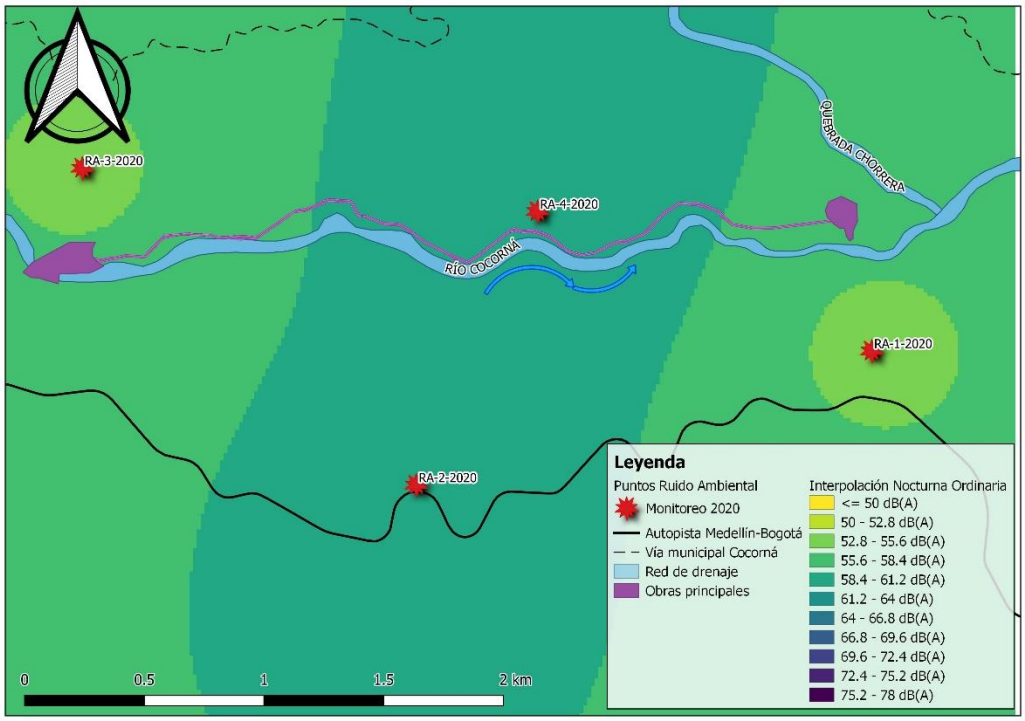


Figura 5-87. Interpolación de ruido ambiental, Monitoreo 2020 - jornada nocturna ordinaria

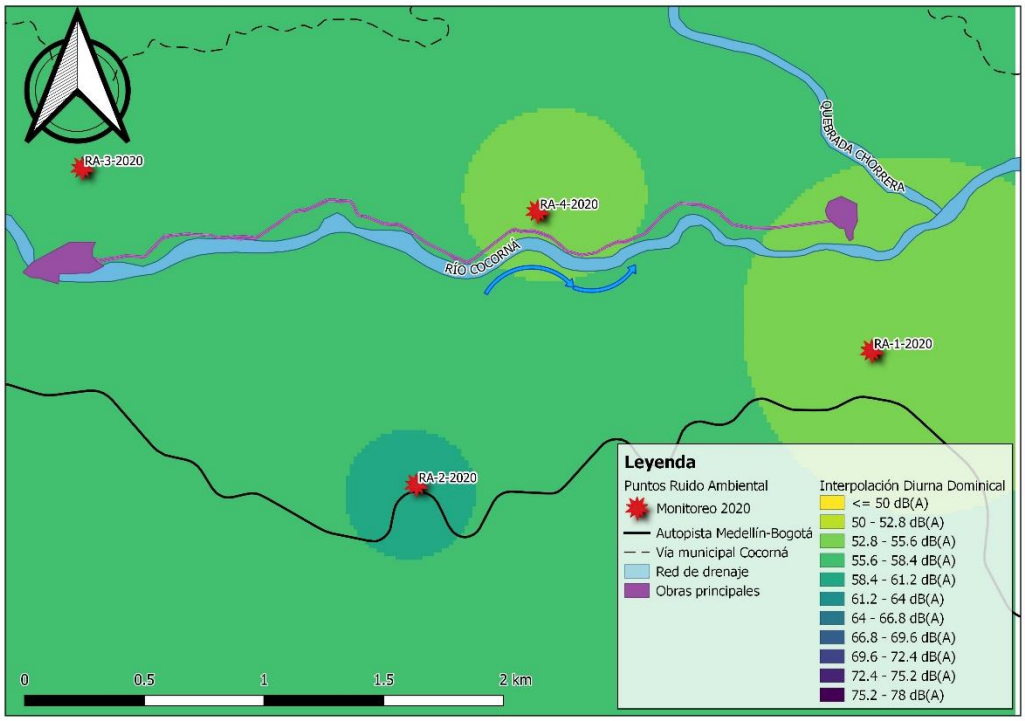


Figura 5-88. Interpolación de ruido ambiental, Monitoreo 2020 - jornada diurna dominical

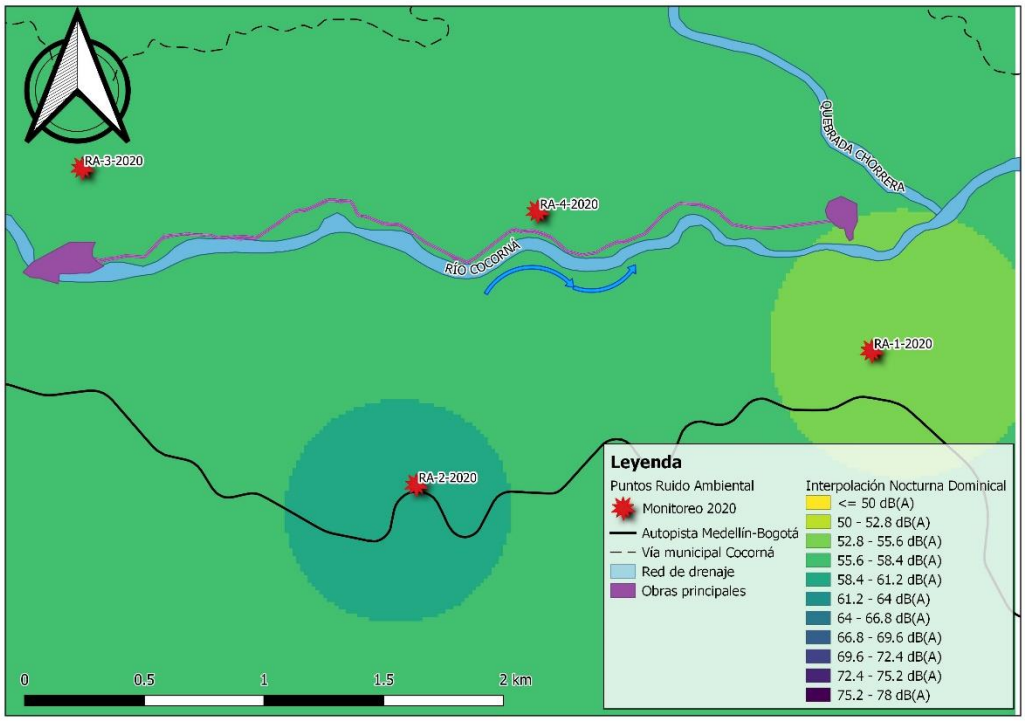


Figura 5-89. Interpolación de ruido ambiental, Monitoreo 2020 - jornada nocturna dominical

5.1.4 Hidrología

El estudio hidrológico del área de influencia del proyecto hidroeléctrico Cocorná III, tiene como fin identificar y describir la red hídrica y el régimen hidrológico de la Cuenca del Río Cocorná, desde su nacimiento hasta su desembocadura al río Calderas. Su caracterización se considera importante, debido a que este proyecto pretende captar parte del caudal del río Cocorná para su aprovechamiento en la generación de energía hidroeléctrica, y por tanto desde el punto de vista hidrológico, se pueden generar impactos negativos sobre este ecosistema hídrico, debido a la disminución de los caudales naturales del río en el tramo directamente intervenido por el proyecto, afectando las especies de flora y fauna asociadas a él y a los habitantes del área de influencia que pueden usar este preciado recurso en el desarrollo de actividades agroindustriales o pecuarias.

5.1.4.1 Localización del área de influencia del proyecto con respecto a la zonificación hidrográfica del Ideam

El proyecto hidroeléctrico Cocorná III está localizado en el municipio de Cocorná en el departamento de Antioquia, sobre el río Cocorná, entre las cotas 1345 msnm y 1122 msnm aproximadamente, en el área hidrográfica del Magdalena – Cauca, zona hidrográfica del Medio Magdalena y subzona hidrográfica del Río Nare (código de la zonificación hidrográfica del Ideam 2308-03), ver Figura 5-90.

La Cuenca del Río Cocorná, delimitada hasta la desembocadura al río Calderas, está localizada en territorio de los municipios de El Carmen de Viboral, Santuario, Granada y Cocorná, sobre la cordillera Central y desemboca al río Calderas aproximadamente en la cota 746 msnm, en las coordenadas 888.429 Este y 1.157.590 Norte (sistema de coordenadas Magna Sirgas origen Bogotá).

Este importante ecosistema hídrico tiene un área cercana a los 373,7 km^2, nace a una altura aproximada de 2.843 msnm y se extiende en su totalidad en jurisdicción de Cornare. Sus principales afluentes son los ríos San Lorenzo, San Matías y las quebradas La Linda, La Pisquina, La Rumbona, El Biadal, La Soledad, La Trinidad, La Chorrera y La Hundida. Ver Figura 5-91.

La Cuenca del Río Cocorná hace parte de la cuenca hidrográfica del río Samaná Norte (clasificada por el Ideam con el código 2308-03), la cual tiene un área cercana a las 2008,3 km^2, una altura máxima de 3177 msnm y su punto más bajo a los 150 msnm, descargando sus aguas a la Cuenca del río Nare y este a la cuenca del Río Magdalena a una altura aproximada de 137 msnm en el municipio de Puerto Nare. Figura 5-92.

La cuenca del río Cocorná, hasta la captación del proyecto, tiene un área de 119,3 km^2 y los principales afluentes en dicho tramo son las quebradas La Hundida, La Linda, El Biadal y el río San Lorenzo. Ver Figura 5-91.

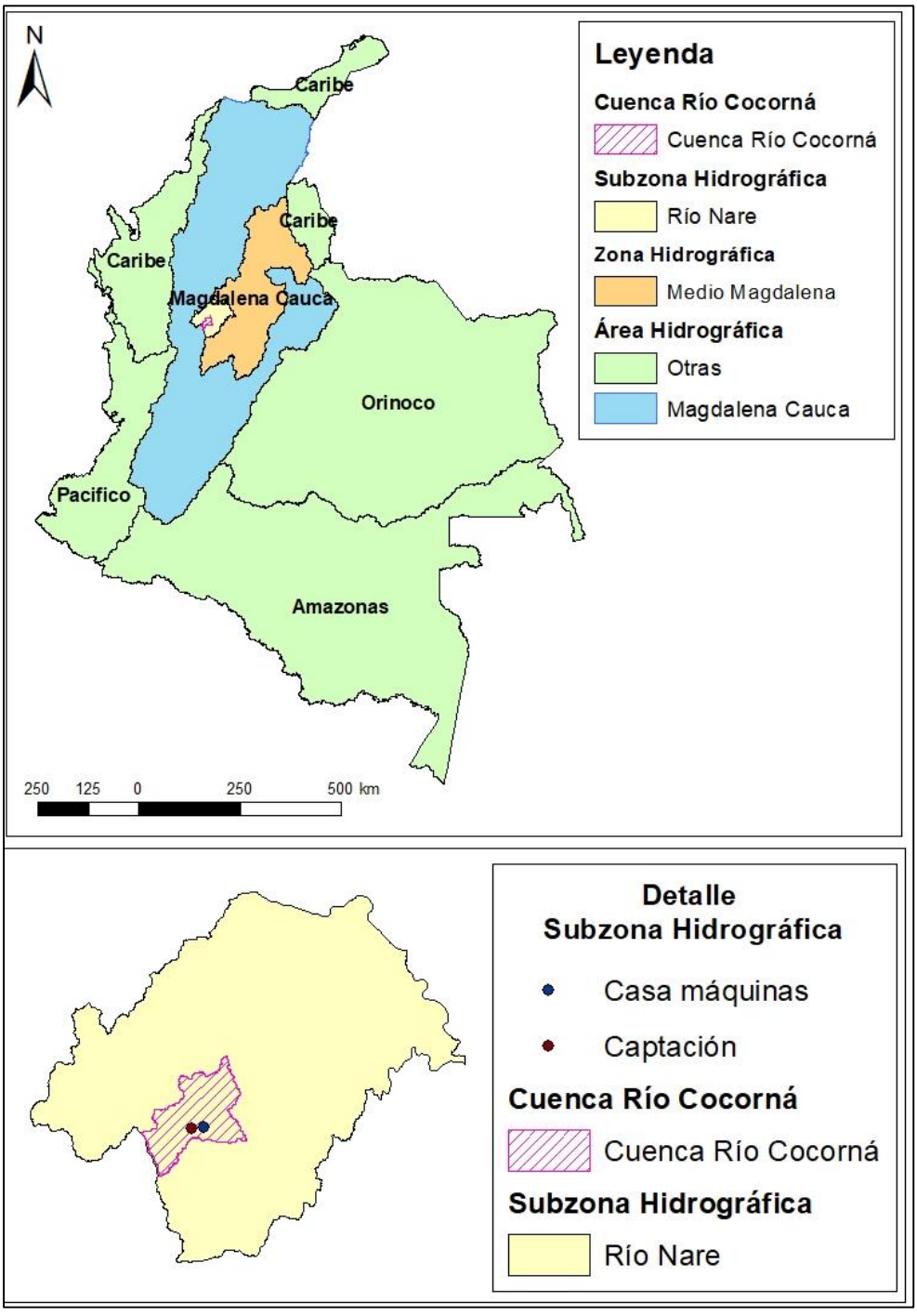


Figura 5-90. Zonificación hidrográfica área de estudio

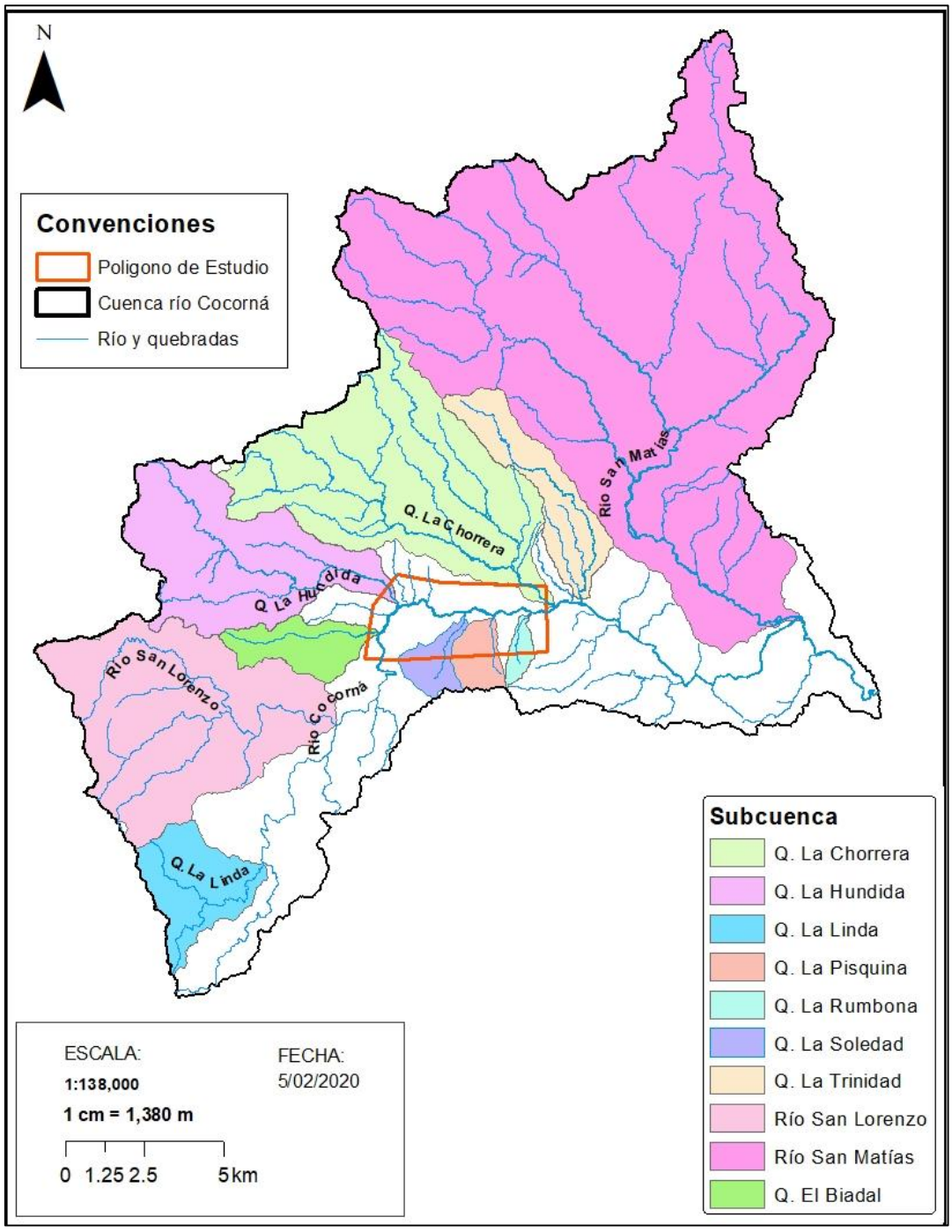


Figura 5-91. Principales Subucuencas de la Cuenca del Río Cocorná
Q: Quebrada

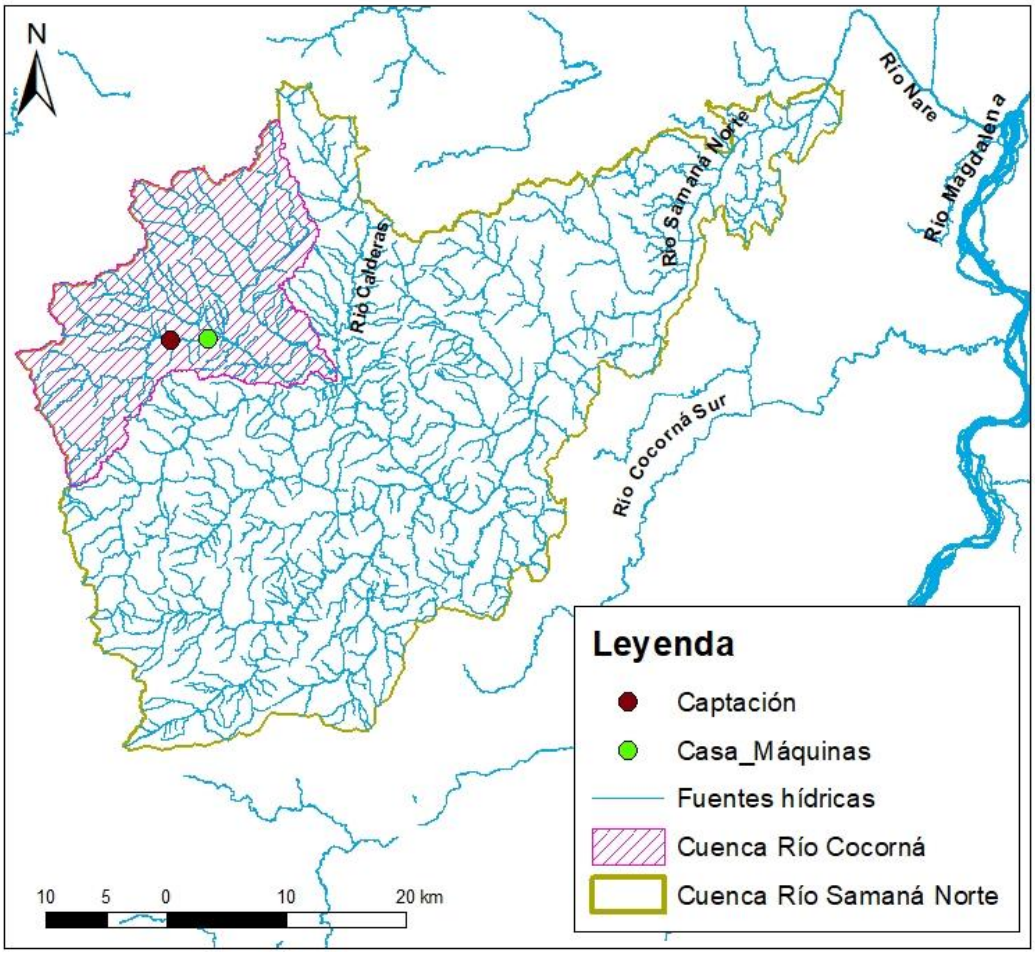


Figura 5-92. Ubicación de la Cuenca del Río Cocorná con respecto a la Cuenca del Río Samaná Norte

5.1.4.2 Caracterización morfométrica de las unidades de análisis hidrográficas

Para la descripción de los parámetros morfométricos de la cuenca hasta los puntos donde se va a intervenir la corriente y hasta la desembocadura del río Cocorná al río Caldera se utilizó el Modelo de Elevación Digital – DEM- del satélite Alos Palsar I de la Agencia Japonesa de Exploración Aeroespacial que tiene una resolución de 12,5 m (Figura 5-93), además del uso de herramientas de sistemas de información geográfico SIG que permiten estimar las variables analizadas y en algunos casos generar mapas distribuidos de éstas.

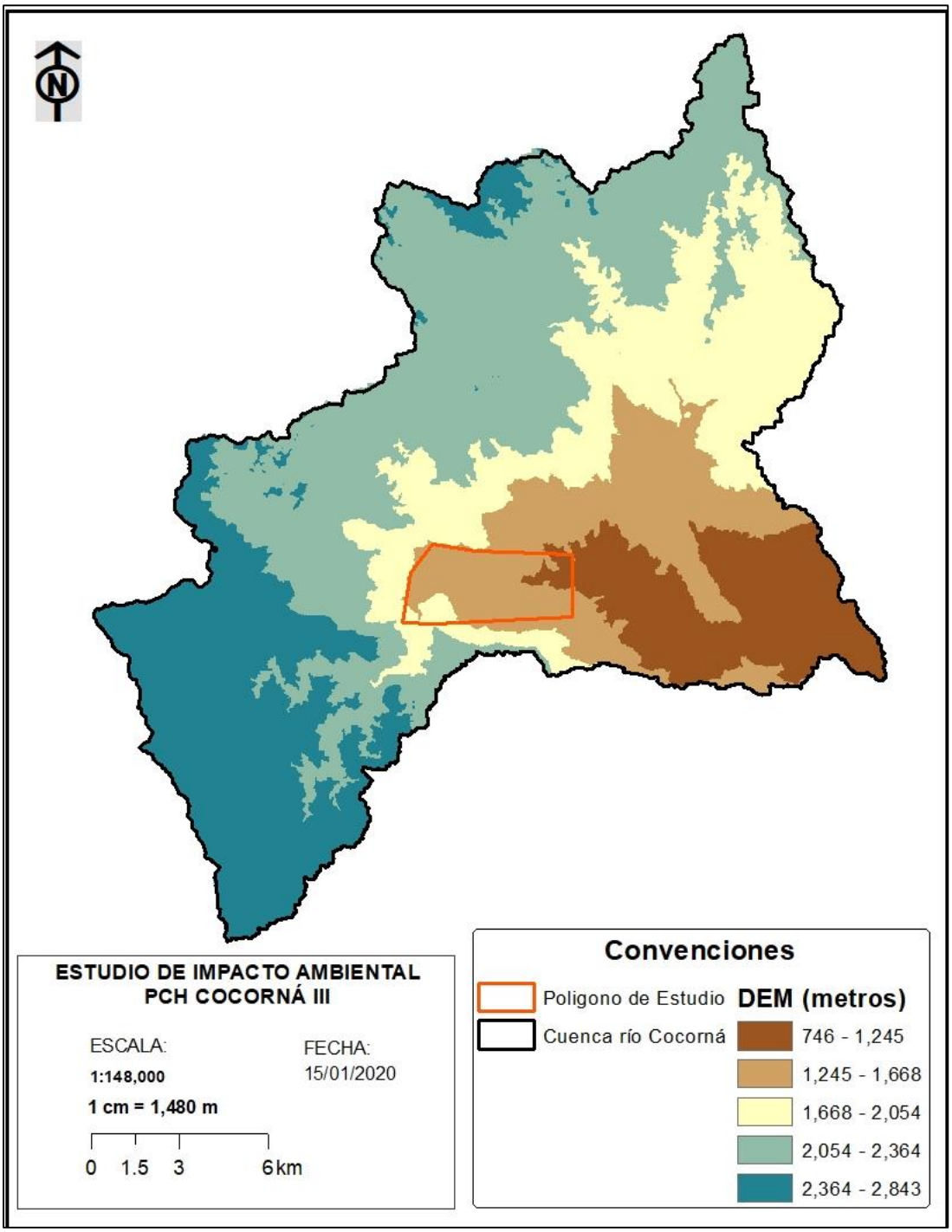


Figura 5-93. DEM satélite Alos Palsar I de las agencias espaciales NASA y JAXA. Resolución de 12,5 m

El polígono de estudio de la figura anterior, corresponde al polígono que Cornare autorizó en el Permiso de Estudio de los Recursos Naturales con fines de aprovechamiento del recurso hídrico.

A continuación, se describen algunas de las variables geométricas que se estimaron para describir las cuencas de interés:

- Factor de Forma

Para analizar la elongación de la cuenca a ser intervenida por el proyecto, y por tanto su tendencia a concentrar el escurrimiento de lluvias intensas formando fácilmente grandes crecidas, se evaluó el factor de forma. Este factor relaciona el área de la cuenca con el cuadrado de su longitud, es decir es la relación que existe entre el ancho medio de la cuenca y la longitud axial de la misma (Bateman, 2007). Factores de forma bajos están asociados con cuencas muy alargadas menos sujetas a crecientes.

$$Ff = \frac{A}{L^2}$$

Donde:

Ff: factor de forma

A: área de la cuenca

L: longitud de la cuenca

- Coeficiente de compacidad de Gravelius (Kc)

El coeficiente de compacidad relaciona el perímetro P de la cuenca de interés de área A, con el perímetro de un círculo que tiene la misma área A. Según Londoño C. (2001):

"a medida que el coeficiente de compacidad tiende a la unidad, aumenta la torrencialidad de la cuenca, debido a que las distancias relativas de los puntos de la divisoria, con respecto a uno central, no presentan diferencias mayores, y el tiempo de concentración se hace menor; por lo tanto, mayor será la posibilidad de que las ondas de crecida sean continuas. Nunca los valores de este coeficiente serán inferiores a uno".

Este mismo autor establece los rangos de clasificación del Kc, ver Tabla 5-61.

$$Kc = 0{,}2821 \frac{P}{A^{0{,}5}}$$

Tabla 5-61. Rangos de clasificación del Coeficiente de Compacidad de Gravelius (Kc)

Valores de Kc	Forma de la cuenca	Característica
1,00-1,25	Compacta o redonda a oval redonda.	Cuenca torrencial peligrosa

Valores de Kc	Forma de la cuenca	Característica
1,25-1,50	Oval redonda a oval oblonga.	Presenta peligros torrenciales, pero no iguales a la anterior.
1,50-1,75	Oval oblonga a rectangular oblonga.	Son las cuencas que tienen menos torrencialidad.

Fuente: Londoño C. (2001)

Los resultados del coeficiente de compacidad se presentan en la Tabla 5-65.

- Pendiente de la cuenca

El relieve medio de la cuenca del río Cocorná muestra un terreno accidentado con altas variaciones altitudinales, donde el 47% del área tiene una pendiente media del 25%, el 40% del área del 48%, un 3,0% pendientes mayores al 75% y tan solo un 10% de este ecosistema hídrico tiene pendientes suaves menores o iguales al 12% (ver Tabla 5-62).

Tabla 5-62. Rango de pendientes por área

Pendiente Inferior (%)	Pendiente Superior (%)	Pendiente Promedio (%)	%Área
0,00	4,47	1,3	4,00
5,10	6,32	5,7	1,00
7,07	12,00	9,5	4,84
12,08	34,99	24,6	47,27
35,01	74,97	47,5	39,90
75,01	100,00	84,1	2,21
100,02	866,00	128,3	0,78
Pendiente Media de la Cuenca 34,0%			

- Índice de sinuosidad (Is)

El índice de sinuosidad es la relación de la longitud del cauce principal considerado físicamente natural y la longitud del mismo en el valle:

$$Is = \frac{L}{Ls}$$

Donde L es la longitud del cauce natural y Ls es la longitud del valle del cauce principal, medida sobre un trazado suave del cauce o también se puede tomar como la distancia corta entre el inicio y el final del cauce.

Una mayor sinuosidad es frecuente en cauces de poca pendiente y con poca capacidad erosiva, mientras que cauces poco sinuosos se presentan principalmente en cauces de altas pendientes y, por ello, con mayor fuerza erosiva.

Altas sinuosidades también se originan debido a causas estructurales, cuando existe una red de fallas que modifica el trazado del cauce.

Según el valor del índice de sinuosidad, los cauces se clasifican en, ver Tabla 5-63.

Tabla 5-63. Tipo de canal según el índice de sinuosidad

Tipo de canal	Índice de sinuosidad
Canal rectilíneo	1-1,2
Canal transicional	1,2-1,5
Canal regular	1,5-1,7
Canal irregular	1,7-2,1
Canal tortuoso	>2,1

Fuente: (Stanley A Schumm, 1963)

- Variación altitudinal de la cuenca

La variación altitudinal de la cuenca puede ser descrita por medio de la distribución hipsométrica o la curva hipsométrica (Organización Meteorológica Mundial, 1994). Esta curva proporciona el porcentaje (o fracción) de la superficie total de la cuenca, que se encuentra por debajo de una elevación determinada (Figura 5-94 y Tabla 5-64). Como se puede observar, la altura de frecuencia media o altura bajo la que se encuentra el 50% del área es de 2217 msnm. Las franjas altitudinales muestran que el 24,3% de la cuenca tiene una altura que varía entre los 2214 y 2423 msnm (90,78 km^2), mientras que un 21% está entre los 2005 y 2213 msnm (77,88 km^2). De acuerdo con los datos de la distribución de frecuencias y la forma de la curva obtenida, se observa una cuenca joven con una alta capacidad erosiva y con baja capacidad para depositar material de arrastre en las llanuras de inundación del cauce. El estudio de sedimentos a escala de cuenca podrá definir con mayor detalle las cantidades erosionadas por año y por unidad de área, además de dar información de la ubicación de los sitios de agradación y degradación potencial.

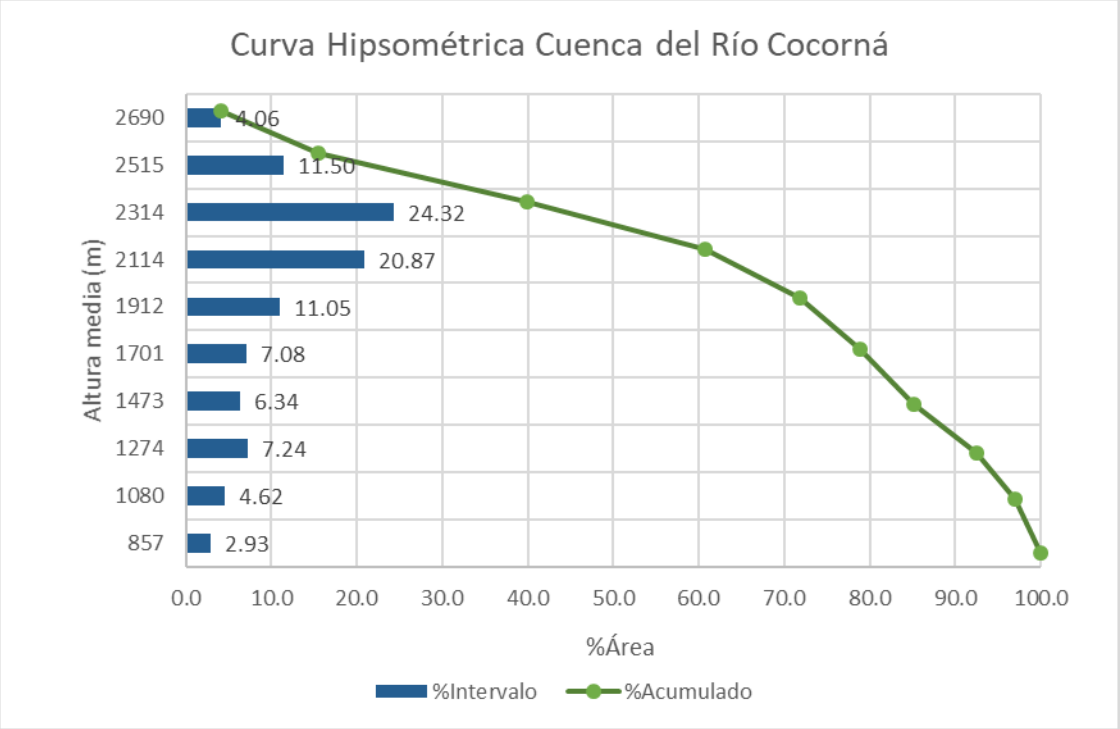


Figura 5-94. Curva hipsométrica de la Cuenca del río Cocorná

Tabla 5-64. Distribución de áreas por elevación

Altura Mínima (msnm)	Altura Máxima (msnm)	Promedio (msnm)	Área entre intervalos (km²)	Área acumulada (Km²)	% Acumulado	% Intervalo
746,0	955,0	857	10,9	373,2	100,0	2,9
956,0	1165,0	1080	17,2	362,3	97,1	4,6
1166,0	1375,0	1274	27,0	345,1	92,5	7,2
1376,0	1584,0	1473	23,7	318,1	85,2	6,3
1585,0	1794,0	1701	26,4	294,4	78,9	7,1
1795,0	2004,0	1912	41,2	268,0	71,8	11,0
2005,0	2213,0	2114	77,9	226,7	60,7	20,9
2214,0	2423,0	2314	90,8	148,8	39,9	24,3
2424,0	2633,0	2515	42,9	58,1	15,6	11,5
2634,0	2843,0	2690	15,2	15,2	4,1	4,1
					Total	**100,0**

En la Tabla 5-65 se presentan las principales características morfométricas de la Cuenca del Río Cocorná hasta el punto de cierre en la desembocadura al río Calderas y hasta los puntos de captación y descarga de la PCH Cocorná III.

Tabla 5-65. Características morfométricas de la Cuenca del Río Cocorná

Parámetro de la cuenca	Desembocadura al río Calderas	Captación PCH Cocorná III	Casa Máquinas PCH Cocorná III
Área (km^2)	373,7	119,3	131,4
Perímetro (km)	163,6	64,1	68,9
Cota máxima (msnm)	2828,8	2828,8	2828,8
Cota mínima (msnm)	746,0	1364,0	1145,2
Coordenada X al centroide (m)	875544,6	868228,9	869338,8
Coordenada Y al centroide (m)	1163081,1	1157145,4	1156888,9
Altura Z al centroide (msnm)	1974,6	2267,6	2190,9
Longitud cauce principal (km)	38,2	19,6	23,2
Longitud de la cuenca (km)	45,2	24,4	28,0
Longitud total de la red hídrica (km)	633,9	199,6	221,1
Ancho promedio de la cuenca (km)	8,28	4,90	4,69
Altura media de la cuenca (m)	2217,0	-	-
Pendiente media de la cuenca (%)	34,0	33,2	-
Pendiente del cauce principal (%)	4,61	5,86	5,83
Factor de forma (Ff)	-	0,20	0,17
Coeficiente de compacidad (Kc)	2,39	1,66	1,70
Forma cuenca según Kc	-	Oval oblonga a rectangular oblonga	Oval oblonga a rectangular oblonga
Orden de la red hídrica	6	5	5
Índice de sinuosidad	1,64	1,49	-
Tipo de drenaje según sinuosidad	Canal Regular	Canal Transicional	-
Densidad de corrientes (1/km^2)	3,59	3,53	3,61
Densidad de drenaje (Dd) (km/km^2)	1,70	1,67	1,68
Coeficiente de torrencialidad (1/km^2)	1,80	1,77	1,81

Nota: los datos de elevación fueron tomados del DEM del satélite Alos Palsar I de las agencias espaciales NASA y JAXA. Resolución de 12,5 m

Los factores de forma obtenidos: 0,17 para la Cuenca del río Cocorná hasta la descarga y 0,20 hasta la captación de la PCH Cocorná III, son característicos de cuencas alargadas, menos propensas a tener una lluvia intensa en toda su superficie y con una acumulación de flujo más lenta con tiempos de concentración mayores, lo cual se refleja en los hidrogramas de caudales máximos.

Los valores obtenidos para el coeficiente de compacidad confirman los resultados del factor de forma. La Cuenca del Río Cocorná hasta los puntos analizados presenta una forma oval oblonga a rectangular oblonga que tiene una menor tendencia a la torrencialidad.

El índice de sinuosidad obtenido de 1,42 es típico de canales poco sinuosos, con altas pendientes y una alta fuerza erosiva que describe de forma aproximada el cauce del río Cocorná.

El índice de torrencialidad está relacionado con el grado de torrencialidad de una cuenca y se mide por medio de la relación del número de tramos de orden 1 que existen en la cuenca y el área total de la misma. Un mayor índice de torrencialidad indica una mayor tendencia a presentar avenidas torrenciales. Los resultados obtenidos de este coeficiente (ver Tabla 5-65) no reflejan la alta amenaza por avenidas torrenciales de las cuencas analizadas, la cual depende de otros factores adicionales como las altas pendientes, altas precipitaciones, coberturas vegetales, usos del suelo y material superficial, ver el Capítulo 10, numeral Plan de Gestión del Riesgo de este EIA.

En la Figura 5-95 se presenta el perfil longitudinal del río Cocorná. Como se puede observar, aproximadamente a los 2.150 msnm se presenta un cambio marcado de pendiente que, según el análisis de la geología regional, se debe a un cambio en la unidad geológica pasando de la unidad Cajamarca al Batolito antioqueño (ver Capítulo 5, sección Geología regional). Cerca a los 1.000 msnm, en la parte baja de la cuenca, se observa un nuevo cambio de pendiente que da origen a un valle más amplio.

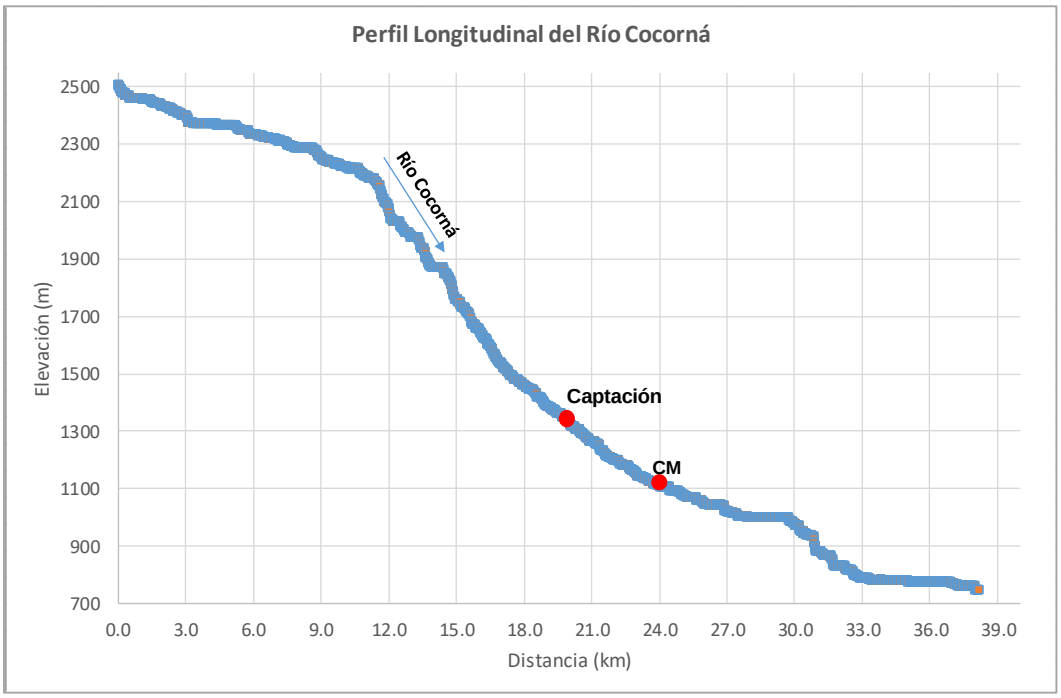


Figura 5-95. Perfil longitudinal del río Cocorná

5.1.4.3 Descripción de los sistemas y patrones de drenaje

- Densidad de drenaje (Dd)

Con el fin de determinar si la cuenca del Río Cocorná está bien o mal drenada se utilizó la densidad de drenaje (Dd). Esta variable se define como la relación entre la longitud total de las corrientes de agua y el área de la cuenca. En términos generales, una mayor densidad de drenaje, está relacionada con una respuesta más rápida de la cuenca frente a una tormenta, evacuando el agua en menos tiempo. En la Cuenca del Río Cocorná, la longitud total de las corrientes es de 634 km lo que genera una Dd de 1,7 km/km^2, típica de cuencas con una baja a moderada intensidad de drenaje. Intensidades de drenaje mayores a 3,0 km/km^2 indican sistemas de drenaje eficientes, mientras que valores menores a 1,5 indican una baja respuesta de la cuenca para la evacuación de fuertes lluvias (Londoño Arango, 2001).

En la Figura 5-96 se presenta el patrón de drenaje de la cuenca y el orden de los cauces estimado con el método de Horton – Strahler. El patrón de drenaje identificado es principalmente de tipo dentrítico en el cual predominan los procesos erosivos. Los patrones dentríticos se caracterizan por mostrar una ramificación arborescente en la que los tributarios se unen a la corriente principal formando ángulos agudos (Londoño Arango, 2001). La cuenca hasta el punto de captación del proyecto Cocorná III es de orden 5 y hasta la desembocadura al río Calderas es de orden 6, ver Tabla 5-66.

Tabla 5-66. Orden de las corrientes en la Cuenca del Río Cocorná

Orden Corriente	Cuenca del Río Cocorná - Desembocadura al río Calderas		Captación PCH Cocorná III		Casa Máquinas PCH Cocorná III	
	Número de tramos	Longitud (km)	Número de tramos	Longitud (km)	Número de tramos	Longitud (km)
1	674	312.4	211	98.9	238	110.2
2	297	153.0	102	47.5	114	53.3
3	182	86.0	57	25.1	59	26.2
4	96	45.0	35	20.5	35	20.5
5	80	33.4	16	7.7	28	10.9
6	12	4.0				
Total	**1341**	**633.9**	**421**	**199.6**	**474**	**221.1**

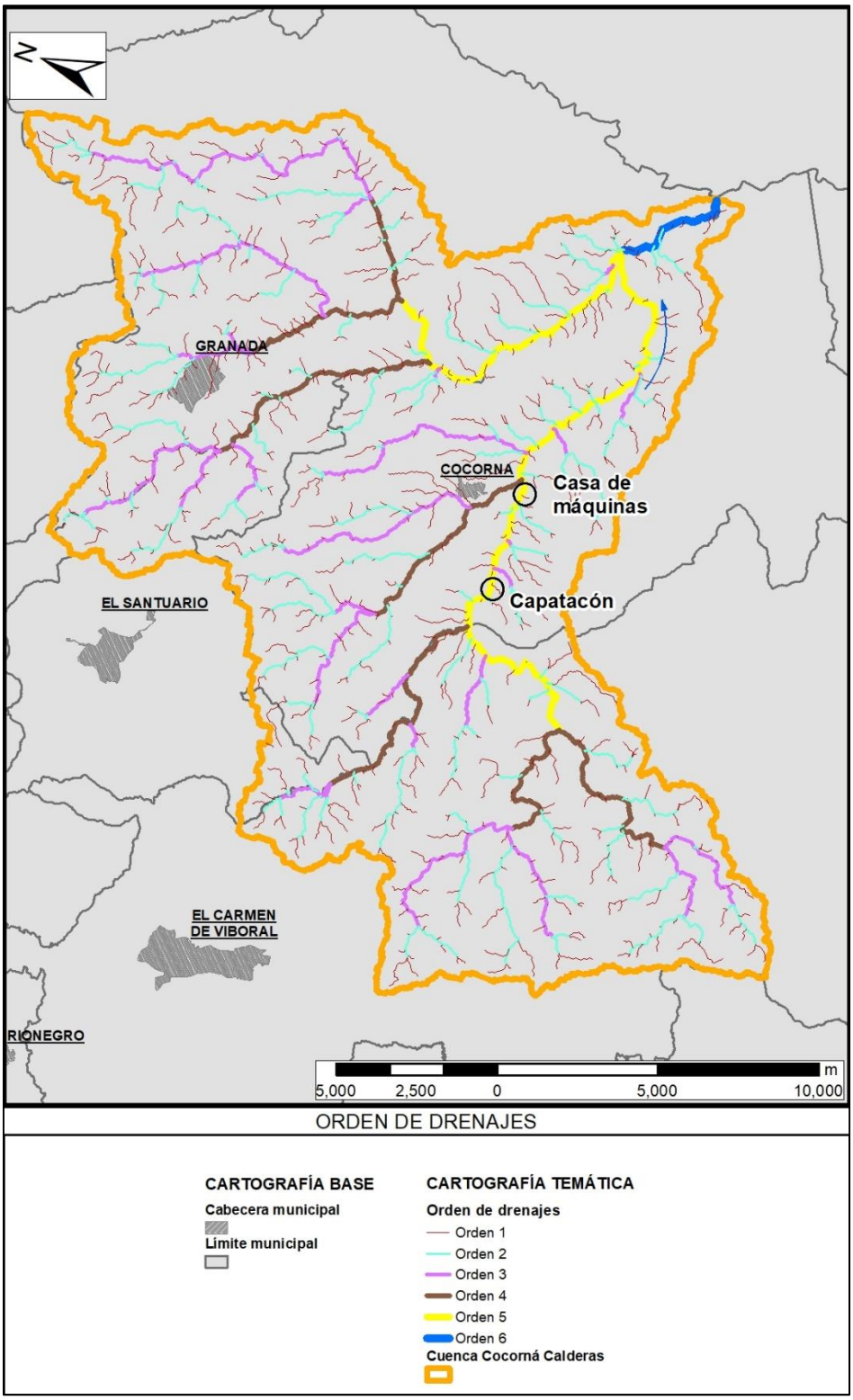


Figura 5-96. Patrón de drenaje de la Cuenca del Río Cocorná

En la Tabla 5-67 se presentan las características de la red de drenaje de la Cuenca del Río Cocorná. Como se puede observar, el río San Matías, la quebrada La Chorrera y el río San Lorenzo son los afluentes más importantes por su tamaño, seguidos por las quebradas La Hundida, La Trinidad y La Linda.

Tabla 5-67. Principales características del sistema de drenaje. Cuenca del Río Cocorná

Variable	Subcuenca								
	Q. La Chorrera	Q. La Trinidad	Q. La Rumbona	Q. La Pisquina	Q. El Biadal	Río San Lorenzo	Q. La Hundida	Río San Matías	Q. La Linda
Área (km^2)	42,9	10,5	1,2	3,0	6,1	39,3	26,4	146,4	10,1
Perímetro (km)	36,6	19,9	5,9	7,4	13,3	32,5	38,5	73,8	16,4
Cota inferior de la cuenca (msnm)	1123	1091	1169	1234	1568	2037	1495	781	2351
Cota superior de la cuenca (msnm)	2431	2371	2172	2248	2562	2843	2608	2573	2843
Altura promedio de la cuenca (msnm)	2033	1791	1562	1656	2201	2524	2279	1951	2605
Pendiente máxima de la cuenca (%)	350,0	230,5	326,2	272,1	4348	319,9	178,9	602,3	505,7
Pendiente media de la cuenca (%)	33,0	34,9	48,8	55,9	51,0	34,5	29,2	36,3	31,3
Longitud del cauce principal (km)	10,5	8,5	1,6	1,5	5,1	13,6	11,9	22,7	5,5
Cota superior del canal principal (msnm)	2237	2236	1508	1514	2407	2641	2463	2267	2628
Cota inferior del canal principal (msnm)	1123	1091	1169	1233	1568	2037	1495	781	2351
Pendiente media del cauce (%)	10,6	13,4	20,6	19,3	16,4	4,4	8,2	6,6	5,1
Número de orden	4,0	3,0	2,0	3,0	3,0	4,0	4,0	5,0	3,0

Fuente: Praming S.A.S.
Q: quebrada

5.1.4.4 Evaluación de series hidrológicas

Para calcular los caudales medios, medios mínimos y medios máximos mensuales multianuales en el sitio de captación del proyecto, se utilizaron los registros de caudales medios diarios de las estaciones Pailania y La Garrucha del IDEAM (códigos 23087200 y 23087190 respectivamente), ubicadas en la Cuenca del Río Samaná Norte, ecosistema hídrico que contiene la Cuenca del Río Cocorná, ver Tabla 5-68 y Figura 5-97. Estas estaciones fueron seleccionadas por la calidad y longitud de sus series de tiempo, las cuales tienen información desde 1974 hasta la fecha, con

porcentajes de datos faltantes del 19,1% para La Garrucha y del 5,4% para Pailania, ver Tabla 5-69.

En el Anexo 5.1.7.1 se presentan las series de caudal medio diario del Ideam, utilizadas para la transferencia del caudal al punto de captación del proyecto.

Tabla 5-68. Descripción de las estaciones Pailania y La Garrucha.

Nombre	Código	Categoría	Variable	Corriente	Elevación (m)	Latitud	Longitud	Municipio	Período Registro
Pailania	23087200	LG	Caudal medio diario	Río Santo Domingo	980	1.152.557	884.890	Cocorná	1974-2016
La Garrucha	23087190	LM	Caudal medio diario	Río Samaná Norte	403	1.155.140	904.615	San Luis	1974-2016

Sistema de coordenadas: Magna Sirgas Colombia Bogotá. LG: limnigráfica. LM: limnimétrica

Tabla 5-69. Porcentaje de datos faltantes por año de las series de caudal analizadas

Año	% Datos faltantes Estación Pailania	% Datos faltantes Estación La Garrucha
1974	0%	0%
1975	0%	0%
1976	0%	0%
1977	0%	0%
1978	0%	34%
1979	0%	100%
1980	0%	100%
1981	0%	100%
1982	0%	100%
1983	0%	12%
1984	0%	0%
1985	0%	0%
1986	0%	0%
1987	25%	1%
1988	0%	47%
1989	0%	0%
1990	0%	0%
1991	17%	0%
1992	0%	0%

Año	% Datos faltantes Estación Pailania	% Datos faltantes Estación La Garrucha
1993	0%	17%
1994	0%	33%
1995	0%	0%
1996	0%	0%
1997	0%	0%
1998	0%	0%
1999	0%	0%
2000	0%	36%
2001	0%	33%
2002	0%	6%
2003	0%	71%
2004	0%	28%
2005	9%	10%
2006	14%	15%
2007	14%	20%
2008	4%	1%
2009	6%	16%
2010	1%	4%
2011	1%	4%
2012	34%	13%
2013	6%	3%
2014	22%	18%
2015	39%	0%
2016	1%	1%

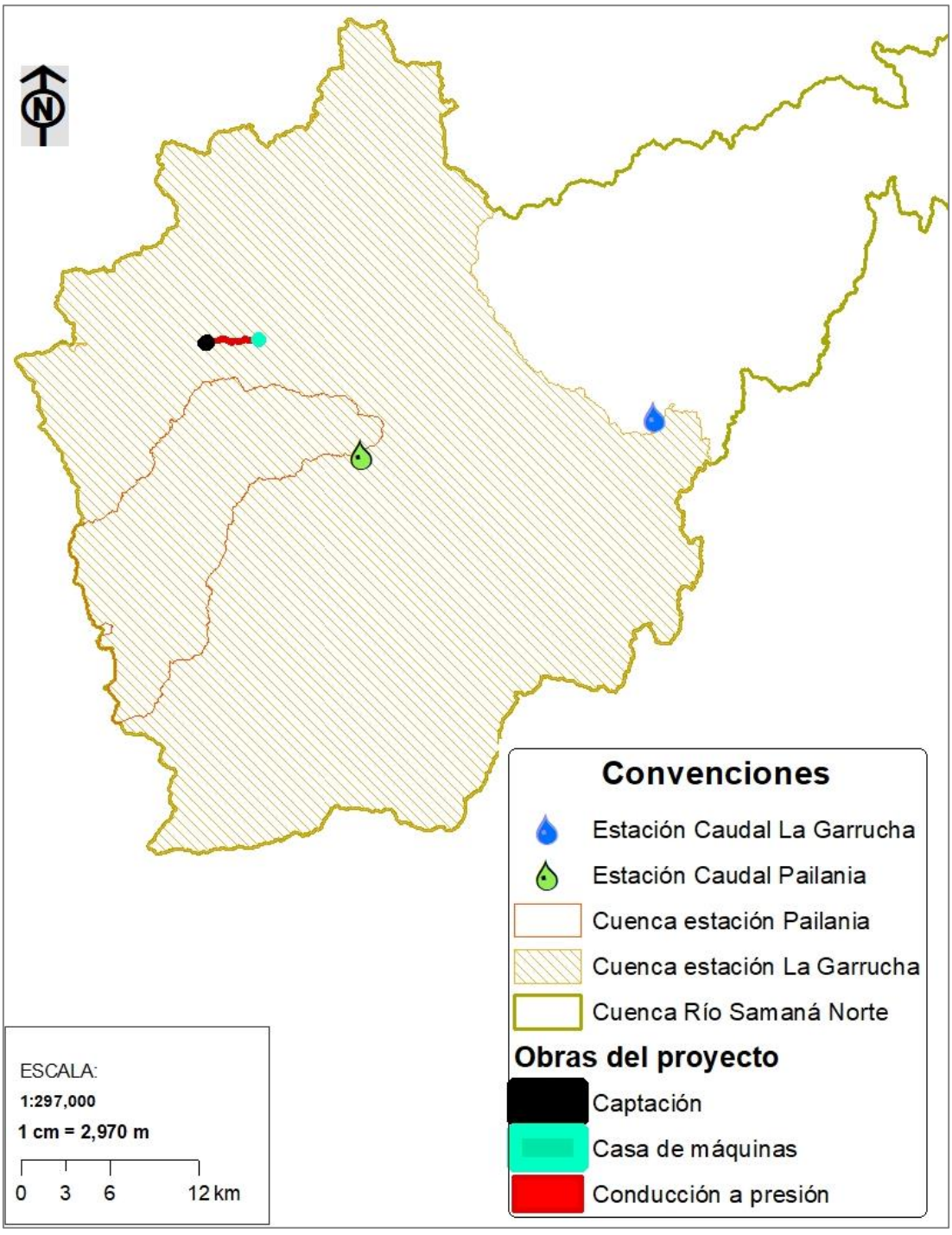


Figura 5-97. Estaciones hidrológicas del Ideam usadas en el estudio

Con el fin de determinar si las series de datos analizadas pertenecen a la misma población estadística, se realizó un análisis de consistencia (análisis de masa simple).

Los resultados obtenidos, que muestran que ambas series son consistentes debido a que sus acumulaciones siguen un comportamiento lineal con pendiente constante se presentan en la Figura 5-98 y Figura 5-99. Los pequeños saltos que se observan pueden deberse a la influencia de fenómenos climáticos como el Niño o la Niña, los cuales no persisten por más de cinco periodos, considerándose un comportamiento normal de variables ambientales (Castro, L. M., 2010).

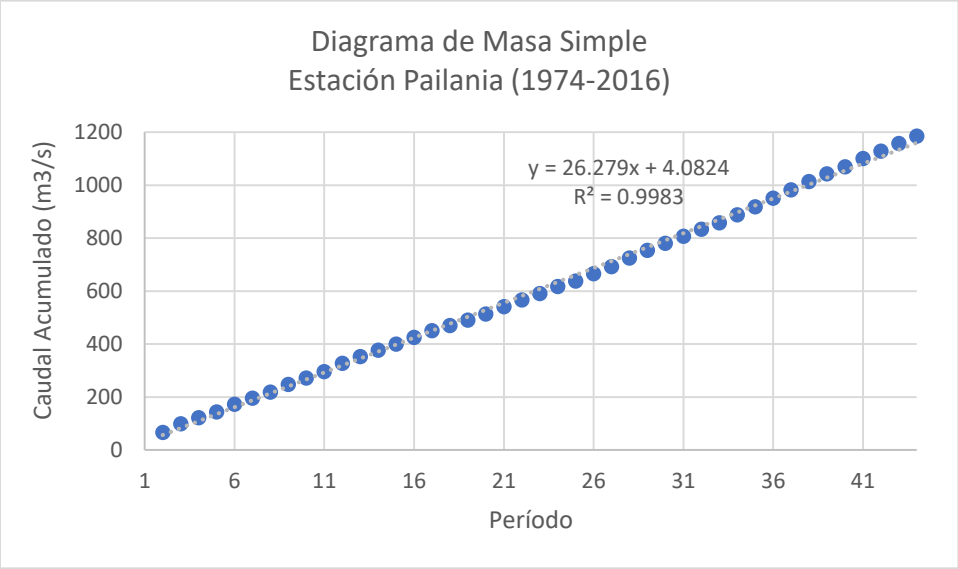


Figura 5-98. Análisis de masa simple estación Pailania

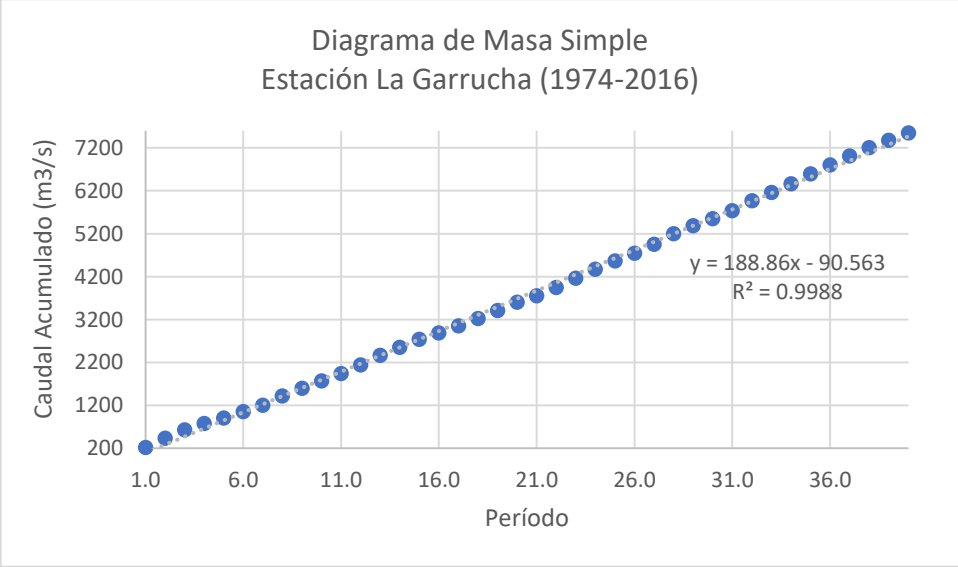


Figura 5-99. Análisis de masa simple estación La Garrucha

5.1.4.4.1 Análisis de la información de caudal de la estación Pailania

La estación Pailania presenta un caudal medio de 26,8 m^3/s en el período 1974-2016, lo que genera un rendimiento hídrico de 141 $L/s/km^2$, valor que es un 55% mayor que el rendimiento promedio de Colombia de 63 $L/s/km^2$ y un 75% mayor que el rendimiento hídrico del área hidrográfica del Magdalena – Cauca que tiene un valor de 35 $L/s/km^2$ **Fuente especificada no válida.**, ver Tabla 5-70.

Tabla 5-70. Datos de la estación Pailania

Estación	Corriente	Área Cuenca Aportante (km^2)	Período	Caudal (m^3/s)	Caudal específico ($L/s/km^2$)
Pailania	Río Santo Domingo	189,8	1974-2016	26,8	141

En la Tabla 5-71 se presenta la serie de caudales medios mensuales de la estación Pailania, utilizada para encontrar la serie de caudales del sitio de captación del proyecto. En la Figura 5-100, donde se presenta el caudal medio (medio, mínimo y máximo) mensual multianual, se observa la influencia del comportamiento bimodal de la precipitación (ver numeral 5.1.3.1.6 Precipitación) sobre los caudales, pero a diferencia de otras cuencas de Antioquia no se observa tan marcada la diferencia entre la temporada seca (diciembre-febrero y junio-agosto) y la húmeda (abril-mayo y septiembre-noviembre). Lo anterior indica una buena capacidad de la cuenca para la regulación de los caudales bases.

Tabla 5-71. Serie de caudales medios mensuales de la estación Pailania (1974-2016)

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
1974	33,5	25,2	21,1	33,3	30,9	28,4	19,4	44,5	32,3	37,5	47,1	27,5
1975	27,4	32,9	27,7	31,1	39,8	28,8	31,8	28,5	37,4	36,6	36,3	28,3
1976	33,1	30,0	30,6	37,4	33,2	19,1	5,6	9,5	13,5	20,6	25,5	16,1
1977	25,3	24,9	16,6	18,9	25,1	19,6	15,1	20,2	17,1	33,4	31,0	22,0
1978	19,0	14,0	25,1	40,7	35,3	23,6	33,3	15,1	26,3	32,7	33,8	37,3
1979	18,0	19,4	28,7	30,7	26,1	23,8	8,8	19,0	31,4	20,9	30,3	17,6
1980	22,2	20,2	13,7	19,3	27,8	25,8	13,9	17,4	19,2	34,3	40,0	26,9
1981	18,6	36,2	27,8	31,0	36,3	41,3	23,3	18,7	31,6	27,9	36,5	27,4
1982	20,3	45,1	25,2	26,5	39,4	16,3	10,5	8,5	30,7	30,5	18,0	16,7
1983	19,2	21,1	16,1	38,9	24,8	21,4	11,5	7,9	42,9	31,2	31,6	23,9
1984	19,5	30,6	30,7	26,0	25,0	32,6	27,0	23,9	32,8	47,5	37,4	40,0
1985	18,3	23,6	27,8	35,6	24,6	13,3	7,7	30,8	27,4	42,8	27,5	19,1
1986	28,9	17,0	29,2	18,3	27,8	29,5	4,8	25,6	23,2	31,5	34,2	25,3
1987	29,2	25,5	13,5	27,2	29,9	14,6	18,0	19,8	25,8			
1988	20,0	18,4	15,6	31,6	21,9	17,0	14,0	38,3	35,8	31,1	30,3	28,9

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
1989	34,1	35,6	21,3	32,2	21,7	20,4	9,8	24,6	35,3	34,8	25,6	21,2
1990	19,2	15,5	17,8	28,0	16,4	10,0	17,9	10,6	17,7	33,0	26,2	19,5
1991	21,8	17,2	19,7	17,9	27,9	25,7	14,5	12,3	22,1	24,3		
1992	18,0	18,4	21,8	24,8	39,4	21,1	10,3	22,1	27,0	22,1	23,0	26,4
1993	29,0	21,4	19,4	30,7	33,0	11,1	13,6	21,9	42,9	34,3	37,8	36,5
1994	27,7	25,9	26,2	33,1	38,0	19,6	16,2	13,2	16,6	23,1	38,9	25,3
1995	11,0	14,1	25,8	25,0	27,8	29,4	24,5	28,4	18,3	26,8	23,4	29,0
1996	24,7	23,6	21,9	30,3	37,6	24,0	21,8	24,8	24,7	34,2	20,8	40,1
1997	24,6	25,6	19,9	29,0	17,3	23,1	10,9	9,5	22,5	22,3	23,6	14,8
1998	16,9	23,5	23,0	45,9	25,7	18,9	23,2	26,9	30,8	30,0	30,8	31,9
1999	31,6	30,4	25,3	27,7	24,6	25,0	17,6	15,8	29,1	26,7	31,3	45,0
2000	26,0	23,4	38,4	37,6	37,2	35,4	33,4	28,9	41,7	27,9	26,5	26,4
2001	25,1	22,8	32,5	29,7	47,5	27,2	30,6	15,3	29,3	32,5	28,2	34,8
2002	23,1	28,6	30,5	30,7	22,5	17,6	18,0	16,7	31,8	33,8	36,6	25,6
2003	17,3	25,0	17,6	29,0	34,7	34,8	21,3	18,4	31,1	40,1	28,4	22,6
2004	33,3	20,0	29,9	40,3	26,0	15,2	18,3	18,1	32,4	28,8	32,8	23,9
2005	24,1	28,9	23,8	29,0	31,0	21,2	15,9	20,8	23,2	24,9	28,3	25,7
2006	27,7	26,1	32,1	30,3	30,1	19,9	27,1	28,7	31,5	36,5	34,4	29,4
2007	31,1	23,0	31,3	40,5	35,1	22,2	24,7	25,4	30,6	36,3	33,8	24,2
2008	24,1	25,7	42,6	30,6	40,6	37,0	31,4	34,6	27,5	39,2	37,9	31,4
2009	41,8	38,2	41,8	38,2	30,9	28,6	19,2	21,2	20,7	24,0	30,4	32,0
2010	28,3	30,9	30,5	29,2	31,1	31,5	37,3	29,1	41,8	29,7	37,8	30,1
2011	22,8	22,5	32,6	42,3	26,5	24,4	21,6	20,4	22,7	30,9	29,8	39,8
2012	31,6	25,5	22,9	35,9	42,7	19,8	17,6	18,4				
2013	35,2	37,3	33,9	26,0	42,5	28,0	19,9	23,6	31,8	36,4	33,1	31,0
2014	30,7	40,3	29,4	20,6	31,5	17,7	14,8	21,7	37,0	35,9	32,0	26,7
2015	27,6	33,0	33,5	39,6	29,8	26,5	26,7	25,7	19,1			
2016	5,4	22,5	27,1	33,7	27,3	16,1	16,4	18,5	43,2	47,4	31,2	41,9

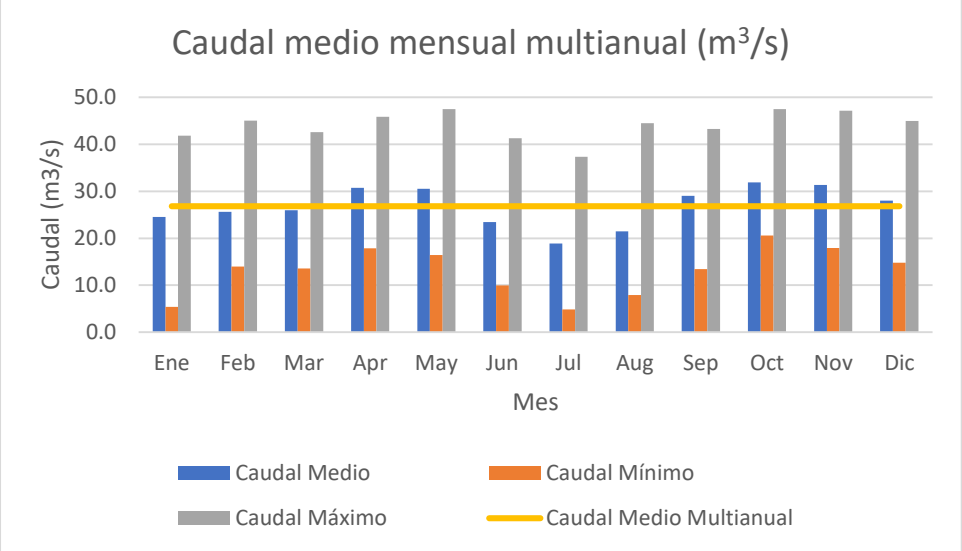


Figura 5-100. Caudal medio mensual multianual de la estación Pailania (1974-2016)

5.1.4.4.2 Análisis de la información de caudal de la estación La Garrucha

La estación La Garrucha presenta un caudal medio de 187,2 m^3/s en el período 1974-2016, lo que genera un rendimiento hídrico de 124 $L/s/km^2$, valor que es un 49% mayor que el rendimiento promedio de Colombia de 63 $L/s/km^2$ y un 72% mayor que el rendimiento hídrico del área hidrográfica del Magdalena – Cauca que tiene un valor de 35 $L/s/km^2$ **Fuente especificada no válida.**, ver Tabla 5-72.

Tabla 5-72. Datos de la estación La Garrucha

Estación	Corriente	Área Cuenca Aportante (km^2)	Período	Caudal (m^3/s)	Caudal específico ($L/s/km^2$)
La Garrucha	Río Samaná Norte	1506,2	1974-2016	187,2	124

La serie de caudales medios mensuales de la estación La Garrucha se presenta en la Tabla 5-73. En la Figura 5-101 que contiene el caudal medio (medio, mínimo y máximo) mensual multianual, se observa la influencia del comportamiento bimodal de la precipitación (ver numeral **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** Precipitación) sobre los caudales. Además, se puede afirmar que la cuenca tiene una buena capacidad de regulación de los caudales bases de los ríos y quebradas, ya que no se presentan grandes variaciones entre los caudales de la temporada seca y la húmeda.

Tabla 5-73. Serie de caudales medios mensuales de la estación La Garrucha (1974-2016)

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
1974	228,1	173,4	136,5	183,3	250,7	273,1	222,6	200,5	231,5	255,6	270,8	161,4
1975	144,8	131,4	151,6	183,0	198,5	168,2	202,4	189,7	234,2	243,8	258,6	211,8
1976	203,3	158,3	199,6	223,0	210,9	144,8	61,7	83,4	92,0	165,7	159,2	98,5
1977	77,8	94,2	85,9	90,9	137,1	121,7	104,9	135,8	125,0	189,6	209,9	170,1
1983	117,9		85,8	189,3	195,4	138,1	127,9	92,5	235,8	205,2	129,0	135,2
1984	170,3	167,4	150,8	164,0	210,8	219,2	207,4	181,7	219,7	300,6	278,6	275,6
1985	149,0	161,2	190,2	232,9	218,3	141,8	109,0	209,5	223,1	202,1	180,9	159,4
1986	176,6	141,0	150,2	221,1	209,1	131,1	86,5	160,3	182,6	209,8	211,2	178,3
1987	144,7	129,1	119,7	132,8	186,7	137,0	176,9	184,2	207,5	231,1	233,5	189,3
1989	245,0	193,3	197,5	241,9	211,8	220,0	133,8	176,6	249,2	335,3	283,6	184,6
1990	144,5	141,3	147,9	228,7	190,2	186,4	157,3	151,5	191,0	245,7	224,3	164,2
1991	253,0	189,7	241,3	223,2	300,7	166,6	91,3	86,2	141,4	185,8	207,0	192,8
1992	120,3	90,9	115,3	116,3	237,6	135,6	67,9	149,5	198,3	173,4	175,5	187,7
1993	172,4	131,5	124,7	151,4	206,6	76,1	101,9	130,6	258,5	280,9		
1995	92,9	91,1	163,9	174,2	203,2	205,8	188,0	198,8	161,3	228,7	229,4	231,7
1996	172,7	158,4	197,6	232,5	274,3	235,1	179,8	174,2	164,8	220,6	190,4	179,0
1997	140,5	195,3	144,8	196,3	145,1	160,8	74,5	56,9	160,9	196,3	207,6	119,0
1998	124,0	151,2	154,1	207,6	197,3	138,5	179,5	164,6	239,1	250,3	259,8	243,9
1999	245,1	262,0	224,7	222,0	226,6	195,8	155,7	148,1	219,3	207,2	232,7	283,1
2002	163,0	205,5	175,7	235,8	180,6	150,5	124,0	113,3	188,1	219,7	191,4	199,8
2004				231,3	271,3	167,1	213,6	175,2	290,2	276,9	310,1	271,6
2005	217,0	173,3	178,1	159,1	208,2	171,3	128,9	95,2	223,1	207,8	244,2	202,1
2006	157,0	122,3	198,4	206,4	190,5	150,0	61,4	120,8	187,3	199,9	211,9	198,1
2007	187,2	62,6	139,2	221,7	250,8	131,3	120,5	148,5	198,8	272,2	259,4	203,5
2008	193,8	175,2	228,1	220,1	233,7	250,4	227,6	260,4	189,8	251,2	298,9	226,6
2009	266,6	243,7	241,1	224,3	196,1	164,7	105,8	171,2	126,5	196,4	231,2	182,6
2010	84,4	100,6	147,9	147,1	183,2	193,1	235,7	162,4	281,8	249,3	337,3	265,1
2011	189,1	180,2	247,2	335,6	219,2	189,9	177,0	190,3	188,1	262,4	270,5	314,6
2012	253,5	187,7	154,9	307,1	307,8	121,3	152,1	159,5		213,8	290,8	208,6
2013	178,3	198,8	192,8	168,9	276,6	179,9	137,4	176,2	204,8	264,1	233,1	229,9
2014	189,6	239,2	198,2	145,0	235,2	119,3	127,0	174,2	247,7	253,4	230,5	188,0
2015	148,1	192,7	159,2	257,2	197,2	142,5	144,0	147,5	145,6	190,9	228,2	97,1
2016	68,4	140,5	128,3	152,5	169,5	104,6	109,2	128,1	256,7	294,4	241,4	284,4

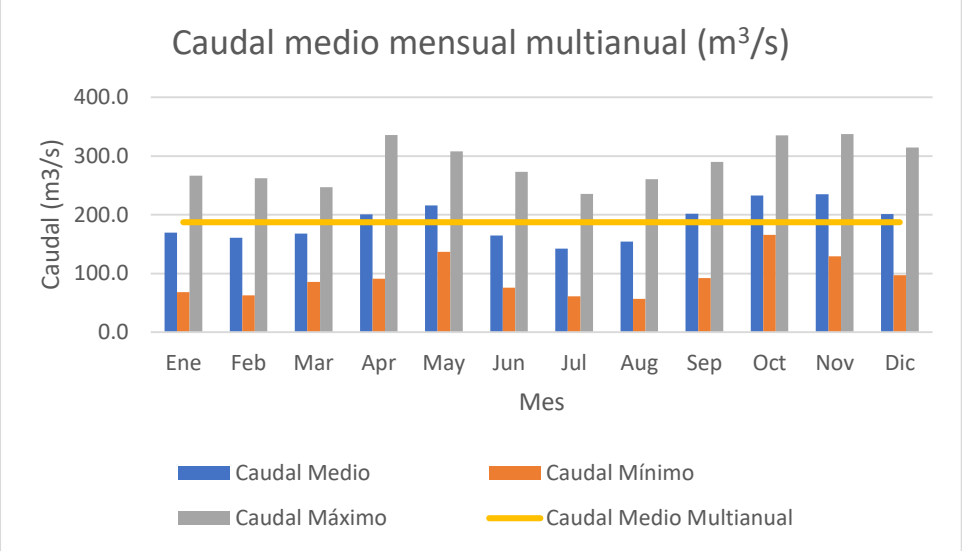


Figura 5-101. Caudal medio mensual multianual de la estación La Garrucha (1974-2016)

5.1.4.4.3 Análisis de saltos en la media

En el análisis de saltos en la media se empleó la prueba T (Handbook of Hydrology, Maidment, 1993). En el que una serie anual de tamaño N, se divide en dos subseries de tamaño N_1 y N_2 ($N_1+N_2=N$). La prueba T se utiliza para evaluar la hipótesis de que ambas subseries tienen la misma media. Rechazar la hipótesis se puede considerar como la detección de un salto en la serie total. El estadístico crítico está dado por:

$$Tc = \frac{|y_2 - y_1|}{S\sqrt{\frac{1}{N_1} + \frac{1}{N_2}}}$$

$$S = \sqrt{\frac{(N_1 - 1)S_1^{\,2} + (N_2 - 1)S_2^{\,2}}{N - 2}}$$

Donde $\bar{y}_2$, $\bar{y}_1$ y S_1^2, S_2^2 son las medias y las varianzas de las respectivas subseries. La hipótesis de igualdad de las medias se rechaza si $Tc>T_{1-\alpha/2,v}$, donde el estadístico con el que se compara el valor crítico es el cuantil $1-\alpha/2$ de la distribución t Student con v = N-2 grados de libertad y α es la significancia de la prueba. En la Tabla 5-74 a la Tabla 5-76 se presentan los resultados de la prueba para las series limnimétricas estudiadas.

Tabla 5-74. Prueba t de estabilidad en la media. Serie de caudales medios anuales. Estación La Garrucha

Estación	Serie 1	Serie 2
Año inicial	1974	1994
Año final	1993	2016
Promedio	176,9	195.5
Desviación Estándar	27,9	22.8
Estadístico crítico	**2,28**	
Significancia	0,05	
Grados de libertad	32,0	
T	**2,04**	
Mensaje	**Se rechaza la hipótesis de igualdad en las medias**	

Tabla 5-75. Prueba t de estabilidad en la media. Serie de caudales medios anuales. Estación Pailania

Estación	Serie 1	Serie 2
Año inicial	1974	1994
Año final	1993	2016
Promedio	25,3	28.0
Desviación Estándar	3,7	3.0
Estadístico crítico	**2,6**	
Significancia	0,1	
Grados de libertad	41,0	
T	**2,0**	
Mensaje	**Se rechaza la hipótesis de igualdad en las medias**	

Teniendo en cuenta que ambas estaciones presentan saltos en la media que pueden indicar errores en la toma de los datos, cambio en las condiciones de ubicación de la estación, entre otros, se recortan las series eliminando los datos más antiguos.

Para la estación La Garrucha se descarta el uso de la serie en el período 1974-1982, eliminando de la nueva serie los saltos en la media. Por el contrario, los datos de la estación Pailania siguen presentando saltos en la media a pesar de que la longitud de la serie se modifique, razón por la cual su uso para la transferencia de caudales se descarta.

Los resultados de la prueba t de estabilidad en la media para la estación La Garrucha con la longitud de la serie modificada se presentan en la Tabla 5-76.

Tabla 5-76. Prueba t de estabilidad en la media. Serie de caudales medios anuales. Estación La Garrucha ajustada (años 1983-2016)

Estación	Serie 1	Serie 2
Año inicial	1983	2000
Año final	1999	2016
Promedio	183.0	198.9
Desviación Estándar	23.2	22.4
Estadístico crítico	**2.04**	
Significancia	0.05	
Grados de libertad	32.0	
T	**2.04**	
Mensaje	**Se acepta la hipótesis de igualdad en las medias**	

5.1.4.5 Balance hídrico de largo plazo

Para estimar el caudal medio de la Cuenca del Río Cocorná hasta el sitio de captación de la PCH Cocorná III por el método de balance hídrico de largo plazo, se siguió la metodología descrita en el Capítulo de Generalidades, sección Metodología/Hidrología. De acuerdo con la metodología mencionada se requieren datos de precipitación y evapotranspiración real de la zona de interés para hallar la escorrentía superficial, para posteriormente calcular la oferta hídrica en la cuenca.

5.1.4.5.1 Distribución espacial de la precipitación

En la Figura 5-102 se presenta el mapa de la distribución espacial de la precipitación, generado a partir de la interpolación, por el método de Spline tipo tensión, de los datos de precipitación media anual multianual de las estaciones mostradas en la Figura 5-32 y Tabla 5-25. El análisis de la calidad estadística de las series de tiempo utilizadas se encuentra en el numeral 5.1.3.1.6 de este mismo capítulo. La precipitación en la Cuenca del Río Cocorná varía desde los 5.221 mm/año en la parte baja de la Cuenca hasta los 2.846 mm/año en la parte alta. En la Cuenca del río Cocorná comprendida hasta la captación del proyecto Cocorná III se obtuvo un valor medio de 3.623 mm/año. Ver Tabla 5-77.

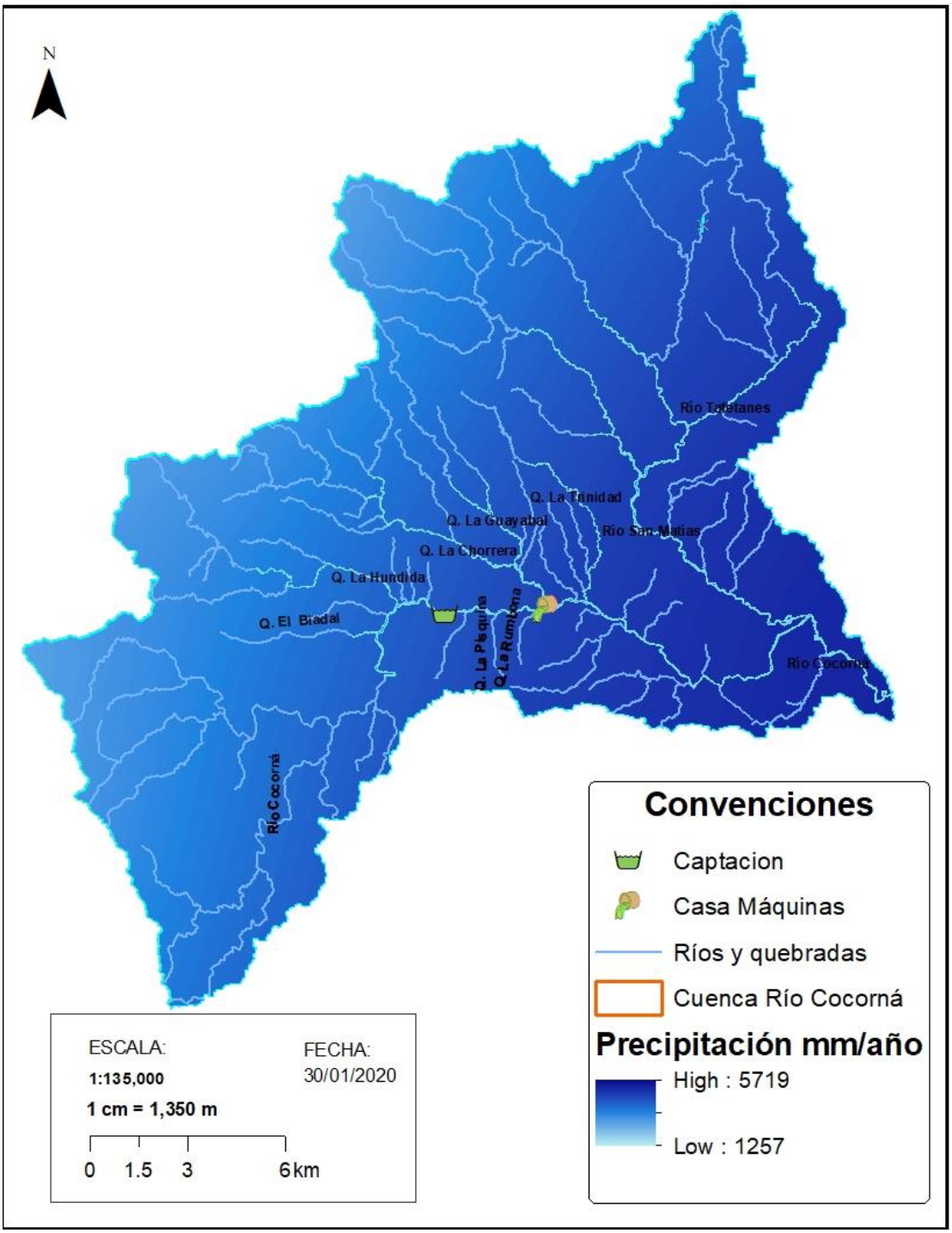


Figura 5-102. Distribución espacial de la precipitación en la Cuenca del Río Cocorná

5.1.4.5.2 Evapotranspiración potencial

Para el cálculo de la evapotranspiración potencial -ETP- se usó el método de Cenicafé, el cual estima la evapotranspiración potencial como función de la elevación sobre el nivel del mar. Su ecuación se determinó con base en la aplicación del método de Penman a la información de estaciones climáticas en Colombia:

$$ETP = 1595{,}05 \cdot e^{-0{,}0002h}$$

Donde h es la elevación en msnm y ETP la evapotranspiración potencial en mm/año.

Los resultados encontrados, ver Figura 5-103, indican que la Cuenca del río Cocorná presenta una evapotranspiración potencial mayor en las zonas más bajas, es decir, en zonas con mayor temperatura y cercanas a cuerpos de agua más caudalosos, y una evapotranspiración más baja en las zonas más altas de la cuenca o zonas con temperaturas menores. El rango de la evapotranspiración varía entre los 903 y 1.376 mm/año con un valor promedio cercano a los 1.076 mm/año. Ver Tabla 5-77.

5.1.4.5.3 Evapotranspiración real

La evapotranspiración real (ETR) de la Cuenca del Río Cocorná se estimó por dos métodos diferentes, el método del Factor Regional y el método de Budyko. Los detalles de cada método se presentan a continuación:

Método del Budyko
El método de Budyko estima la evapotranspiración real mediante la siguiente ecuación:

$$ETR = \left\{ \left[ETP \cdot P \cdot Tanh\left(\frac{P}{ETP} \right) \right] \cdot \left[1 - Cosh\left(\frac{ETP}{P} \right) + Senh\left(\frac{ETP}{P} \right) \right] \right\}^{0.5}$$

Donde, ETR es la evapotranspiración real (mm/año), ETP es la evapotranspiración potencial (mm/año) y P es la precipitación media (mm/año). La evapotranspiración potencial usada en esta ecuación es la estimada por el método de Cenicafé, ver Figura 5-103.

En la Tabla 5-77 se presenta la evapotranspiración real en la Cuenca del Río Cocorná estimada por el método de Budyko. Debido a que este método incluye la evapotranspiración potencial que se estimó en función de la altura, se puede observar que los valores más altos de la ETR se presentan en los sitios con menor elevación, es decir, sitios que tienen una mayor temperatura. Por el contrario, en los sitios más altos de la cuenca, que tienen una menor temperatura, se presentan valores más bajos de la evapotranspiración. En la Cuenca del Río Cocorná el valor medio de la ETR por el método de Budyko es de 1007 mm/año. Ver Figura 5-104.

Método del Factor Regional

El método del Factor Regional requiere datos de precipitación media (P) en la cuenca en mm/año, el equivalente de agua de la radiación neta (Rn = 1.172 mm/año) y el parámetro α que depende de la escala temporal de estimación de la variable. Para relaciones de P/Rn que están en el rango de 0,85-6,37, α vale 1,91. Estos valores son adecuados para cuencas con áreas entre 25 y 5300 km^2.

$$ETR = \frac{P}{\left(1+\left(\frac{P}{Rn}\right)^{\alpha}\right)^{1/\alpha}}$$

En la Figura 5-105 se observa la evapotranspiración real en la cuenca del río Cocorná por el método del Factor Regional. Los valores más altos de ETR se presentan, como es de esperarse, en los sitios donde hay una mayor precipitación, es decir, en la parte baja de la cuenca con valores cercanos a los 1.138 mm/año. Por el contrario, en la parte más alta de la cuenca con temperaturas menores, la evapotranspiración real desciende hasta los 1.073 mm/año aproximadamente. El valor medio de la ETR es de 1.117 mm/año. Ver Tabla 5-77.

Tabla 5-77. Datos del Balance Hídrico de Largo Plazo en las subcuencas de interés

Nombre subcuenca	Área (km^2)	ETP Cenicafe mm/año	ETR_{Budyko} mm/año	ETR_{FR} mm/año	$PCP_{(Spline\ tipo\ tensión)}$ mm/año
Río Cocorná	373,7		1006,6	1117,0	4094,0
Captación	119,3		929,4	1105,2	3623,0
Estación La Garrucha	1506,2		1113,5	1129,1	4716,1
Estación Pailania	189,8		1040,8	1125,9	4446,2
Q. La Chorrera	42,9	1063,0	992,1	1110,7	3804,8
Q. La Trinidad	10,5	1117,0	1049,4	1125,0	4379,9
Q. La Rumbona	1,2	1170,0	1099,4	1129,2	4591,6
Q. La Pisquina	3,0	1151,0	1080,3	1127,0	4465,6
Q. El Biadal	6,1	1028,0	961,6	1111,4	3790,9
Río San Lorenzo	39,3	962,0	897,3	1098,0	3401,0
Q. La Hundida	26,4	1011,0	939,1	1097,6	3388,3
Río San Matías	146,4	1081,0	1015,8	1121,2	4277,7
Q. La Linda	10,1	947,0	888,3	1106,7	3629,8

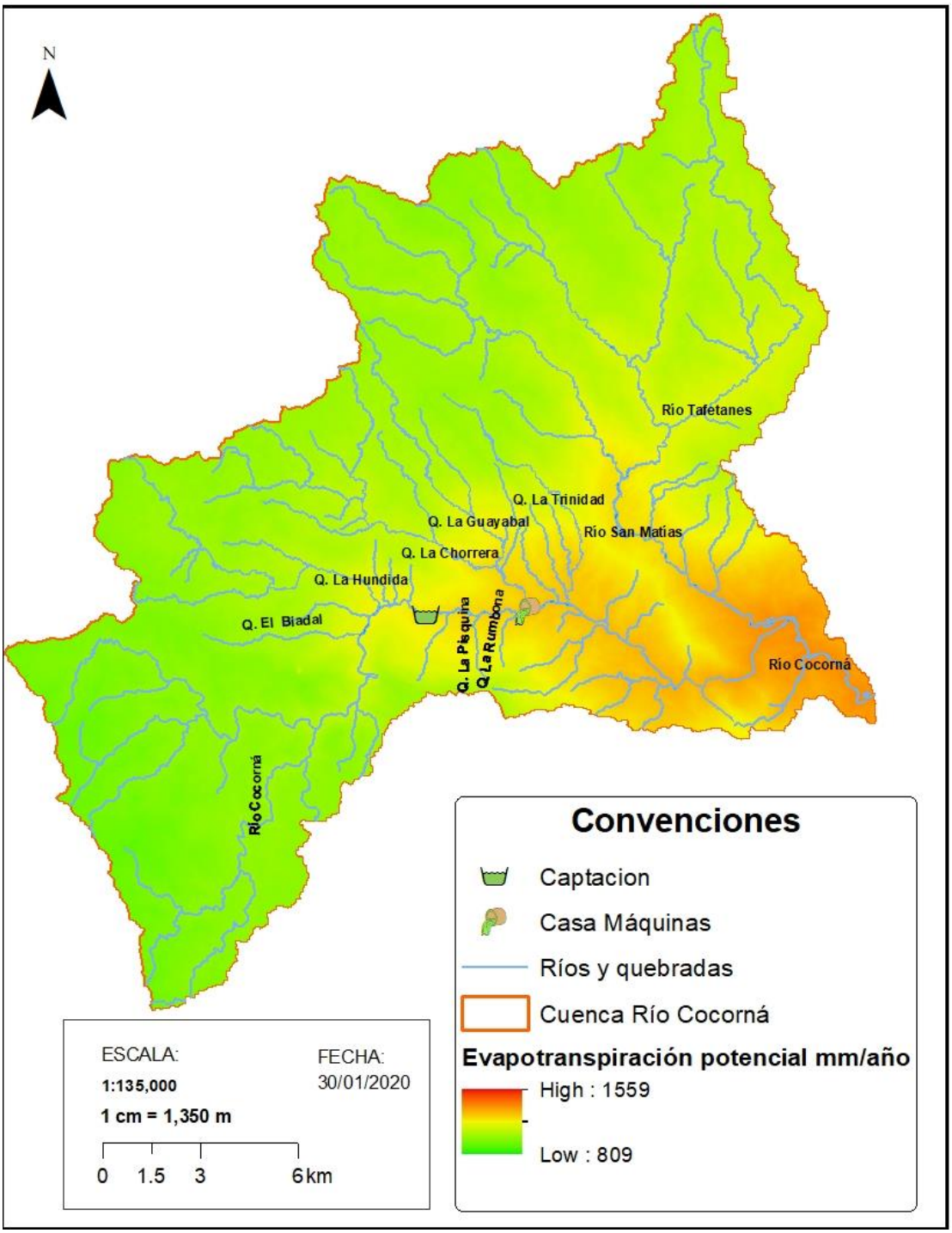


Figura 5-103. Evapotranspiración potencial en la Cuenca del Río Cocorná. Método de Cenicafé

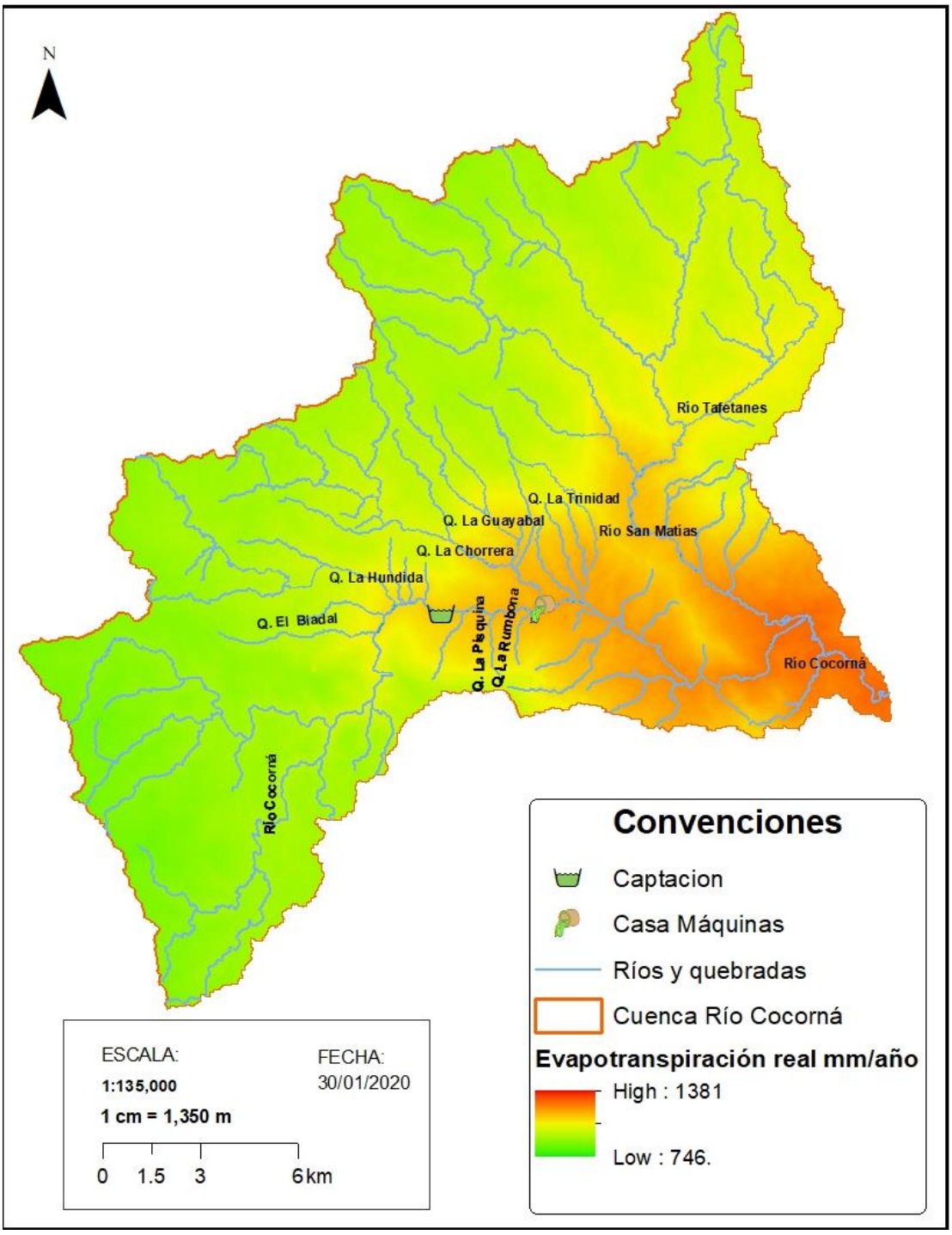


Figura 5-104. Evapotranspiración Real en la Cuenca del Río Cocorná. Método de Budyko

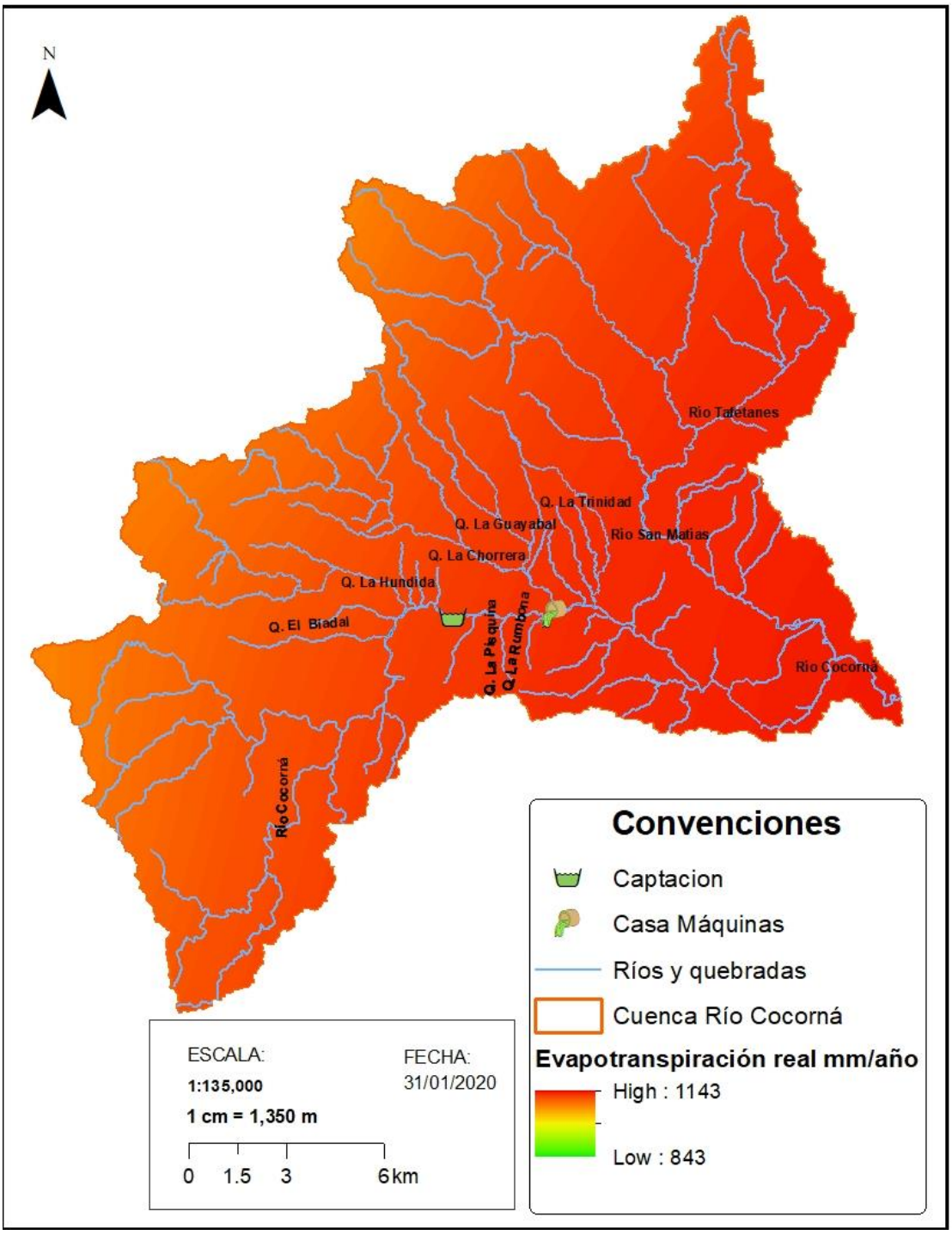


Figura 5-105. Evapotranspiración real en la Cuenca del Río Cocorná. Método del Factor Regional

5.1.4.5.4 Resultados del balance hídrico de largo plazo

A partir de los raster de precipitación y evapotranspiración real mostrados en la Figura 5-102, Figura 5-104 y Figura 5-105 y con la ayuda de sistemas de información geográfica, se calculó el caudal medio de largo plazo en el sitio de ubicación de la captación del proyecto, encontrando un valor que varía entre los 9,5 y 10,2 m^3/s, dependiendo del método usado para calcular la evapotranspiración real. En los puntos donde la conducción interviene algún afluente del río Cocorná y en el sector de ubicación de la casa de máquinas también se evaluó el caudal medio. Así mismo, se calculó el caudal en los sitios donde se encuentran ubicados las estaciones La Garrucha y Pailania, las cuales fueron usadas para realizar la estimación del caudal medio por el método de transferencia de caudales. Ver Tabla 5-78.

Tabla 5-78. Resultados del Balance Hídrico de Largo Plazo

Punto de Interés	Caudal (m^3/s) - ETR de Budyko	Caudal (m^3/s) - ETR de FR	Caudal Promedio (m^3/s)	Caudal Registrado (m^3/s)
Estaciones de referencia				
Estación La Garrucha	**172,06**	**171,32**	**171,69**	**187,20**
Diferencia con el caudal registrado	15,1	15,9	15,5	
%Diferencia	8,08	8,48	8,28	
Estación Pailania	**20,49**	**19,98**	**20,23**	**26,80**
Diferencia con el caudal registrado	6,3	6,8	6,57	
%Diferencia	23,54	25,45	24,50	
Cuencas				
Cuenca del Río Cocorná	36,43	35,00	35,72	
Captación PCH	10,19	9,53	9,86	
Casa de máquinas PCH	11,49	10,81	11,15	
Principales afluentes del río Cocorná				
Q. La Chorrera	3,82	3,66	3,74	
Q. La Trinidad	1,11	1,08	1,09	
Q. La Rumbona	0,14	0,14	0,14	
Q. La Pisquina	0,32	0,32	0,32	
Q. El Viadal	0,55	0,52	0,53	
Río San Lorenzo	3,12	2,87	2,99	
Q. La Hundida	2,05	1,92	1,98	
Río San Matías	15,14	14,65	14,90	
Q. La Linda	0,88	0,81	0,84	
Subcuencas intervenidas por las obras del proyecto				
Q. Sin Nombre 2	0,012	0,012	0,012	
Q. Sin Nombre 3	0,037	0,036	0,036	

Punto de Interés	Caudal (m^3/s) - ETR de Budyko	Caudal (m^3/s) - ETR de FR	Caudal Promedio (m^3/s)	Caudal Registrado (m^3/s)
Q. Sin Nombre 4	0,044	0,044	0,044	
Q. Sin Nombre 5	0,014	0,014	0,014	
Q. Sin Nombre 6	0,030	0,030	0,030	
Q. Sin Nombre 7	0,047	0,048	0,047	

Como se puede observar en la tabla anterior, el caudal estimado por el balance hídrico de largo plazo para las estaciones usadas en la transferencia de caudales, es aproximadamente un 8,3% menor que el caudal medio registrado en la estación La Garrucha y cerca de un 24,5% menor que el caudal medio registrado en la estación Pailania. La diferencia en el método para estimar la evapotranspiración real no generó cambios significativos en los resultados obtenidos.

En la Tabla 5-79 se presenta el rendimiento hídrico calculado en los puntos de interés para el proyecto, según la metodología que se usó para estimar la evapotranspiración real. Los resultados obtenidos con ambas metodologías para las estaciones de transferencia de caudales, se alejan de los resultados obtenidos con las series de caudal del IDEAM en más de un 8% para la estación La Garrucha y más de un 23% para la estación Pailania, siendo en ambos puntos menor el rendimiento hídrico obtenido con el balance hídrico de largo plazo que el calculado con los datos de las series hidrológicas.

Es importante recordar que las variables incluidas en el balance hídrico de largo plazo tienen una alta incertidumbre en su estimación y medición debido a su compleja dinámica espaciotemporal, razón por la cual se pueden presentar diferencias de hasta el 30% con respecto a los valores que se registran en campo. Series de precipitación con una adecuada longitud temporal y distribución espacial en la zona de interés, ayudan a disminuir estas diferencias, así como la adecuada selección del método para estimar la evapotranspiración real.

Por otro lado, el alto rendimiento que presenta la estación Pailania de 141,2 $l/s.km^2$, en comparación con la estación La Garrucha que tiene un rendimiento de 124,3 $l/s.km^2$ y con los datos obtenidos con el balance hídrico en los demás puntos de interés, confirman que esta serie limnigráfica debe ser descartada del estudio. En primer lugar, los datos de la serie presentan saltos en la media que indican posibles errores en los datos y segundo su alto rendimiento hídrico puede significar una sobre-estimación de los caudales medios del río Cocorná lo que implicaría una sobre-estimación de la oferta hídrica disponible para el proyecto.

Tabla 5-79. Rendimiento hídrico (RH) en los puntos de interés para el proyecto, según los resultados obtenidos con el balance hídrico de largo plazo.

Punto de Interés	Área (km^2)	RH - Budyko ($l/s.km^2$)	RH - FR ($l/s.km^2$)	RH - datos registrados en la estación ($l/s.km^2$)
Estación La Garrucha	1506,18	114,24	113,74	124,29
Estación Pailania	189,76	107,98	105,29	141,23
Cuenca del Río Cocorná	373,66	97,50	93,67	
Captación PCH	119,33	85,42	79,84	
Casa de máquinas PCH	131,57	87,3	82,2	
Q. La Chorrera	42,87	89,19	85,43	
Q. La Trinidad	10,47	105,61	103,21	
Q. La Rumbona	1,24	110,74	109,79	
Q. La Pisquina	3,02	107,35	105,87	
Q. El Biadal	6,09	89,72	84,96	
Río San Lorenzo	39,26	79,39	73,03	
Q. La Hundida	26,41	77,66	72,64	
Río San Matías	146,39	103,43	100,09	
Q. La Linda	10,09	86,93	80,01	
Q. Sin Nombre 2	0,12	98,4	97,5	
Q. Sin Nombre 3	0,36	101,4	100,2	
Q. Sin Nombre 4	0,43	102,2	101,6	
Q. Sin Nombre 5	0,14	102,1	102,0	
Q. Sin Nombre 6	0,28	106,3	106,7	
Q. Sin Nombre 7	0,45	105,0	105,6	

RH: rendimiento hídrico. FR: Factor regional

Las cuencas que tienen un rendimiento hídrico mayor a 100 L/(s-km^2), son aquellas que se encuentran o abarcan la parte media y/o baja de la cuenca del río Coconá, zona en la cual se presentan mayores precipitaciones. Por el contrario, las cuencas con rendimientos cercanos o inferiores a los 90 L/(s-km^2), son aquellas que están ubicadas en la parte alta a media-alta de la Cuenca del Río Cocorná, donde las precipitaciones disminuyen en comparación con la parte baja de la cuenca.

5.1.4.6 Transferencia del caudal medio diario de una estación de referencia

Como se explicó en el Capítulo 2 Generalidades, sección Hidrología, las series de caudales medios diarios y mensuales en el sitio de captación del proyecto fueron obtenidos por medio de la transferencia del caudal medio diario de estaciones de referencia ubicadas en la cuenca del Río Samaná Norte (estaciones La Garrucha y Pailania), ver numeral 5.1.4.4 Evaluación de series hidrológicas de este mismo capítulo. Sin embargo, luego de evaluar ambas series se descartó el uso de los datos de la estación Pailania debido a que presentaba saltos en la media y a que su uso

arrojaba caudales mucho mayores que los encontrados con la estación La Garrucha y por tanto dichos caudales podrían estar sobre-estimados.

Para la transferencia se consideraron dos métodos diferentes. En el primero se tuvo en cuenta una relación de áreas y precipitaciones medias multianuales, mientras que en el segundo se consideró la variabilidad climática generada por el fenómeno climático El Niño. Los detalles de las metodologías usadas se presentan en el Capítulo 2 de este EIA. Los resultados obtenidos se presentan a continuación:

5.1.4.6.1 Resultados

En la Tabla 5-80, se presentan los valores característicos de las curvas de duración de caudales obtenidos para la captación del proyecto, por medio de la transferencia de las series de caudales diarias de las estaciones La Garrucha, ubicada sobre el río Samaná Norte en la confluencia de este con el río Dormilón. Las características básicas de esta estación se presentaron en la Tabla 5-68.

Tabla 5-80 Valores Característicos de la Curva de duración de Caudales. Estación La Garrucha

% excedencia en el tiempo	Caudal (m^3/s). Método Área y precipitación media multianual	Caudal (m^3/s). Método Área y precipitación media mensual por condición macroclimática
5	21,0	21,5
10	18,6	18,7
20	15,8	15,6
25	14,8	14,6
30	13,9	13,6
35	13,1	12,8
40	12,3	12,1
45	11,7	11,4
50	11,0	10,7
55	10,4	10,1
60	9,7	9,5
65	9,1	8,9
70	8,4	8,2
75	7,6	7,6
80	6,9	6,9
85	6,2	6,2
90	5,4	5,4
95	4,4	4,4
100	1,6	1,5

El caudal medio en la captación del proyecto de acuerdo con el método se presenta en la Tabla 5-81.

Tabla 5-81. Caudal medio en los sitios de interés para el proyecto Cocorná III según el método de transferencia de caudales

Método	Caudal medio multianual (m^3/s)	Rendimiento Hídrico ($l/s\text{-}km^2$)
Captación Cocorná III		
Método Área y precipitación media multianual	11,61	97,3
Método Área y precipitación media mensual por condición macroclimática	11,53	96,6
Casa de máquinas Cocorná III		
Método Área y precipitación media multianual	12,80	97,3
Método Área y precipitación media mensual por condición macroclimática	12,71	96.6
Caudal medio en la estación de referencia		
Estación La Garrucha	190,12	126,2

Como se puede observar en la tabla anterior, el caudal medio en la captación del proyecto obtenido con la transferencia de la serie de caudales diarios de la estación La Garrucha, considerando en el primer método la precipitación media anual multianual y en el segundo la precipitación media mensual multianual, afectada por la condición macroclimática (Niña, Niño y Neutro), no presenta diferencias significativas con valores de 11,6 y 11,5 m^3/s respectivamente y rendimientos hídricos de 97,3 y 96,6 $l/s\text{-}km^2$ correspondientemente. Dichos rendimientos son menores al rendimiento hídrico de la cuenca tributaria de la estación La Garrucha, la cual tiene un valor de 126,2 $l/s\text{-}km^2$ debido a que incluye zonas más bajas que la cuenca del Río Cocorná, que presentan una precipitación media anual multianual más elevada.

Al contrastar los resultados encontrados por medio de la transferencia de caudales y el balance hídrico de largo plazo se tienen resultados que difieren en aproximadamente un 15%, siendo los resultados encontrados con el balance hídrico de largo plazo menores a los estimados con la transferencia de los datos de una serie de referencia. Ver Tabla 5-82.

Al promediar los datos de caudal obtenidos con las metodologías usadas para su estimación, se obtiene un caudal medio en captación y descarga de 10,72 y 11,95 m^3/s respectivamente, lo que arroja un rendimiento hídrico promedio cercano a los 90 $l/s.km^2$.

Para la estimación del caudal de diseño y de la energía y potencia generada por el proyecto se usarán los resultados obtenidos con el método de transferencia de

caudales considerando el área y precipitación por condición macroclimática, ya que se consideran los resultados más representativos de la zona en estudio.

Tabla 5-82. Caudal medio por balance hídrico de largo plazo y transferencia de caudales

Método		Caudal (m3/s) Captación	Caudal (m3/s) Casa de máquinas	Promedio	%Diferencia
Transferencia de caudales	Área y precipitación (m^3/s)	11,61	12,80	11,57	14,78
	Área y precipitación (condición macroclimática) (m^3/s)	11,53	12,71		
Balance hídrico	Caudal (m^3/s) - ETR de Budyko	10,19	11,49	9,86	
	Caudal (m^3/s) - ETR de FR	9,53	10,81		
Caudal promedio (m^3/s)		**10,72**	**11,95**		
Rendimiento hídrico promedio ($l/s.km^2$)		**89,80**	**90,85**		

En la Figura 5-106 y Anexo 5.1.7.2 se presenta la Curva de Duración de Caudales en el sitio de ubicación de la captación del proyecto, obtenida con la transferencia de la serie de caudales de la estación La Garrucha, incluyendo los datos del área y la precipitación media mensual por condición macroclimática.

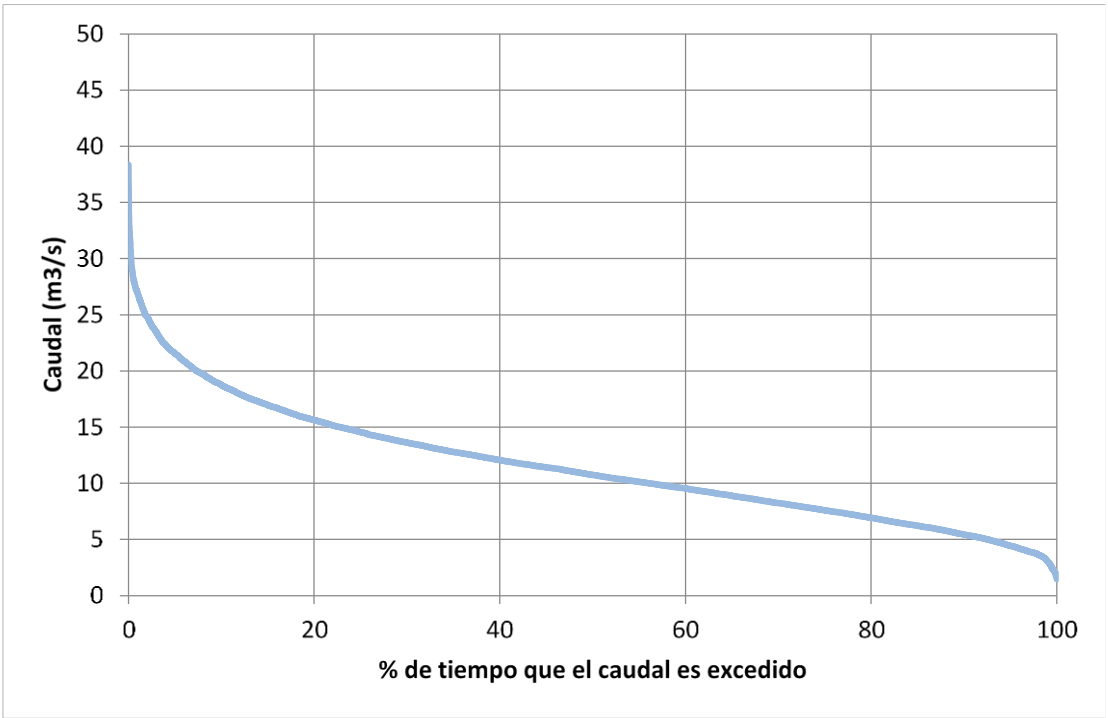


Figura 5-106. Curva de Duración de Caudales en el sitio de captación del proyecto

5.1.4.7 Caudales máximos para diferentes períodos de retorno

Como se explicó en el Capítulo 2 Generalidades, en la sección Metodología, los caudales asociados a diferentes períodos de retorno fueron estimados por medio de la transformación de la lluvia en escorrentía.

Se estimaron los caudales de crecidas para períodos de retorno de 2,33, 5, 10, 25, 50, 100, 200 y 500 años en las cuencas del río Cocorná a la altura del sitio de captación y de la casa de máquinas, por medio del uso del modelo del hidrograma unitario sintético de Snyder, de Clark y del SCS (Soil Conservation Service, EEUU), con el uso del programa HEC HMS 4.0.

Para las subcuencas afluentes del río Cocorná que son afectadas por las obras del proyecto y que tienen áreas menores a 0,5 km^2, se aplicó el método racional probabilístico.

La información de precipitación media diaria de las estaciones Cocorná (código del IDEAM 23080750), Campoalegre (código 23080650) y Mesopotamia (código 26185020) fueron utilizadas en la estimación de las tormentas de diseño, variable de entrada a los modelos lluvia-escorrentía empleados en la estimación de los caudales máximos.

5.1.4.7.1 Análisis morfométrico

Las características físicas de las cuencas hidrográficas influyen, al igual que las variables hidroclimatológicas en el comportamiento de su régimen de escorrentía. La caracterización morfométrica detallada de las cuencas hasta captación y descarga del proyecto (Figura 5-107), realizada con base en el modelo de elevación digital del satélite Alos Palsar I de la Agencia Japonesa de Exploración Aeroespacial, el cual tiene una resolución espacial de 12,5 m, fue presentada en el numeral 5.1.4.2 de este informe. El mapa obtenido del procesamiento corresponde a las direcciones de flujo a partir del cual se delimitan las cuencas de interés y se construyen mapas necesarios para el análisis morfométrico agregado tales como pendientes máximas y área acumulada. En la Tabla 5-83 se presenta un resumen de las variables morfométricas usadas en la estimación de los caudales de crecida.

Tabla 5-83. Parámetros morfométricos de las cuencas de estudio utilizados en el análisis de caudales máximos

Parámetro	Cuenca	
	Captación Cocorná 3	Casa Máquinas Cocorná 3
Área (km^2)	119,3	131,4
Perímetro (km)	64,1	68,9
Cota máxima (msnm)	2829	2829
Cota mínima (msnm)	1364,0	1145,2
Coordenada X al centroide (m)	868229	869339
Coordenada Y al centroide (m)	1157145	1156889
Altura Z al centroide (msnm)	2267,6	2190,9
Longitud cauce principal (km)	19,6	23,2
Longitud de la cuenca (km)	24,4	28,0
Longitud del cauce principal hasta la divisoria de aguas (km)	20,6	24,8
Pendiente media de la cuenca (%)	33,2	34,2
Pendiente del cauce principal (%)	5,9	5,8
Longitud del drenaje que une el centro de gravedad con el punto de cierre (km)	12,6	13,7
Máximo desnivel entre el punto de cierre y la divisoria de aguas (m)	1465	1684
Cota superior del canal principal (msnm)	2372	2372
Número de curva (CN)	78	78

También se analizaron las subcuencas afluentes del río Cocorná en el tramo con caudal reducido, que van a ser intervenidas por las obras del proyecto. En total son 6 subcuencas sin nombre conocido, que tienen áreas menores a los 0,5 km^2. En la Figura 5-108 se observan las unidades hidrológicas de análisis y en la Tabla 5-84 se presentan los parámetros morfométricos principales.

Tabla 5-84. Parámetros morfométricos de las subcuencas intervenidas por las obras del proyecto

Parámetro	Subcuenca					
	Q_SN_2	Q_SN_3	Q_SN_4	Q_SN_5	Q_SN_6	Q_SN_7
Área (km^2)	0,12	0,36	0,43	0,14	0,28	0,45
Perímetro (km)	2,3	3,6	3,3	2,2	2,6	3,3
Cota máxima (msnm)	1668	1882	1748	1542	1502	1495
Cota mínima (msnm)	1329	1306	1284	1276	1219	1188
Coordenada X al centroide (m)	874805	874925	875411	875833	876159	876670
Coordenada Y al centroide (m)	1160776	1160963	1160955	1160753	1160588	1160773
Pendiente media de la cuenca (%)	34,4	39,9	38,0	32,0	33,7	29,7
Máximo desnivel entre el punto de cierre y la divisoria de aguas (m)	339	576	465	266	283	307
Longitud del canal principal hasta la divisoria de aguas (Km)	1.15	1.67	1.47	1.09	1.13	1.48
Orden de Horton	1	1	1	1	1	2
Pendiente promedio del canal principal hasta la divisoria de aguas (%)	31.5	36.0	33.4	27.3	27.3	22.7

Nota: Q_SN: quebrada sin nombre

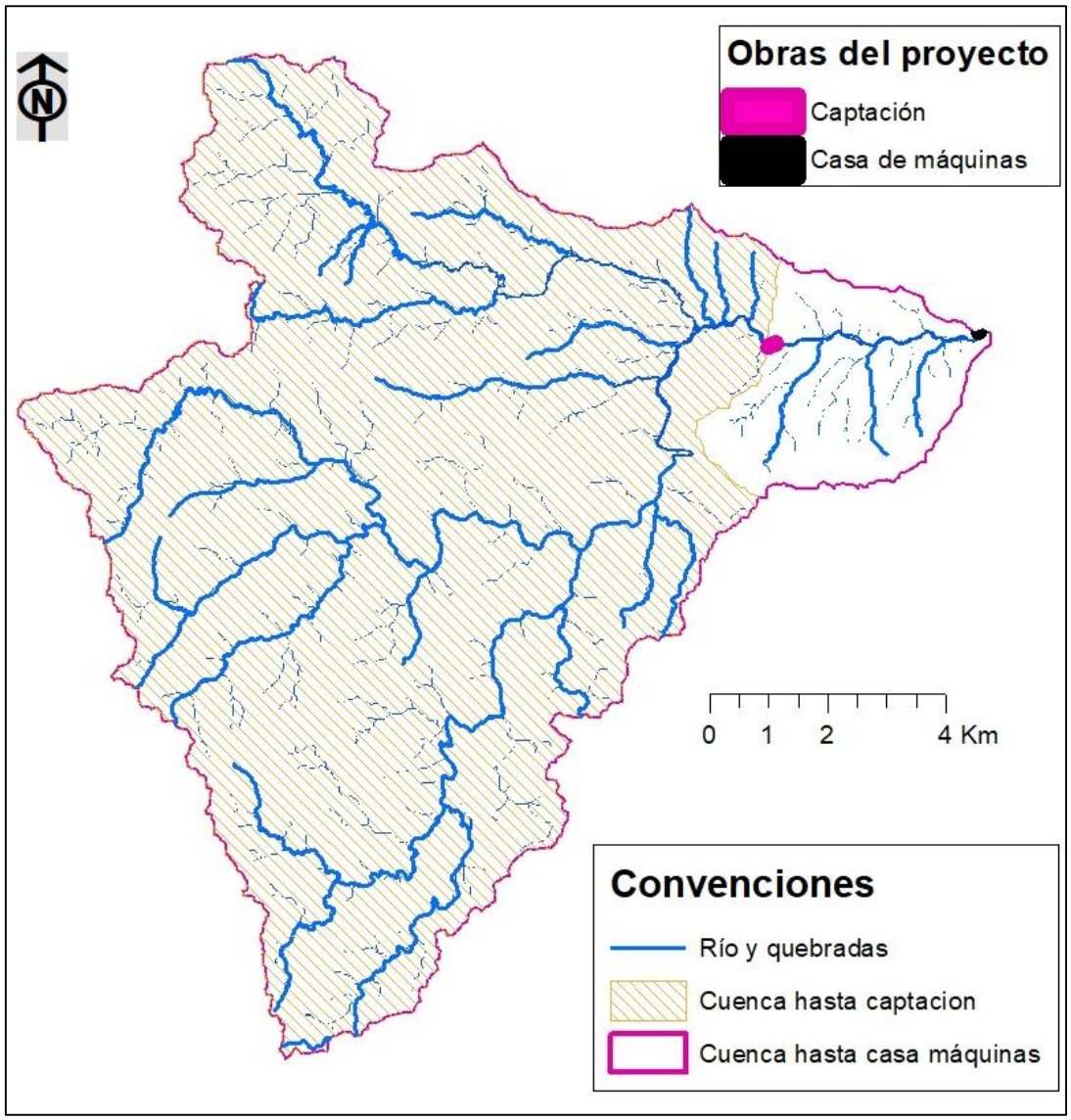


Figura 5-107. Cuencas de captación y casa de máquinas proyecto Cocorná III

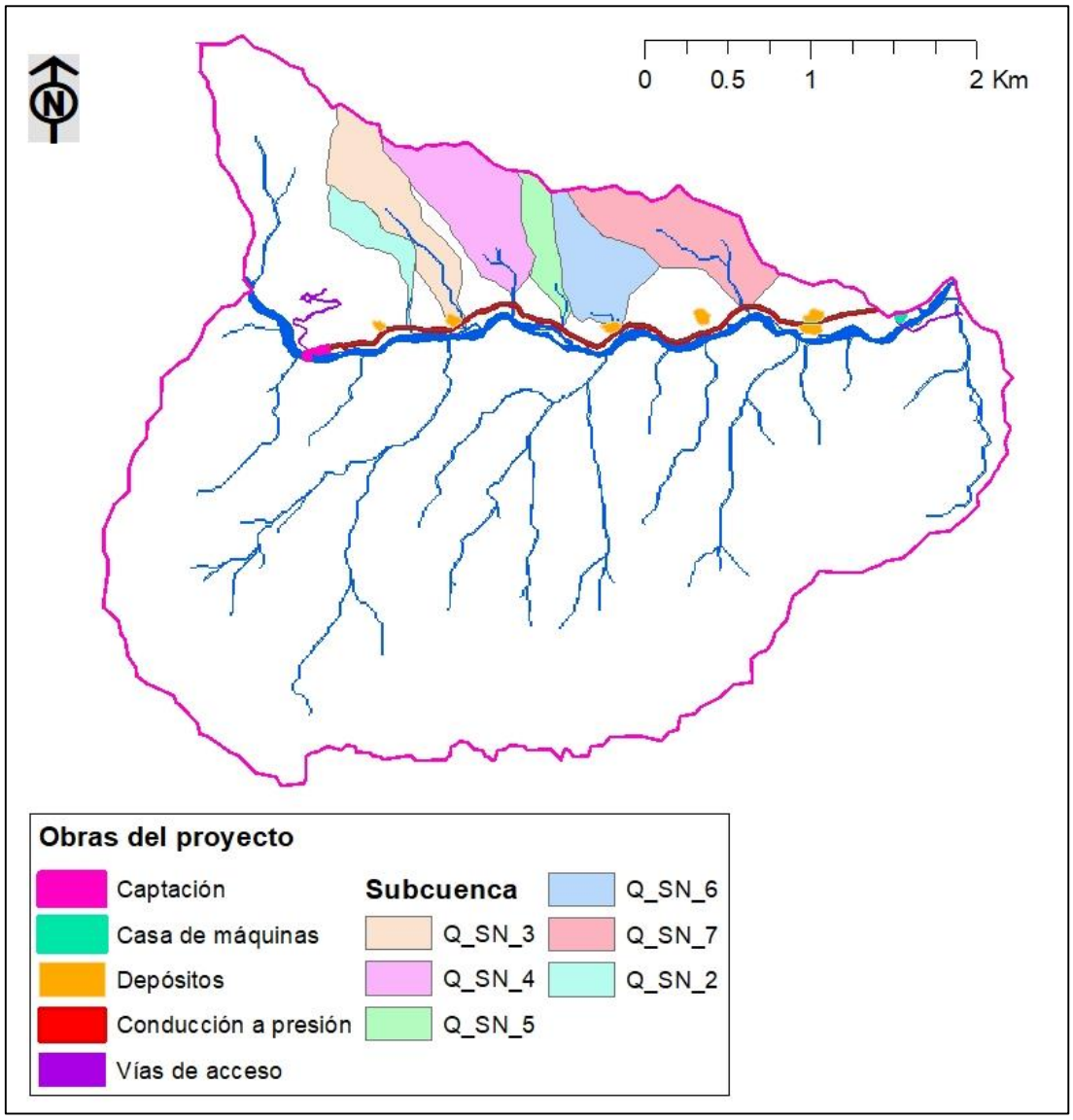


Figura 5-108. Subcuencas intervenidas por las obras del proyecto

5.1.4.7.2 Número de curva

Para determinar el número de curva de cada una de las cuencas analizadas se seleccionó la condición antecedente de humedad intermedia (condición II, para suelos de humedad intermedia) y para el grupo hidrológico de suelo “C”, el cual se define como: “infiltración baja (escorrentía de moderada a alta). Suelos residuales derivados de cualquier tipo de roca, y cuyo grado de meteorización se clasifique como residuales maduros, en los cuales las propiedades y minerales del material parental no son

fácilmente identificables. Esta formación tiene como característica principal que está cubierta por pastos manejados y sus pendientes varían entre un 5 y 15%".

Para determinar el grupo hidrológico y finalmente obtener el número de curva para cada cobertura, se consultaron los mapas de coberturas de la tierra y de las unidades geológicas superficiales del POMCA de la Cuenca del Río Samaná Norte (Cornare et al., 2017) y el mapa de usos del suelo del IGAC (IGAC, 2007b). De dichos mapas se extrajo para las cuencas de interés, las coberturas de la tierra, el uso actual del suelo y las características litológicas del material presente en la cuenca. Esta información se cruzó con el mapa de pendientes del terreno y finalmente se obtuvo que para las cuencas en captación y casa de máquinas predomina el tipo hidrológico de suelo "C" con más de un 96% del área en esta categoría, el porcentaje restante corresponde a suelo tipo "D".

Los números de curva fueron tabulados por el Soil Conservtion Service (1972) con base en el tipo de suelo, el uso de la tierra y la condición antecedente de humedad (Tabla 5.5.2 (Chow, Maidment, & Mays, 1994)). Para una cuenca compuesta de varios tipos de suelos y con diferentes coberturas, se puede calcular un CN compuesto en función del porcentaje del área; como se realizó para el presente estudio. A continuación, se presenta el cálculo del número de curva para cada una de las cuencas de interés, ver Tabla 5-85 y Tabla 5-86.

Tabla 5-85. Número de curva según el tipo de cobertura considerando condición antecedente de humedad II y suelo hidrológico tipo C. Cuenca Captación

Cobertura	Área (km^2)	% Área	CN	Producto CN*Área [%]
Asentamiento Rural	0,046	0,04	90	3,50
Bosques	75,582	63,45	73	4632,14
Cuerpos de aguas naturales	0,514	0,43	98	42,27
Cultivos permanentes	1,619	1,36	88	119,61
Cultivos transitorios	1,564	1,31	88	115,56
Infraestructura	0,087	0,07	94	6,83
Otros usos	0,191	0,16	87	13,97
Pastos	36,555	30,69	86	2639,29
Plantaciones forestales	2,955	2,48	88	218,31
	119,112	**100,00**		
			CN ponderado	**78**

Tabla 5-86. Número de curva según el tipo de cobertura considerando condición antecedente de humedad II y suelo hidrológico tipo C. Cuenca Casa de Máquinas

Uso del suelo	Area (km^2)	% Area	CN	Producto CN*Área [%]
Asentamiento Rural	0,05	0,04	90	3,17

Uso del suelo	Area (km^2)	% Area	CN	Producto CN*Área [%]
Bosques	79,68	60,60	73	4424,03
Cuerpos de aguas naturales	0,67	0,51		
Cultivos permanentes	2,04	1,55	88	136,69
Cultivos transitorios	1,69	1,29	88	113,18
Infraestructura	0,16	0,12	94	11,21
Otros usos	0,27	0,20	87	17,77
Pastos	43,97	33,44	86	2875,67
Plantaciones forestales	2,95	2,25	88	197,77
	131,48	**100,00**		
			CN Ponderado	**78**

Como se puede ver en las tablas anteriores, la principal cobertura con más de un 60% del área son bosques, seguido de los pastos con cerca del 30%. En la Figura 5-109 se presenta el mapa de las coberturas en la Cuenca del Río Cocorná hasta la casa de máquinas del proyecto.

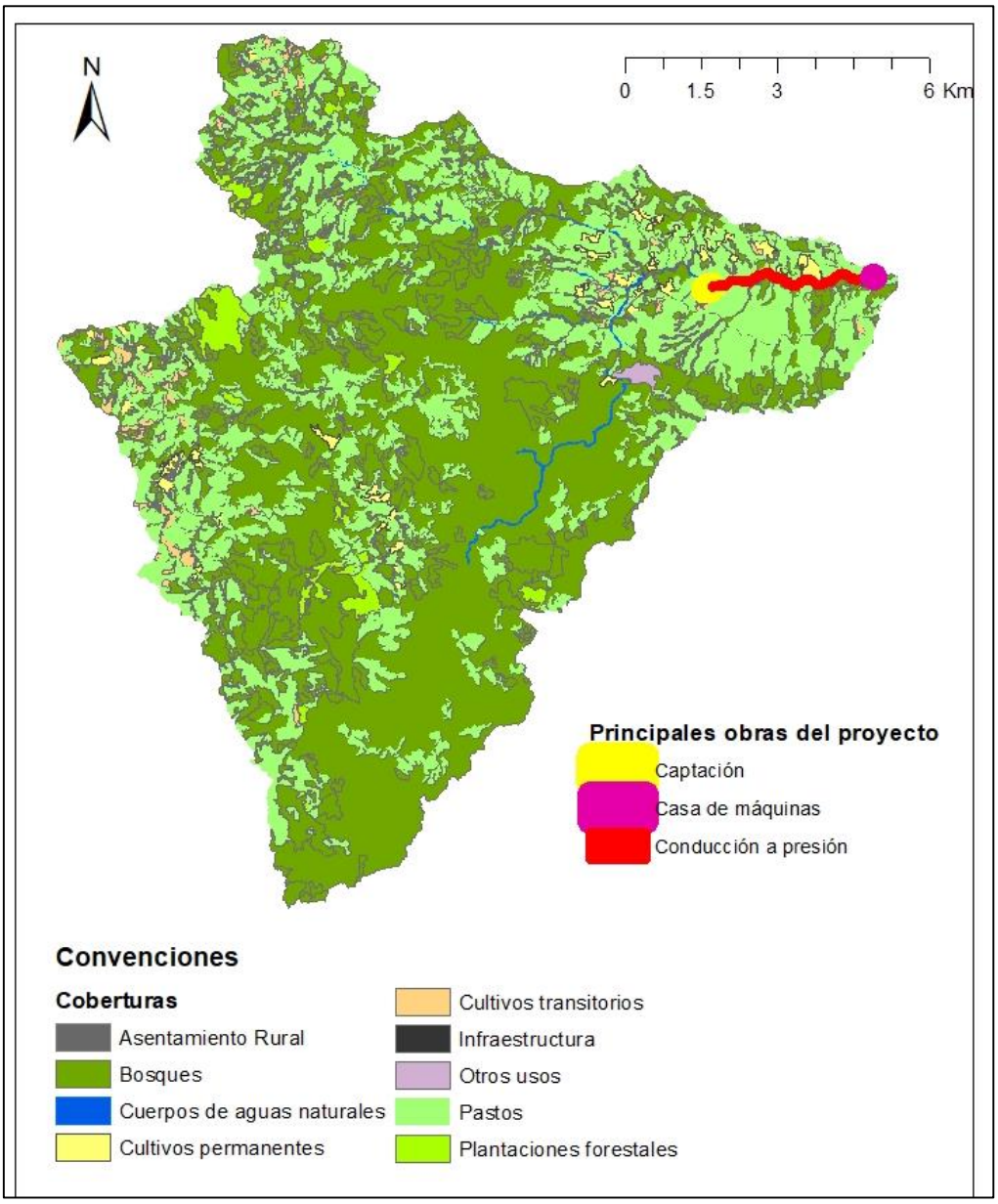


Figura 5-109. Mapa de coberturas de las cuencas de interés

Fuente: (Cornare et al., 2017).

Para las subcuencas intervenidas por las obras del proyecto y que fueron presentadas en la Figura 5-108, en número de curva es el mostrado en las siguientes tablas:

Tabla 5-87. Número de curva según el tipo de cobertura considerando condición antecedente de humedad II y suelo hidrológico tipo C. Subcuenca Q. sin nombre 2

Subcuenca Q. Sin nombre 2				
Cobertura	Área (ha)	%Área	CN*	CN* x %Área
Bosques	1.189	10%	73.00	7.38
Cultivos permanentes	2.569	22%	88.00	19.22
Infraestructura	0.178	1.5%	98.00	1.48
Pastos	7.824	67%	86.00	57.22
Total	**11.76**	**100%**		**85.30**

*Tomado de la Tabla 5.5.2 Chow et al. (1994)

Tabla 5-88. Número de curva según el tipo de cobertura considerando condición antecedente de humedad II y suelo hidrológico tipo C. Subcuenca Q. sin nombre 3

Subcuenca Q. Sin nombre 3				
Cobertura	Área (ha)	%Área	CN*	CN x %Área
Bosques	8.111	23%	73.00	16.46
Cultivos permanentes	4.677	13%	88.00	11.44
Infraestructura	0.469	1.3%	98.00	1.28
Pastos	22.723	63%	86.00	54.31
Total	**35.98**	**100%**		**83.49**

*Tomado de la Tabla 5.5.2 Chow et al. (1994)

Tabla 5-89. Número de curva según el tipo de cobertura considerando condición antecedente de humedad II y suelo hidrológico tipo C. Subcuenca Q. sin nombre 4

Subcuenca Q. Sin nombre 4				
Cobertura	Área (ha)	%Área	CN*	CN x %Área
Bosques	9.884	23%	73.00	16.84
Cultivos permanentes	7.946	19%	88.00	16.32
Cultivos transitorios	3.449	8%	88.00	7.08
Infraestructura	0.491	1.1%	98.00	1.12
Pastos	21.078	49%	86.00	42.31
Total	**42.85**	**100%**		**83.67**

*Tomado de la Tabla 5.5.2 Chow et al. (1994)

Tabla 5-90. Número de curva según el tipo de cobertura considerando condición antecedente de humedad II y suelo hidrológico tipo C. Subcuenca Q. sin nombre 5

Subcuenca Q. Sin nombre 5				
Cobertura	Área (ha)	%Área	CN*	CN x %Área
Bosques	4.386	32%	73.00	23.35
Cultivos permanentes	1.554	11%	88.00	9.97
Infraestructura	0.148	1.1%	98.00	1.06
Pastos	7.623	56%	86.00	47.81
Total	**13.71**	**100%**		**82.20**

*Tomado de la Tabla 5.5.2 Chow et al. (1994)

Tabla 5-91. Número de curva según el tipo de cobertura considerando condición antecedente de humedad II y suelo hidrológico tipo C. Subcuenca Q. sin nombre 6

Subcuenca Q. Sin nombre 6				
Cobertura	Área (ha)	%Área	CN*	CN x %Área
Bosques	5.741	20%	73.00	14.86
Cultivos permanentes	7.146	25%	88.00	22.30
Infraestructura	0.094	0.3%	98.00	0.33
Pastos	15.218	54%	86.00	46.41
Total	**28.20**	**100%**		**83.90**

*Tomado de la Tabla 5.5.2 Chow et al. (1994)

Tabla 5-92. Número de curva según el tipo de cobertura considerando condición antecedente de humedad II y suelo hidrológico tipo C. Subcuenca Q. sin nombre 7

Subcuenca Q. Sin nombre 7				
Cobertura	Área (ha)	%Área	CN*	CN x %Área
Bosques	11.973	27%	73.00	19.61
Cultivos permanentes	0.211	0%	88.00	0.42
Cultivos transitorios	1.874	4%	88.00	3.70
Infraestructura	0.086	0.2%	98.00	0.19
Pastos	30.432	68%	86.00	58.71
Total	**44.58**	**100%**		**82.63**

*Tomado de la Tabla 5.5.2 Chow et al. (1994)

Como pudo observarse en las tablas anteriores, la cobertura que predomina dentro de las 6 subcuencas es de pastos, superando en su mayoría el 50% del área respecto al área de la subcuenca. Y, la cobertura de menor influencia es la de infraestructura, que en ningún caso supera el 2% del área de la subcuenca.

5.1.4.7.3 Tiempos de concentración (duración de la precipitación)

La duración de las tormentas de diseño se toma igual al tiempo de concentración, ya que para esta duración, la totalidad de la cuenca aporta a la escorrentía. En la estimación del tiempo de concentración se emplearon las expresiones empíricas de Témez, Kirpich, Giandiotti, California Culverts Practice, SCS – Ramser, Johnstone – Cross, Bransby – Williams y Passini. En el capítulo 2, Generalidades, sección Metodología se presentan las ecuaciones utilizadas para estimar la duración de la tormenta de diseño.

El tiempo de concentración escogido para la cuenca de interés correspondió a la media de los valores encontrados con las diferentes ecuaciones que estaban dentro de las bandas de confianza, definidas como más o menos una desviación estándar alrededor de la media de todas las estimaciones ($\mu \pm \sigma$). Para este estudio se usaron 8 expresiones empíricas.

En la Tabla 5-93 a la Tabla 5-97 se presentan los tiempos de concentración obtenidos con cada ecuación y los estadísticos básicos calculados para seleccionar el tiempo de concentración a utilizar en la estimación de la tormenta de diseño.

Tabla 5-93. Tiempos de concentración por diferentes métodos para las cuencas en captación y casa de máquinas

Método	Captación		Casa de máquinas	
	Horas	Minutos	Horas	Minutos
TÉMEZ (1978)	2,008	120,5	2,328	139,7
KIRPICH (1990)	1,876	112,5	2,203	132,2
CALIFORNIA CULVERTS PRACTICE (1942)	1,884	113,1	2,213	132,8
GIANDIOTTI (1990)	2,436	146,2	2,530	151,8
SCS - RAMSER (1958)	1,883	113,0	2,212	132,7
JOHNSTONE - CROSS	4,062	243,7	4,509	270,5
BRANSBY - WILLIAMS	5,307	318,4	6,387	383,2
PASSINI	5,465	327,9	6,144	368,6

Tabla 5-94. Análisis estadístico de los resultados obtenidos del tiempo de concentración en las cuencas en captación y casa de máquinas

Parámetro estadístico	Captación	Casa de máquinas
Promedio (μ) (min)	186,9	213,9
Desviación Estándar (σ) (min)	94,82	110,23

Parámetro estadístico	Captación	Casa de máquinas
Coeficiente de Variación (CV)	0,51	0,52
Límite inferior (min)	92,09	103,71
Límite superior (min)	281,73	324,16
Promedio (límite inf-limite sup) (min)	141,5	159,9
Desviación estándar promedio final (min)	51,7	54,7
Coeficiente de Variación (CV) final	0,4	0,3
No. Métodos usados para hallar Desv.Stan. Final	6	6
Error estandar (SE)	21,11	22,33
Tiempo de concentración final (min)	**141,5**	**159,5**

Tabla 5-95. Tiempos de concentración por diferentes métodos para las subcuencas intervenidas por las obras del proyecto

Método	Q, sin nombre 2		Q, sin nombre 3		Q, sin nombre 4	
	Horas	Minutos	Horas	Minutos	Horas	Minutos
TÉMEZ (1978)	0,175	10,5	0,225	13,5	0,207	12,4
KIRPICH (1990)	0,115	6,9	0,145	8,7	0,135	8,1
CALIFORNIA CULVERTS PRACTICE (1942)	0,115	6,9	0,146	8,8	0,136	8,2
GIANDIOTTI (1990)	0,203	12,2	0,250	15,0	0,272	16,3
SCS - RAMSER (1958)	0,115	6,9	0,146	8,8	0,136	8,1
JOHNSTONE - CROSS	0,662	39,7	0,772	46,3	0,736	44,2
BRANSBY - WILLIAMS	0,440	26,4	0,557	33,4	0,487	29,2
PASSINI	0,099	5,9	0,152	9,1	0,160	9,6
Método	**Q, sin nombre 5**		**Q, sin nombre 6**		**Q, sin nombre 7**	
	Horas	**Minutos**	**Horas**	**Minutos**	**Horas**	**Minutos**
TÉMEZ (1978)	0,172	10,3	0,177	10,6	0,224	13,4
KIRPICH (1990)	0,116	7,0	0,120	7,2	0,158	9,5
CALIFORNIA CULVERTS PRACTICE (1942)	0,116	7,0	0,120	7,2	0,159	9,5
GIANDIOTTI (1990)	0,226	13,5	0,273	16,4	0,334	20,0
SCS - RAMSER (1958)	0,116	7,0	0,120	7,2	0,158	9,5
JOHNSTONE - CROSS	0,666	40,0	0,680	40,8	0,814	48,8
BRANSBY - WILLIAMS	0,421	25,2	0,407	24,4	0,528	31,7
PASSINI	0,109	6,6	0,142	8,5	0,197	11,8

Tabla 5-96. . Análisis estadístico de los resultados obtenidos del tiempo de concentración para las subcuencas intervenidas por el proyecto

Parámetro estadístico	Q, sin nombre 2	Q, sin nombre 3	Q, sin nombre 4	Q, sin nombre 5	Q, sin nombre 6	Q, sin nombre 7
Promedio (μ) (min)	14,4	17,9	17,0	14,6	15,3	19,3
Desviación Estándar (σ) (min)	12,2	14,2	13,1	12,0	11,9	14,2
Coeficiente de Variación (CV)	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,7
Límite inferior (min)	2,2	3,8	3,9	2,5	3,3	5,1
Límite superior (min)	26,6	32,1	30,1	26,6	27,2	33,5
Promedio (límite inf-limite sup)(minutos)	10,8	10,6	13,1	10,9	11,6	15,1
Desvición estandar promedio final (min)	7,2	2,8	7,7	6,8	6,5	8,2
Coeficiente de Variación final (CV)	0,7	0,3	0,6	0,6	0,6	0,5
No, Métodos usados para hallar Desv,Stan, Final	7	6	7	7	7	7
Error estandar (SE)	2,7	1,2	2,9	2,6	2,5	3,1
Tiempo de concentración final (min)	**10,8**	**10,6**	**13,1**	**10,9**	**11,6**	**15,1**

En Figura 5-110 y Figura 5-111 se presenta el análisis gráfico por unidad hidrológica. El promedio de las metodologías entre las bandas corresponde a la duración de la tormenta de diseño. El tiempo de concentración estimado en la captación es de 141 min y en la casa de máquinas 160 min.

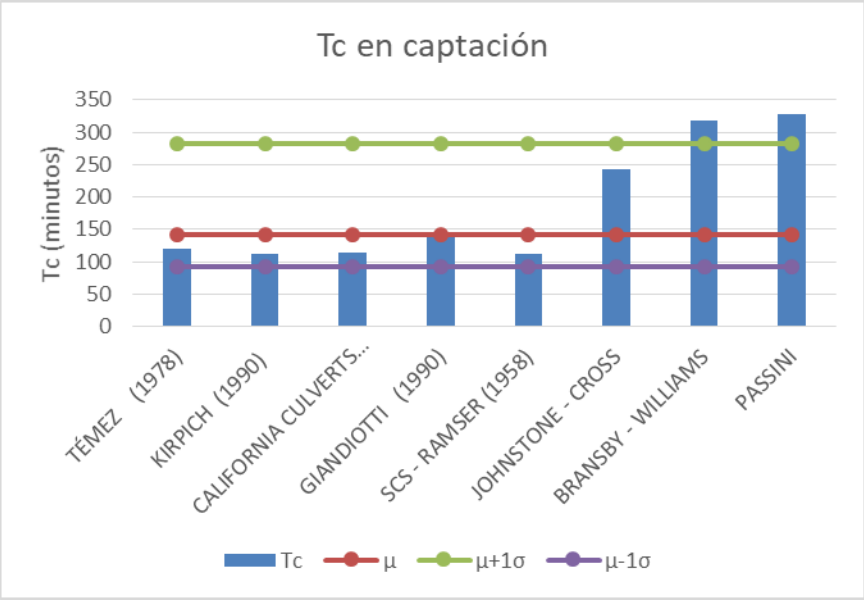


Figura 5-110. Tiempo de concentración en captación por diferentes métodos

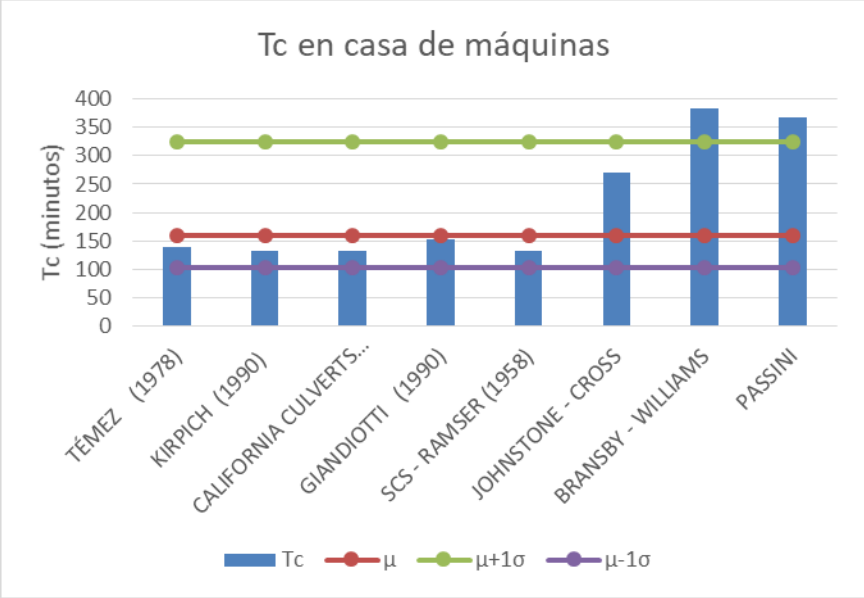


Figura 5-111. Tiempo de concentración en casa de máquinas por diferentes métodos

En la Figura 5-112 a la Figura 5-117 se presenta el análisis gráfico por unidad hidrológica para las subcuencas del tramo con caudal reducido que son afectadas por las obras del proyecto, mostrando también las bandas de confianza del límite superior (verde) y límite inferior (morado). El promedio de las metodologías entre las bandas de confianza (μ ± σ) corresponde a la duración de la tormenta de diseño.

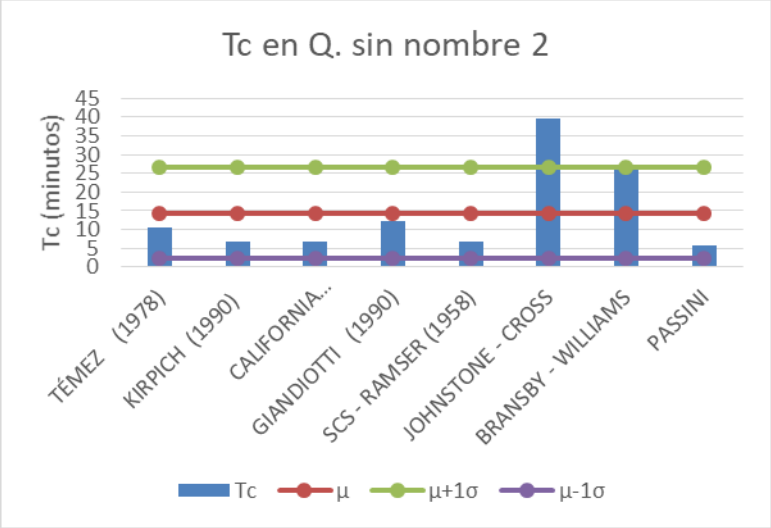


Figura 5-112. Tiempo de concentración para Subcuenca Q. Sin nombre 2 según diferentes autores

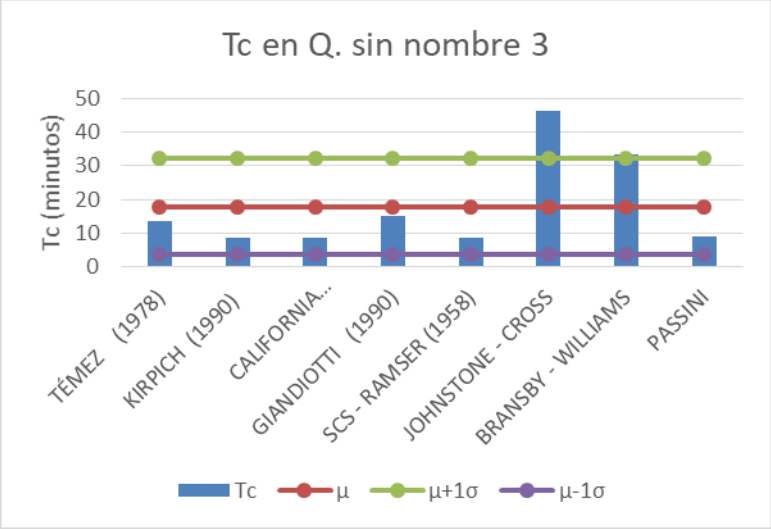


Figura 5-113. Tiempo de concentración para Subcuenca Q. Sin nombre 3 según diferentes autores

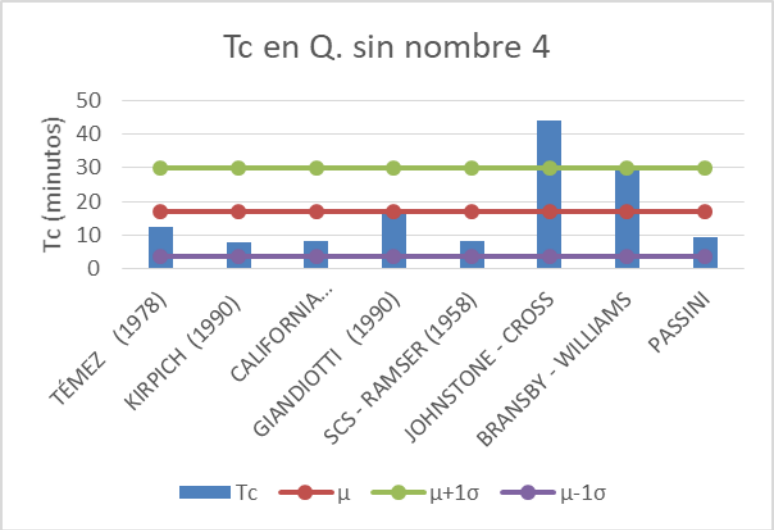


Figura 5-114. Tiempo de concentración para Subcuenca Q. Sin nombre 4 según diferentes autores

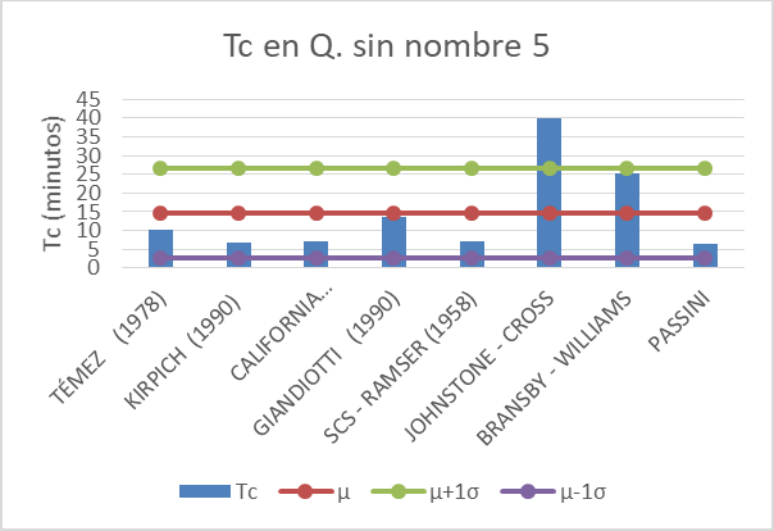


Figura 5-115. Tiempo de concentración para Subcuenca Q. Sin nombre 5 según diferentes autores

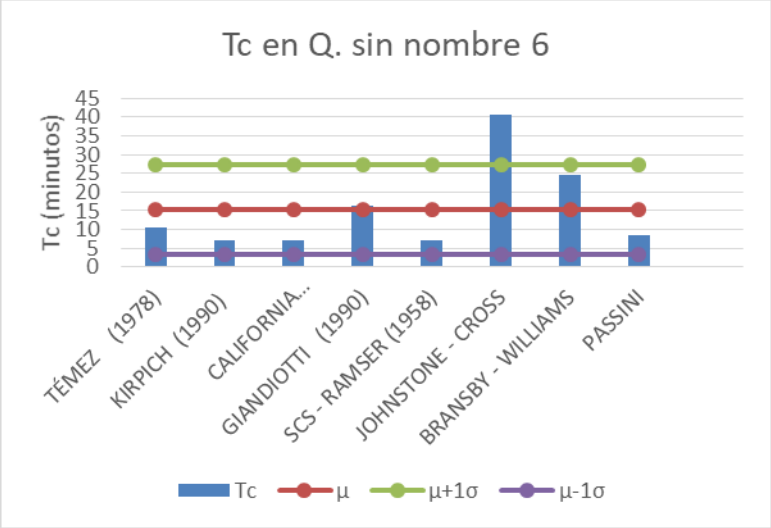


Figura 5-116. Tiempo de concentración para Subcuenca Q. Sin nombre 6 según diferentes autores

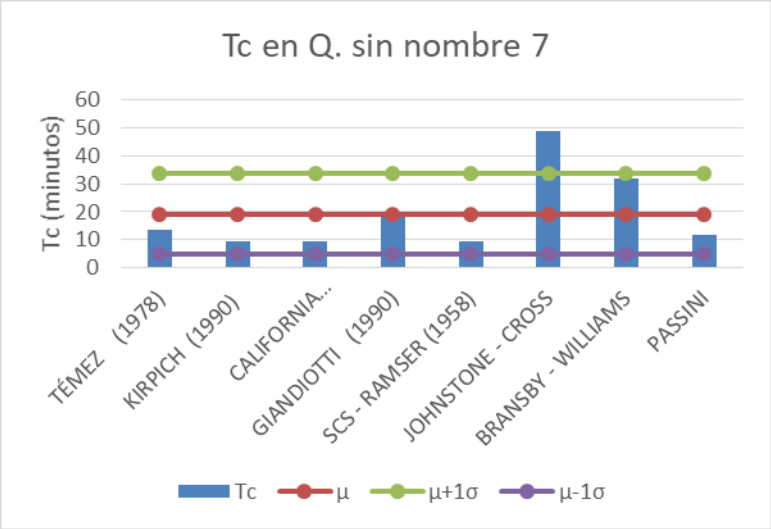


Figura 5-117. Tiempo de concentración para Subcuenca Q. Sin nombre 7 según diferentes autores

A continuación, se muestra gráficamente en la Figura 5-118 el tiempo de concentración final obtenido en la Tabla 5-95. Este tiempo es entonces, el promedio de las expresiones o métodos contenidos dentro del límite de confianza.

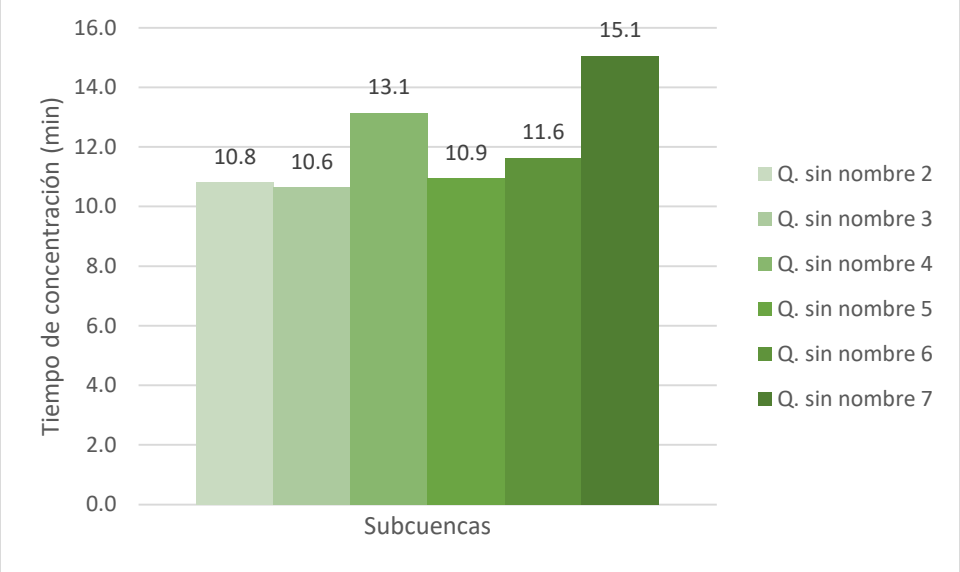


Figura 5-118. Tiempo de concentración final para las subcuencas en estudio

5.1.4.7.4 Intensidad y magnitud de la precipitación

La magnitud de la precipitación se refiere a la lámina de agua total precipitada durante el evento de tormenta analizado, la cual se halla definida por una frecuencia que se asocia también al régimen de escorrentía que produce. Esa magnitud se obtiene como el producto de la intensidad asociada a la duración de la tormenta para un periodo de retorno dado y la duración de la tormenta.

La precipitación máxima en 24 horas de las unidades hidrológicas analizadas se obtuvo por medio de la ponderación de los datos de precipitación máxima en 24 horas de las estaciones Cocorná (código del IDEAM 23080750), Campoalegre (código 23080650) y Mesopotamia (código 26185020). Los factores de ponderación o de influencia de las estaciones mencionadas sobre las cuencas de interés, se obtuvieron en función del inverso de la distancia al cuadrado medida en planta sobre la línea recta que conecta el centro de gravedad de cada una de las cuencas con el punto de ubicación de la estación de precipitación (d_i^2); de esta manera, entre más cercana se encuentre la estación a la cuenca de análisis, más influencia tendrá la información de dicha estación sobre la cuenca. Ver Figura 5-119.

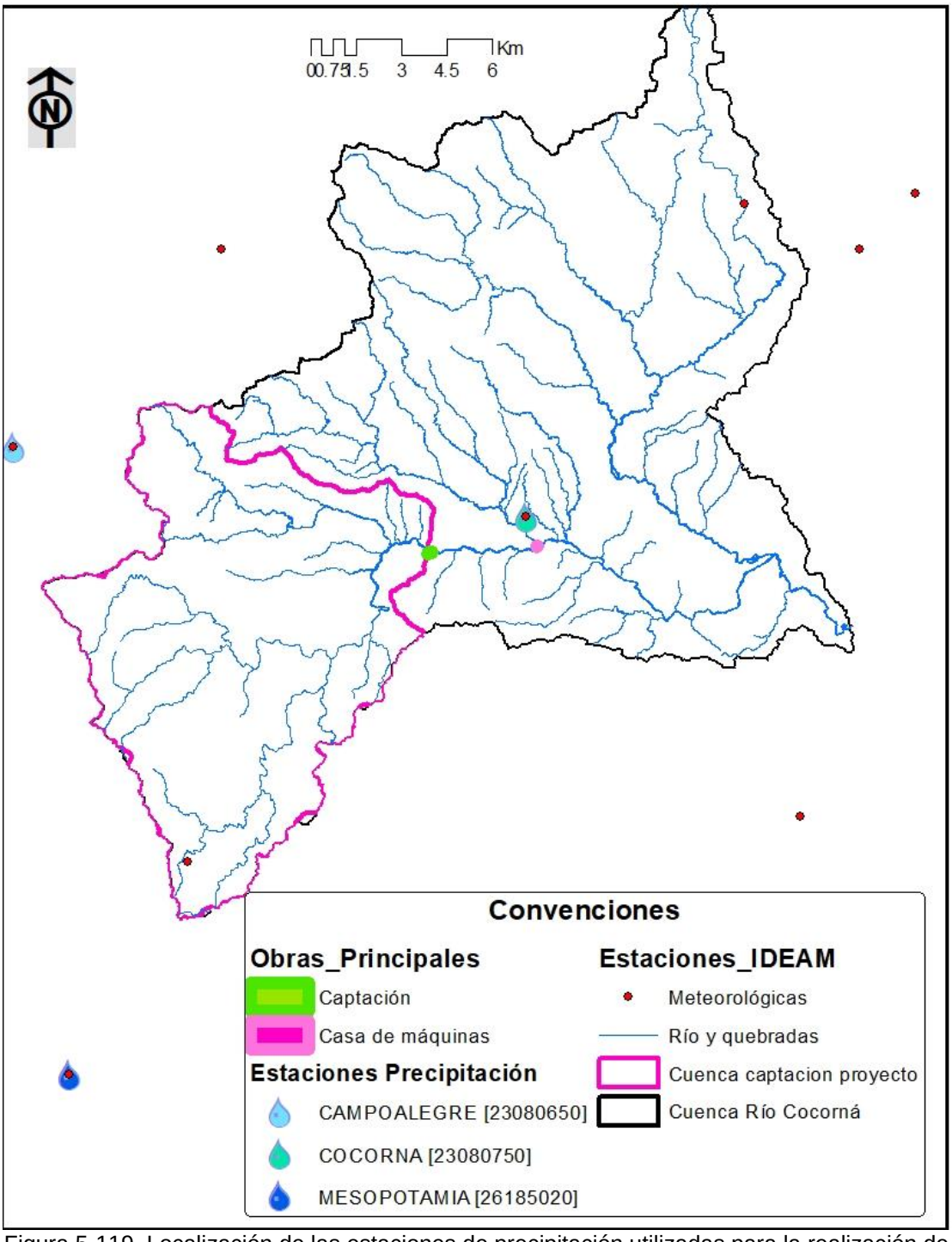


Figura 5-119. Localización de las estaciones de precipitación utilizadas para la realización de las curvas IDF

Los puntos rojos son las estaciones meteorológicas del IDEAM existentes en la zona. Las gotas de colores son las estaciones de precipitación utilizadas para al cálculo de caudales máximos

En el Anexo 5.1.7.1 se presentan las series de precipitación máxima de 24 horas usadas para estimar la serie de precipitación máxima de las cuencas de interés. En la Tabla 5-97 se presentan las series de precipitación máxima en 24 horas de las cuencas hasta captación y casa de máquinas.

Tabla 5-97. Series de precipitación máxima de 24 horas en las cuencas de captación y de casa de máquinas

Año	Captación		Casa Máquinas	
	Precipitación máxima 24h (mm)	Intensidad (mm/h)	Precipitación máxima 24h (mm)	Intensidad (mm/h)
1976	97	4,05	103	4,29
1977	74	3,09	76	3,18
1978	80	3,31	83	3,47
1979	89	3,70	95	3,95
1980	89	3,70	92	3,83
1981	90	3,74	96	3,99
1982	95	3,96	102	4,26
1983	83	3,48	84	3,51
1984	97	4,04	100	4,18
1985	97	4,05	100	4,17
1986	89	3,69	90	3,75
1987	83	3,44	87	3,61
1988	83	3,47	86	3,57
1989	95	3,96	94	3,90
1990	79	3,29	80	3,33
1991	82	3,40	82	3,42
1992	79	3,29	80	3,34
1993	85	3,54	89	3,71
1994	77	3,19	77	3,20
1995	85	3,55	88	3,66
1996	81	3,38	83	3,47
1997	81	3,37	81	3,39
1998	87	3,62	89	3,73
1999	92	3,81	91	3,80
2000	101	4,19	102	4,25
2001	82	3,43	85	3,54
2002	74	3,09	77	3,19
2003	71	2,97	71	2,95
2004	85	3,55	85	3,54
2005	91	3,77	91	3,79

Año	Captación		Casa Máquinas	
	Precipitación máxima 24h (mm)	Intensidad (mm/h)	Precipitación máxima 24h (mm)	Intensidad (mm/h)
2006	77	3,23	78	3,27
2007	70	2,92	71	2,94
2008	83	3,45	84	3,49
2009	87	3,62	84	3,51
2010	84	3,52	85	3,55
2011	80	3,33	81	3,39
2012	86	3,57	88	3,65
2013	85	3,53	87	3,62
2014	85	3,55	86	3,59
2015	79	3,30	82	3,41
2016	94	3,91	95	3,97
2017	70	2,92	71	2,97
Promedio	**84,58**	**3,52**	**86,47**	**3,60**

Los factores de ponderación usados para estimar la precipitación máxima en 24 horas en captación, casa de máquinas y en las subcuencas afectadas por el proyecto se presentan a continuación:

Tabla 5-98. Factores de ponderación para estimar la precipitación máxima en 24 horas. Captación y Casa de máquinas

Cuenca	Coordenada X centroide	Coordenada Y centroide	distancia (m)	Factor (%)
Captación	**868228,9**	**1157145,4**		
Estación Cocorná	877654,4	1161259,9	10284,4	0,40
Estación Campoalegre	860718,5	1163558,1	9875,7	0,43
Estación Mesopotamia	862551,0	1142823,3	15406,6	0,18
			Total	**1,00**
Casa de máquinas	**869338,8**	**1156888,9**		
Estación Cocorná	877654,4	1161259,9	9394,4	0,48
Estación Campoalegre	860718,5	1163558,1	10899,0	0,35
Estación Mesopotamia	862551,0	1142823,3	15617,8	0,17
			Total	**1,00**

Tabla 5-99. Factores de ponderación para estimar la precipitación máxima en 24 horas. Subcuencas afectadas por el proyecto.

Punto	X centroide	Y centroide	Distancia (m)	Factor (%)
Q. Sin nombre 2	**874804,59**	**1160775,58**		
Estación Cocorná	877654,39	1161259,87	2890,661	0,945
Estación Campoalegre	860718,54	1163558,14	14358,249	0,038
Estación Mesopotamia	862550,99	1142823,29	21735,577	0,017
			Total	**1,000**
Q. Sin nombre 3	**874925,31**	**1160962,81**		
Estación Cocorná	877654,39	1161259,87	2745,198	0,951
Estación Campoalegre	860718,54	1163558,14	14441,887	0,034
Estación Mesopotamia	862550,99	1142823,29	21958,279	0,015
			Total	**1,000**
Q. Sin nombre 4	**875411,13**	**1160955,40**		
Estación Cocorná	877654,39	1161259,87	2263,828	0,968
Estación Campoalegre	860718,54	1163558,14	14921,343	0,022
Estación Mesopotamia	862550,99	1142823,29	22229,634	0,010
			Total	**1,000**
Q. Sin nombre 5	**875833,24**	**1160752,72**		
Estación Cocorná	877654,39	1161259,87	1890,450	0,978
Estación Campoalegre	860718,54	1163558,14	15372,849	0,015
Estación Mesopotamia	862550,99	1142823,29	22313,280	0,007
			Total	**1,000**
Q. Sin nombre 6	**876158,72**	**1160587,63**		
Estación Cocorná	877654,39	1161259,87	1639,797	0,984
Estación Campoalegre	860718,54	1163558,14	15723,329	0,011
Estación Mesopotamia	862550,99	1142823,29	22377,268	0,005
			Total	**1,000**
Q. Sin nombre 7	**876670,40**	**1160773,20**		
Estación Cocorná	877654,39	1161259,87	1097,762	0,993
Estación Campoalegre	860718,54	1163558,14	16193,140	0,005
Estación Mesopotamia	862550,99	1142823,29	22837,623	0,002
			Total	**1,000**

Las intensidades de la lluvia se determinaron con base en las curvas intensidad-duración-frecuencia de las unidades hidrológicas, mediante la aplicación de un método indirecto. Con las series de precipitaciones máximas anuales de 24 horas, se aplicó la metodología de Wilches (2001) para la construcción de las curvas de intensidad – duración – frecuencia. Ver Anexo 5.1.7.2, Figura 5-120 y Figura 5-121. En la Tabla 5-100 se presenta la intensidad y la precipitación total para la duración de la tormenta utilizada (141 min en captación y 160 min en descarga).

Tabla 5-100. Intensidad de precipitación para diferentes períodos de retorno. Captación y Casa de máquinas

Período retorno (años)	K_{Tr}	Captación		Casa de máquinas	
		Intensidad (mm/h)	Precipitación (mm)	Intensidad (mm/h)	Precipitación (mm)
2,33	0,18	24,5	57,7	22,6	60,3
5	0,84	25,9	61,2	24,1	64,2
10	1,28	27,0	63,6	25,1	66,9
25	1,75	28,1	66,2	26,2	69,9
50	2,05	28,8	68,0	27,0	72,0
100	2,33	29,5	69,7	27,7	73,9
200	2,58	30,2	71,2	28,4	75,6
500	2,88	31,0	73,1	29,2	77,8

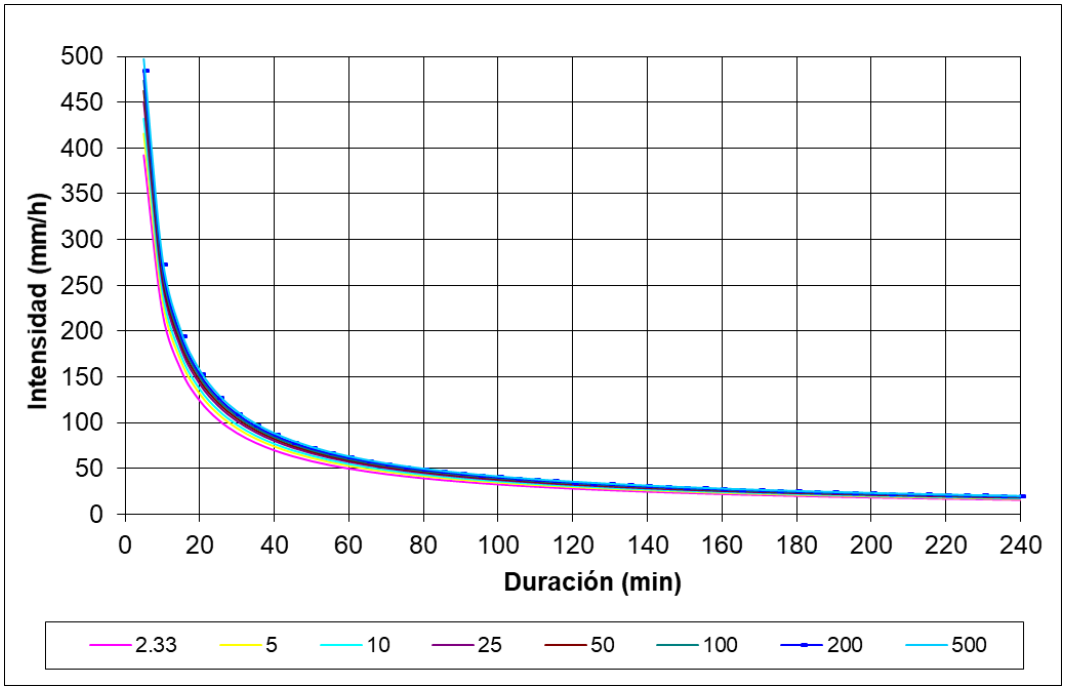


Figura 5-120. Curva Intensidad – Duración – Frecuencia (IDF). Captación Cocorná 3

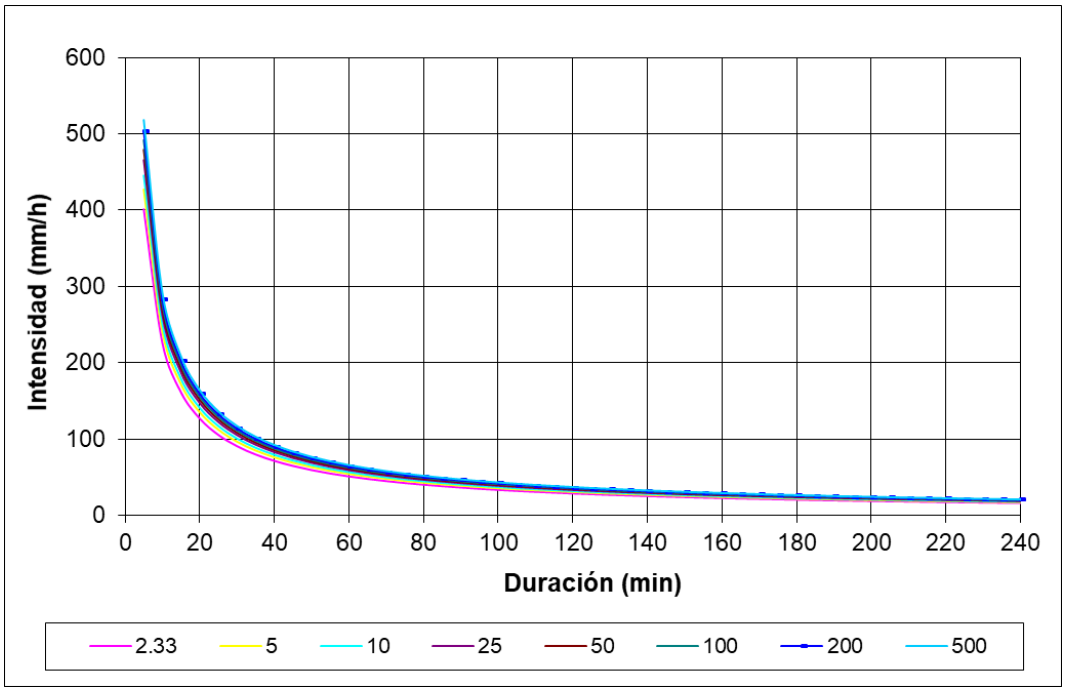


Figura 5-121. Curva Intensidad – Duración – Frecuencia (IDF). Casa de máquinas Cocorná 3

En las subcuencas afectadas por las obras del proyecto, la magnitud de las tormentas de diseño se presenta a continuación:

Tabla 5-101. Intensidad de precipitación para diferentes períodos de retorno. Subcuencas intervenidas por las obras del proyecto

Período de retorno (años)	Q. Sin Nombre 2		Q. Sin Nombre 3		Q. Sin Nombre 4	
	Intensidad (mm/h)	Precipitación (mm)	Intensidad (mm/h)	Precipitación (mm)	Intensidad (mm/h)	Precipitación (mm)
2.33	235,50	42,44	238,89	42,38	201,26	44,08
5	265,92	47,92	269,96	47,89	227,93	49,93
10	288,25	51,95	292,77	51,94	247,55	54,22
25	314,12	56,61	319,21	56,63	270,34	59,22
50	332,05	59,84	337,56	59,88	286,16	62,68
100	349,06	62,90	354,96	62,97	301,18	65,97
200	365,38	65,85	371,66	65,93	315,62	69,14
500	386,19	69,60	392,97	69,71	334,05	73,17
Período de	Q. Sin Nombre 5		Q. Sin Nombre 6		Q. Sin Nombre 7	
	Intensidad (mm/h)	Precipitación (mm)	Intensidad (mm/h)	Precipitación (mm)	Intensidad (mm/h)	Precipitación (mm)

retorno (años)						
2.33	234,95	42,82	223,37	43,333	180,65	45,36
5	266,46	48,57	253,52	49,181	205,28	51,54
10	289,65	52,79	275,73	53,490	223,44	56,10
25	316,62	57,71	301,56	58,501	244,58	61,41
50	335,36	61,12	319,52	61,985	259,29	65,11
100	353,17	64,37	336,59	65,296	273,28	68,62
200	370,29	67,49	353,00	68,481	286,74	72,00
500	392,15	71,48	373,98	72,550	303,94	76,32

5.1.4.7.5 Distribución temporal de la precipitación

La distribución de la lluvia máxima en 24 horas en el tiempo se realizó por medio del método de los bloques alternados para una discretización de 5 minutos para las cuencas Captación y Casa de máquinas. En la Tabla 5-102 y Tabla 5-103 se presentan los hietogramas obtenidos en dichas cuencas para los períodos de retorno analizados.

Tabla 5-102. Hietogramas de diseño para la cuenca en Captación para diferentes periodos de retorno discretizados a 5 minutos.

Instante (min)	P2,33 (mm)	P5 (mm)	P10 (mm)	P25 (mm)	P50 (mm)	P100 (mm)	P200 (mm)	P500 (mm)
5	0,29	0,31	0,32	0,34	0,35	0,36	0,36	0,37
10	0,31	0,33	0,34	0,35	0,36	0,37	0,38	0,39
15	0,33	0,35	0,36	0,37	0,38	0,39	0,40	0,41
20	0,34	0,37	0,38	0,40	0,41	0,42	0,43	0,44
25	0,37	0,39	0,40	0,42	0,43	0,44	0,45	0,46
30	0,39	0,41	0,43	0,45	0,46	0,47	0,48	0,50
35	0,42	0,44	0,46	0,48	0,49	0,51	0,52	0,53
40	0,45	0,48	0,50	0,52	0,53	0,55	0,56	0,57
45	0,49	0,52	0,54	0,57	0,58	0,60	0,61	0,63
50	0,54	0,57	0,60	0,62	0,64	0,66	0,67	0,69
55	0,60	0,64	0,67	0,69	0,71	0,73	0,75	0,77
60	0,68	0,72	0,75	0,78	0,81	0,83	0,84	0,87
65	0,79	0,84	0,87	0,91	0,93	0,95	0,97	1,00
70	0,94	1,00	1,04	1,08	1,11	1,14	1,16	1,19
75	1,18	1,25	1,30	1,35	1,39	1,42	1,45	1,49
80	1,60	1,70	1,76	1,84	1,89	1,93	1,97	2,03

Instante (min)	P2,33 (mm)	P5 (mm)	P10 (mm)	P25 (mm)	P50 (mm)	P100 (mm)	P200 (mm)	P500 (mm)
85	2,62	2,78	2,89	3,01	3,09	3,17	3,24	3,33
90	32,68	34,64	36,01	37,52	38,54	39,47	40,35	41,43
95	4,09	4,33	4,50	4,69	4,82	4,94	5,05	5,18
100	1,97	2,09	2,18	2,27	2,33	2,38	2,44	2,50
105	1,35	1,43	1,49	1,55	1,59	1,63	1,67	1,71
110	1,04	1,11	1,15	1,20	1,23	1,26	1,29	1,32
115	0,86	0,91	0,95	0,99	1,01	1,04	1,06	1,09
120	0,73	0,78	0,81	0,84	0,86	0,88	0,90	0,93
125	0,64	0,68	0,71	0,74	0,76	0,77	0,79	0,81
130	0,57	0,61	0,63	0,66	0,67	0,69	0,71	0,72
135	0,52	0,55	0,57	0,59	0,61	0,62	0,64	0,65
140	0,47	0,50	0,52	0,54	0,56	0,57	0,58	0,60
145	0,44	0,46	0,48	0,50	0,51	0,53	0,54	0,55
150	0,40	0,43	0,45	0,46	0,48	0,49	0,50	0,51
155	0,38	0,40	0,42	0,43	0,45	0,46	0,47	0,48
160	0,35	0,38	0,39	0,41	0,42	0,43	0,44	0,45
165	0,33	0,35	0,37	0,38	0,39	0,40	0,41	0,42
170	0,32	0,34	0,35	0,36	0,37	0,38	0,39	0,40
175	0,30	0,32	0,33	0,35	0,36	0,36	0,37	0,38
180	0,29	0,30	0,32	0,33	0,34	0,35	0,35	0,36

Tabla 5-103. Hietogramas de diseño para la cuenca en Casa de máquinas para diferentes periodos de retorno discretizados a 5 minutos.

Instante (min)	P2,33 (mm)	P5 (mm)	P10 (mm)	P25 (mm)	P50 (mm)	P100 (mm)	P200 (mm)	P500 (mm)
5	0,30	0,32	0,33	0,35	0,36	0,37	0,38	0,39
10	0,32	0,34	0,35	0,37	0,38	0,39	0,40	0,41
15	0,33	0,35	0,37	0,39	0,40	0,41	0,42	0,43
20	0,35	0,38	0,39	0,41	0,42	0,43	0,44	0,46
25	0,37	0,40	0,42	0,43	0,45	0,46	0,47	0,48
30	0,40	0,43	0,44	0,46	0,48	0,49	0,50	0,52
35	0,43	0,46	0,48	0,50	0,51	0,53	0,54	0,55
40	0,46	0,49	0,51	0,54	0,55	0,57	0,58	0,60
45	0,50	0,54	0,56	0,59	0,60	0,62	0,63	0,65
50	0,55	0,59	0,62	0,64	0,66	0,68	0,70	0,72
55	0,62	0,66	0,69	0,72	0,74	0,76	0,78	0,80

Instante (min)	P2,33 (mm)	P5 (mm)	P10 (mm)	P25 (mm)	P50 (mm)	P100 (mm)	P200 (mm)	P500 (mm)
60	0,70	0,74	0,78	0,81	0,83	0,86	0,88	0,90
65	0,81	0,86	0,90	0,94	0,96	0,99	1,01	1,04
70	0,96	1,03	1,07	1,12	1,15	1,18	1,21	1,24
75	1,20	1,28	1,34	1,40	1,44	1,48	1,51	1,55
80	1,64	1,74	1,82	1,90	1,95	2,01	2,05	2,11
85	2,68	2,86	2,98	3,12	3,21	3,29	3,37	3,47
90	33,43	35,60	37,12	38,81	39,94	40,98	41,96	43,18
95	4,18	4,45	4,64	4,85	4,99	5,13	5,25	5,40
100	2,02	2,15	2,24	2,34	2,41	2,48	2,54	2,61
105	1,38	1,47	1,54	1,61	1,65	1,70	1,74	1,79
110	1,07	1,14	1,19	1,24	1,28	1,31	1,34	1,38
115	0,88	0,93	0,97	1,02	1,05	1,08	1,10	1,13
120	0,75	0,80	0,83	0,87	0,89	0,92	0,94	0,97
125	0,66	0,70	0,73	0,76	0,78	0,80	0,82	0,85
130	0,58	0,62	0,65	0,68	0,70	0,72	0,73	0,75
135	0,53	0,56	0,59	0,61	0,63	0,65	0,66	0,68
140	0,48	0,51	0,54	0,56	0,58	0,59	0,61	0,62
145	0,45	0,47	0,49	0,52	0,53	0,55	0,56	0,58
150	0,41	0,44	0,46	0,48	0,49	0,51	0,52	0,53
155	0,39	0,41	0,43	0,45	0,46	0,47	0,49	0,50
160	0,36	0,39	0,40	0,42	0,43	0,45	0,46	0,47
165	0,34	0,36	0,38	0,40	0,41	0,42	0,43	0,44
170	0,32	0,35	0,36	0,38	0,39	0,40	0,41	0,42
175	0,31	0,33	0,34	0,36	0,37	0,38	0,39	0,40
180	0,29	0,31	0,33	0,34	0,35	0,36	0,37	0,38

5.1.4.7.6 Caudales máximos para las cuencas en captación y casa de máquinas

Para la estimación de los caudales máximos para diferentes períodos de retorno se aplicó el método de transformación de la lluvia en escorrentía por medio de los hidrogramas unitarios sintéticos de Snyder, SCS y Clark. El modelo hidrológico usado en los cálculos es el HEC-HMS 4.0, que toma las cuencas hidrográficas analizadas como un sistema agregado.

Hidrograma unitario sintético de Snyder

El modelo hidrológico de Snyder calcula un hidrograma unitario a partir de las principales características morfométricas de la cuenca, del caudal pico, el tiempo al pico y del tiempo de rezago.

Tiempo de rezago

El tiempo de rezago se define como el tiempo existente desde el centroide del histograma de precipitación efectiva hasta el caudal pico del hidrograma unitario y se calcula como:

$$Tr = \frac{Lc^{0.8}(S+1)^{0.7}}{1900Sc^{0.5}}$$

Donde Tr corresponde al tiempo de rezago en horas, Lc es la longitud del drenaje principal hasta la divisoria de aguas en pies, S es el factor de retención o almacenamiento calculado con base al número de curva CN y Sc es la pendiente de la cuenca en porcentaje. Si el tiempo de rezago es mayor que el tiempo de concentración se recomienda utilizar la siguiente relación:

Tr = 0.6Tc

Donde Tc es el tiempo de concentración en horas.

Duración de la lluvia

Snyder consideró lluvias que estuvieran de acuerdo con el tamaño de la cuenca definiendo para ello una relación de 1/1.5 veces el tiempo de rezago; así entonces

$$T = \frac{T_r}{5.5}$$

Donde T será la duración de la lluvia efectiva en horas y Tr el tiempo de rezago en horas

Tiempo al pico

El tiempo al pico puede calcularse como:

$$T_p = Tr + \frac{T}{2}$$

Donde Tp es el tiempo al pico, T es la duración de la lluvia en horas y Tr es el tiempo de rezago.

Caudal Pico

El caudal pico por milla cuadrada Up puede ser estimado utilizando la siguiente expresión:

$$u_p = Cp\frac{640}{Tr}$$

Donde Up representa el caudal al pico por unidad de área (en pie^3/s-mi^2), Tr es el tiempo de rezago en horas y Cp es un coeficiente adimensional que depende de la topografía de la cuenca variando entre 0,4 y 0,85 y que está relacionado con las condiciones de almacenamiento; para superficies muy planas toma el valor de 0.42, para pendientes moderadas de 0,67 y para áreas montañosas de 0,85. La ecuación anterior es usada cuando el hidrograma unitario a construir corresponde a una precipitación efectiva cuya duración coincide con el tiempo al pico en caso contrario se utiliza la siguiente expresión:

$$u_p = Cp\frac{640}{[Tr + (T - ts)/4]}$$

Donde ts es la duración de la lluvia en horas y T es la duración de la precipitación efectiva en horas. Una vez obtenido el caudal al pico por unidad de área, el caudal al pico total (Up) se obtiene como:

$Up = u_pAc$

Siendo Ac el área total de la cuenca.

Duración de la escorrentía superficial

El cálculo del tiempo base de Hidrograma unitario se estima mediante la siguiente expresión:

$$t_b = 3 + 3\frac{Tr}{24}$$

Donde t_b es el tiempo base en días con Tr en horas. Esta ecuación es adecuada para cuencas de tamaño considerable, pero para cuencas pequeñas arroja valores muy altos, por lo que el tiempo base debe recalcularse como 5 a 6 veces el tiempo al pico.

Hidrograma unitario sintético del Soil Conservation Service SCS

El método del Soil Conservation Service (SCS), es un método que requiere datos similares a los usados por el hidrograma unitario de Snyder, basados en las características morfométricas de la cuenca, el área de la cuenca, un factor de escorrentía y un tiempo de concentración y precipitación.

En este hidrograma síntético se expresan los caudales en función de caudal pico (Up) y los tiempos en función del tiempo al pico (Tp). Los valores de Up y Tp se estiman con base en el hidrograma unitario triangular del SCS.

Caudal pico

El caudal pico en pies cúbicos por segundo por pulgada se puede calcular como:

$$U_P = 484 \cdot \frac{A_C}{T_P}$$

Dónde Up es el caudal pico correspondiente a un Hidrograma Unitario, Ac es el área de la cuenca, en millas cuadradas y Tp es el tiempo al pico, en horas.

Duración de la tormenta

El método del SCS utiliza el tiempo de concentración, definido como el tiempo que transcurre desde el final de la lluvia efectiva hasta el punto de inflexión de la rama decreciente del Hidrograma Unitario. Con base en esto, el SCS propone una relación promedio entre el tiempo de rezago (Tr) y el tiempo de concentración (Tc), dada por:

$$T_C = \frac{5}{3} \cdot Tr$$

Tiempo de rezago

El tiempo de rezago (Tr), definido como el tiempo en horas desde el centroide del hietograma de la precipitación efectiva hasta el caudal pico del hidrograma unitario, puede calcularse con la misma ecuación presentada en el método del hidrograma unitario de Snyder:

$$Tr = \frac{Lc^{0,8}(S+1)^{0,7}}{1900\,Sc^{0,5}}$$

Donde Lc es la longitud del drenaje principal en pies, Sc es la pendiente promedio de la cuenca en porcentaje y S es el factor de retención o almacenamiento en pulgadas que se calcula con la siguiente expresión.

$$S = \frac{1000}{CN} - 10$$

Dónde CN es el número de curva obtenido para cada unidad hidrológica evaluada.

Tiempo al pico

El tiempo al pico (Tp) se estima con la siguiente expresión:

$$T_P = \frac{T}{2} + T_r$$

Dónde T es la duración de la lluvia efectiva, en horas, Tr es el tiempo de rezago, en horas.

La relación promedio entre el rezago y el tiempo de concentración, puede estimarse mediante:

$$T_R = 0{,}6 \cdot T_C$$

Se puede demostrar que la relación entre la duración T de la precipitación efectiva a la que se le va a construir el hidrograma unitario y el tiempo de concentración está dado por:

$$T = 0{,}133 \cdot T_C$$

Hidrograma unitario de Clark

El método se basa en la distribución de la superficie de la cuenca entre líneas isócronas para computar el volumen de agua caído sobre cada una de esas superficies y considerar el retardo producido por el tránsito del agua a lo largo de la cuenca. Las curvas isocronas son curvas que unen aquellos puntos de la cuenca que tienen igual tiempo de desagüe

Este método tiene como hipótesis básica que el proceso lluvia – escorrentía está gobernado por los fenómenos de atenuación y traslación. La atenuación es el resultado de los efectos de almacenamiento del canal que resisten al flujo. Para el cálculo de la escorrentía directa requiere el tiempo de concentración y un coeficiente de almacenamiento (R) con dimensiones de tiempo, el cual se asocia con la capacidad de la cuenca para retener humedad.

Ecuaciones de regionalización de parámetros desarrolladas para el estado de Illinois permiten hallar de manera práctica los valores del coeficiente de almacenamiento (R) y del tiempo de concentración Tc, mediante el uso de las siguientes ecuaciones obtenidas a partir de regresiones:

$$T_C = 1{,}54 \cdot L^{0{,}875} \cdot S^{-0{,}181}$$

$$R = 16{,}4 \cdot L^{0{,}342} \cdot S^{-0{,}790}$$

Dónde L es la longitud del cauce expresado en millas y S es la pendiente del drenaje principal expresada en pies sobre milla. Tanto R como Tc están expresados en horas.

Para la Cuenca del Río Cocorná en la captación del proyecto el tiempo de concentración se tomó como el que se determinó para la duración de las tormentas de diseño (141 y 160 minutos para captación y casa de máquinas respectivamente).

A continuación, en la Tabla 5-104, se presentan los parámetros utilizados en la estimación de los caudales máximos para diferentes períodos de retorno por el método de las hidrógrafas unitarias. El resultado de los caudales máximos se encuentra en la Tabla 5-105 y Tabla 5-106 y en la Figura 5-122 y Figura 5-123.

Tabla 5-104. Parámetros necesarios para el cálculo de los caudales máximos mediante las metodologías de las hidrógrafas unitarias de Clark, Snyder y del SCS

Cuenca	A (km^2)	NC	Tc (min)	Clark	Snyder		SCS
				Coef. Almacena-miento (horas)	Rezago Estándar (horas)	Coef. Pico	Tiempo rezago (min)
Captación	119,3	78	141	0,42	1,65	0,8	98,84
Casa Máquinas	131,4	78	160	0,45	1,96	0,8	117,73

Tabla 5-105. Caudales máximos para diferentes períodos de retorno. Captación

Método	Período de retorno							
	2.33	5	10	25	50	100	200	500
Clark	289,4	327,7	355,0	385,6	406,6	426,4	445,0	468,1
Snyder	274,7	311,1	337,0	366,1	386,0	404,9	422,5	444,4
SCS	243,3	275,6	298,6	324,4	342,1	358,9	374,5	394,1

Tabla 5-106. Caudales máximos para diferentes períodos de retorno. Casa de máquinas

Método	Período de retorno							
	2.33	5	10	25	50	100	200	500
Clark	307,1	350,2	381,5	416,8	440,3	463,8	484,7	511,4
Snyder	272,7	310,9	338,6	363,9	390,8	411,6	430,1	453,8
SCS	242,0	276,0	300,6	328,5	347,0	365,5	382,0	403,0

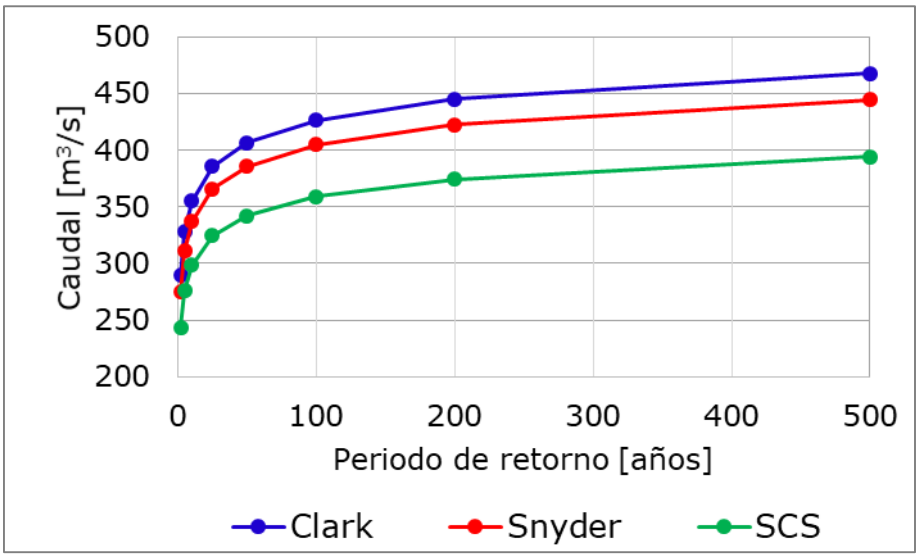


Figura 5-122. Caudales máximos para diferentes períodos de retorno. Captación

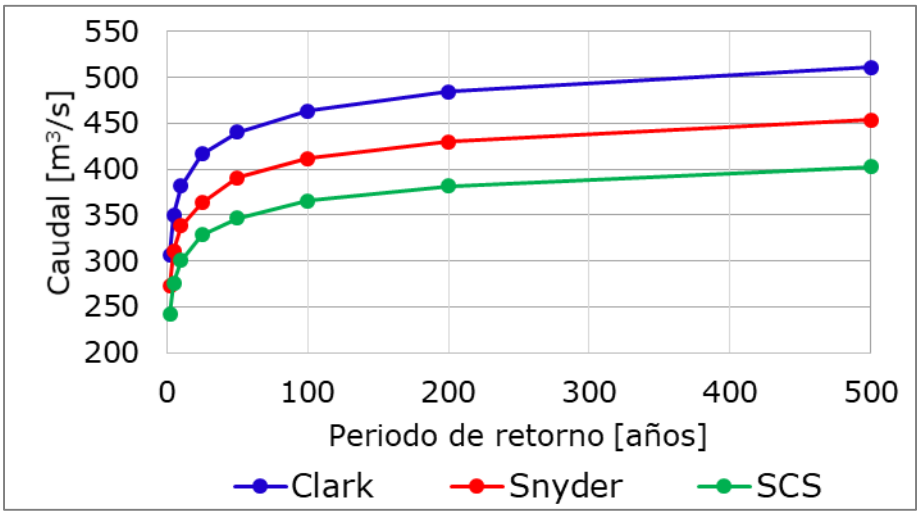


Figura 5-123. Caudales máximos para diferentes períodos de retorno. Casa Máquinas

5.1.4.7.7 Caudales máximos para las subcuencas intervenidas por el proyecto – Método racional probabilístico

El método Racional Probabilístico, supone que si una tormenta de una intensidad constante empieza en un punto cualquiera del tiempo y su duración se prolonga indefinidamente, las variaciones que se presentan en la escorrentía superficial serán nulas cuando se alcance el tiempo de concentración, momento en el cual todos los

puntos de la cuenca estarán aportando a la escorrentía en el punto de cierre. Bajo esos lineamientos, el caudal puede estimarse utilizando la ecuación:

$$(1)\ Q_{Tr} = \frac{1}{3{,}6} C_{Tr}\, I_{TcTr} A$$

Donde:

C_{Tr}: es el denominado coeficiente de escorrentía para el periodo de retorno T.

I_{TcTr}: es la intensidad de la lluvia de diseño (mm/h) para el periodo de retorno T en el tiempo de concentración Tc

A: es el área de la cuenca (km^2)

Q_{Tr}: es el caudal obtenido para el periodo de retorno (m^3/s).

Las tablas habituales para estimar el coeficiente de escorrentía hacen depender su valor únicamente del tipo de terreno y de su cobertura. En algunos casos también lo hacen depender de la pendiente y del periodo de retorno. Una forma de tener en cuenta el periodo de retorno asociado es estableciendo una relación entre el número de curva (calculado en el numeral 5.1.4.7.2) y el coeficiente de escorrentía, como se hará en el presente estudio.

Por definición el coeficiente de escorrentía es:

$$(2)\ C = \frac{E_S}{P}$$

Donde:

E_S: es la escorrentía superficial (mm)

P: es la Precipitación (mm) (contemplada en la Tabla 5-101)

La escorrentía superficial generada por un evento de precipitación se puede cuantificar mediante el método del número de curva, admitiendo la relación habitual I_a = 0,2S (abstracción inicial relacionada con el umbral de escorrentía del lugar de estudio), se tiene que:

$$(3)\ Es = \frac{(P-I_a)^2}{P+4I_a}$$

Finalmente, reemplazando (3) en (2) se encuentra:

$$(4)\ C = \frac{(P-I_a)^2}{P^2+4PI_a}$$

Donde Ia en [mm] es igual a:

$$(5)\ I_a = \frac{5080}{CN} - 50{,}8$$

Siguiendo estas ecuaciones, de la Tabla 5-107 a la Tabla 5-112 se muestran los valores de I_a y C obtenidos para cada una de las subcuencas en estudio:

Tabla 5-107. Coeficientes de escorrentía obtenidos a través del CN para la subcuenca Q. Sin nombre 2

Subcuenca Q. Sin nombre 2				
Periodo de retorno	P (mm)	CN	I_a (mm)	Coeficiente de escorrentía
2.33	42,44	85,30	8,8	0,35
5	47,92			0,39
10	51,95			0,41
25	56,61			0,44
50	59,84			0,46
100	62,90			0,48
200	65,85			0,49
500	69,60			0,51

Tabla 5-108 Coeficientes de escorrentía obtenidos a través del CN para la subcuenca Q. Sin nombre 3

Subcuenca Q. Sin nombre 3				
Periodo de retorno	P (mm)	CN	I_a (mm)	Coeficiente de escorrentía
2.33	42,38	83,49	10,0	0,30
5	47,89			0,34
10	51,94			0,37
25	56,63			0,40
50	59,88			0,41
100	62,97			0,43
200	65,93			0,45
500	69,71			0,46

Tabla 5-109. Coeficientes de escorrentía obtenidos a través del CN para la subcuenca Q. Sin nombre 4

Subcuenca Q. Sin nombre 4				
Periodo de retorno	P (mm)	CN	I_a (mm)	Coeficiente de escorrentía
2.33	44,08	83,67	9,9	0,32
5	49,93			0,36
10	54,22			0,39
25	59,22			0,42
50	62,68			0,43
100	65,97			0,45
200	69,14			0,47
500	73,17			0,48

Tabla 5-110 Coeficientes de escorrentía obtenidos a través del CN para la subcuenca Q. Sin nombre 5

Subcuenca Q. Sin nombre 5				
Periodo de retorno	P (mm)	CN	I_a (mm)	Coeficiente de escorrentía
2.33	42,82	82,20	11,0	0,27
5	48,57			0,31
10	52,79			0,34
25	57,71			0,37
50	61,12			0,39
100	64,37			0,41
200	67,49			0,42
500	71,48			0,44

Tabla 5-111 Coeficientes de escorrentía obtenidos a través del CN para la subcuenca Q. Sin nombre 6

Subcuenca Q. Sin nombre 6				
Periodo de retorno	P (mm)	CN	I_a (mm)	Coeficiente de escorrentía
2.33	43,33	83,90	9,7	0,32

Subcuenca Q. Sin nombre 6				
5	49,18			0,36
10	53,49			0,39
25	58,50			0,42
50	61,99			0,44
100	65,30			0,45
200	68,48			0,47
500	72,55			0,49

Tabla 5-112 Coeficientes de escorrentía obtenidos a través del CN para la subcuenca Q. Sin nombre 7

Subcuenca Q. Sin nombre 7				
Periodo de retorno	P (mm)	CN	I_a (mm)	Coeficiente de escorrentía
2.33	45,36	82,63	10,7	0,30
5	51,54			0,34
10	56,10			0,37
25	61,41			0,40
50	65,11			0,42
100	68,62			0,44
200	72,00			0,46
500	76,32			0,47

Ahora, con el coeficiente de escorrentía calculado para cada subcuenca en cada uno de los periodos de retorno definidos, se procede a calcular el caudal por la ecuación del método racional probabilístico (1). Se estimaron los caudales de crecidas para períodos de retorno de 2,33, 5, 10, 25, 50, 100, 200 y 500 años en todas las subcuencas.

Las Tabla 5-113 a Tabla 5-118 resumen las variables empleadas para el cálculo del caudal máximo y el valor obtenido para éste.

Tabla 5-113. Caudal máximo por el método racional en la subcuenca de la quebrada sin nombre 2

Periodo de retorno (años)	Coeficiente de escorrentía	Intensidad I_{TcTR} (mm/h)	Área (km²)	Caudal (m³/s)
2.33	0,35	235,50	0,118	2,66
5	0,39	265,92		3,36
10	0,41	288,25		3,89
25	0,44	314,12		4,53
50	0,46	332,05		4,99
100	0,48	349,06		5,43
200	0,49	365,38		5,86
500	0,51	386,19		6,42

Tabla 5-114. Caudal máximo por el método racional en la subcuenca de la quebrada sin nombre 3

Periodo de retorno (años)	Coeficiente de escorrentía	Intensidad I_{TcTR} (mm/h)	Área (km²)	Caudal (m³/s)
2.33	0,30	238,89	0,360	7,14
5	0,34	269,96		9,17
10	0,37	292,77		10,74
25	0,40	319,21		12,64
50	0,41	337,56		13,99
100	0,43	354,96		15,31
200	0,45	371,66		16,59
500	0,46	392,97		18,26

Tabla 5-115. Caudal máximo por el método racional en la subcuenca de la quebrada sin nombre 4

Periodo de retorno (años)	Coeficiente de escorrentía	Intensidad I_{TcTR} (mm/h)	Área (km²)	Caudal (m³/s)
2.33	0,32	201,26	0,429	7,59
5	0,36	227,93		9,73
10	0,39	247,55		11,39
25	0,42	270,34		13,38

Periodo de retorno (años)	Coeficiente de escorrentía	Intensidad I_{TcTR} (mm/h)	Área (km^2)	Caudal (m^3/s)
50	0,43	286,16		14,81
100	0,45	301,18		16,20
200	0,47	315,62		17,55
500	0,48	334,05		19,31

Tabla 5-116. Caudal máximo por el método racional en la subcuenca de la quebrada sin nombre 5

Periodo de retorno (años)	Coeficiente de escorrentía	Intensidad I_{TcTR}(mm/h)	Área (km^2)	Caudal (m^3/s)
2.33	0,27	234,95	0,137	2,44
5	0,31	266,46		3,19
10	0,34	289,65		3,78
25	0,37	316,62		4,49
50	0,39	335,36		5,00
100	0,41	353,17		5,50
200	0,42	370,29		5,99
500	0,44	392,15		6,63

Tabla 5-117. Caudal máximo por el método racional en la subcuenca de la quebrada sin nombre 6

Periodo de retorno (años)	Coeficiente de escorrentía	Intensidad I_{TcTR} (mm/h)	Área (km^2)	Caudal (m^3/s)
2.33	0,32	223,37	0,285	5,59
5	0,36	253,52		7,19
10	0,39	275,73		8,44
25	0,42	301,56		9,94
50	0,44	319,52		11,02
100	0,45	336,59		12,07
200	0,47	353,00		13,09
500	0,49	373,98		14,42

Tabla 5-118. Caudal máximo por el método racional en la subcuenca de la quebrada sin nombre 7

Periodo de retorno (años)	Coeficiente de escorrentía	Intensidad I_{TcTR} (mm/h)	Área (km²)	Caudal (m³/s)
2.33	0,30	180,65	0,446	6,74
5	0,34	205,28		8,75
10	0,37	223,44		10,31
25	0,40	244,58		12,20
50	0,42	259,29		13,56
100	0,44	273,28		14,88
200	0,46	286,74		16,18
500	0,47	303,94		17,87

A continuación, en la Figura 5-124 se muestra de manera resumida la variación del caudal máximo obtenido según el periodo de retorno para cada subcuenca:

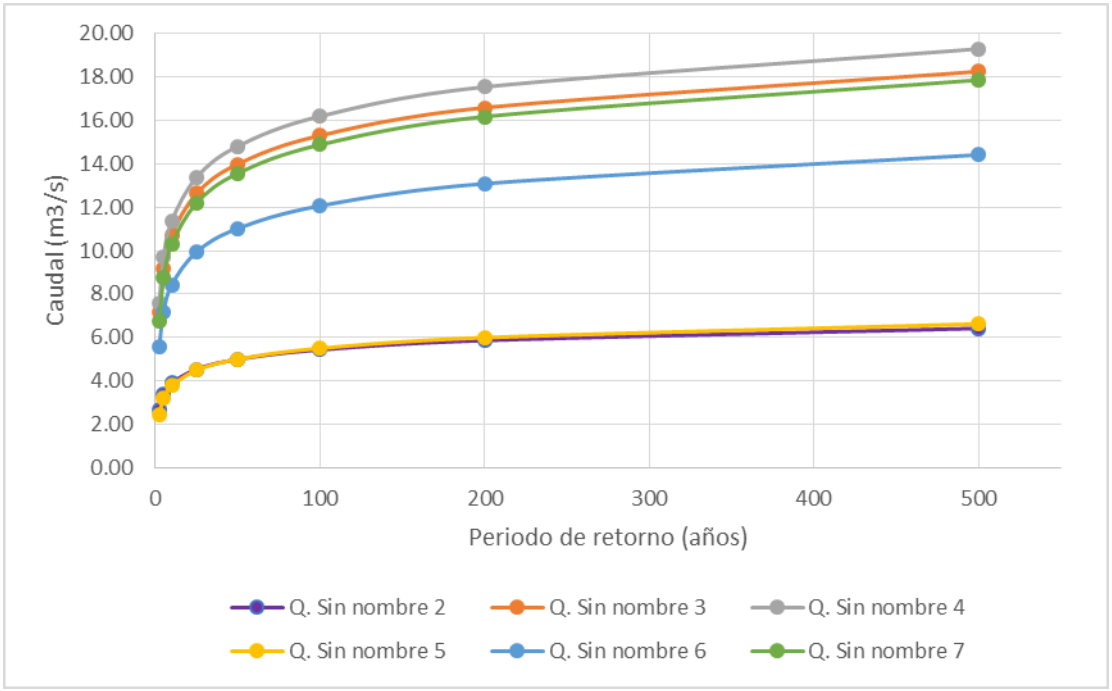


Figura 5-124. Variación del caudal máximo según el periodo de retorno para las subcuencas de interés

5.1.4.8 Caudal ambiental

Como se explicó en el Capítulo 2 Generalidades, el caudal ambiental fue estimado por medio de la metodología propuesta por las Empresa Públicas de Medellín **Fuente especificada no válida.**, que se basa en la metodología de Grecco para calcular el caudal de Garantía Ambiental **Fuente especificada no válida.**, la cual comprende todos los valores mínimos de caudales de un río, calculados para un punto específico de su trayectoria, los cuales reflejan el límite mínimo que garantiza la continuidad de los principales aspectos físicos, químicos, bióticos, sociales y estéticos existentes en su entorno, aún con el aprovechamiento del recurso para otros usos (Empresas Públicas de Medellín, 2012). Esta metodología considera dentro de la información necesaria para su estimación, el índice hidrológico Q95%, es decir el caudal presente el 95% del tiempo en el cauce en estudio en el punto de interés para el proyecto. Este índice se calculó mes a mes, considerando las curvas de duración de caudales medios diarios para los meses de enero a diciembre y para cuatro condiciones hidrológicas (Año Medio, Niño, Niña y Neutro). El caudal ambiental mensual máximo que podrá arrojar el método, será menor o igual que el valor del Q95%.

Los resultados encontrados se presentan a continuación:

5.1.4.8.1 Estimación del índice hidrológico Q95%

Como se explicó anteriormente, el caudal ambiental se obtuvo para diferentes condiciones hidrológicas y para cada uno de los meses del año, razón por la cual el índice hidrológico Q95% también fue estimado mensualmente.

Para la condición hidrológica de año medio el Q95% varía entre 3,5 y 7,2 m^3/s, siendo agosto el mes de menor caudal y mayo el de mayor, ver Tabla 5-119 y Figura 5-125.

Tabla 5-119. Curva de Duración de Caudales Mensuales para Condición Hidrológica de Año Medio (m^3/s)

% Excedencia de tiempo	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
5	17,6	17,9	17,7	22,5	25,4	23,9	21,7	20,8	23,7	21,9	19,7	18,8
10	15,3	15,4	15,2	19,3	22,2	21,4	19,3	18,1	20,9	19,4	17,7	17,1
15	13,7	14,3	13,6	17,8	20,4	19,1	17,1	16,2	19,1	17,5	16,2	15,6
20	12,8	13,3	12,6	16,4	19,0	17,4	15,5	14,5	17,9	16,4	15,1	14,5
25	11,8	12,3	12,0	15,4	17,7	16,0	13,8	13,0	16,7	15,4	14,5	13,4
30	10,9	11,5	11,4	14,7	16,9	14,9	12,8	12,0	15,8	14,7	13,9	12,5
35	10,2	10,6	10,6	13,8	16,1	13,8	11,6	11,2	14,8	14,1	13,3	11,9
40	9,7	9,9	10,0	13,1	15,3	13,0	10,4	10,4	13,9	13,4	12,8	11,3
45	9,1	9,4	9,5	12,5	14,6	12,0	9,5	9,6	13,0	12,9	12,2	10,9
50	8,6	8,9	9,0	11,9	14,0	11,3	8,6	8,8	12,4	12,4	11,7	10,5

% Excedencia de tiempo	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
55	8,1	8,5	8,5	11,3	13,2	10,5	7,8	8,1	11,7	12,0	11,4	10,2
60	7,7	7,9	8,0	10,7	12,6	9,8	7,3	7,2	11,2	11,5	11,0	9,7
65	7,2	7,4	7,5	10,1	11,7	9,2	6,7	6,7	10,4	11,0	10,5	9,2
70	6,7	6,9	7,1	9,6	11,1	8,6	6,3	6,2	9,8	10,4	10,1	8,7
75	6,3	6,2	6,5	9,0	10,3	8,1	5,9	5,7	9,1	10,0	9,6	8,1
80	5,8	5,6	6,1	8,3	9,6	7,7	5,4	5,3	8,1	9,3	9,0	7,7
85	5,3	5,0	5,5	7,5	8,7	7,1	4,9	4,8	7,2	8,7	8,6	7,2
90	4,8	4,4	4,8	6,4	7,4	6,6	4,2	4,1	6,2	7,9	7,9	6,7
95	3,8	3,7	4,1	5,4	7,2	5,9	3,7	3,5	4,9	6,8	6,9	6,2
100	2,1	1,5	1,6	3,2	4,7	4,6	1,8	1,8	2,1	4,3	4,1	5,5

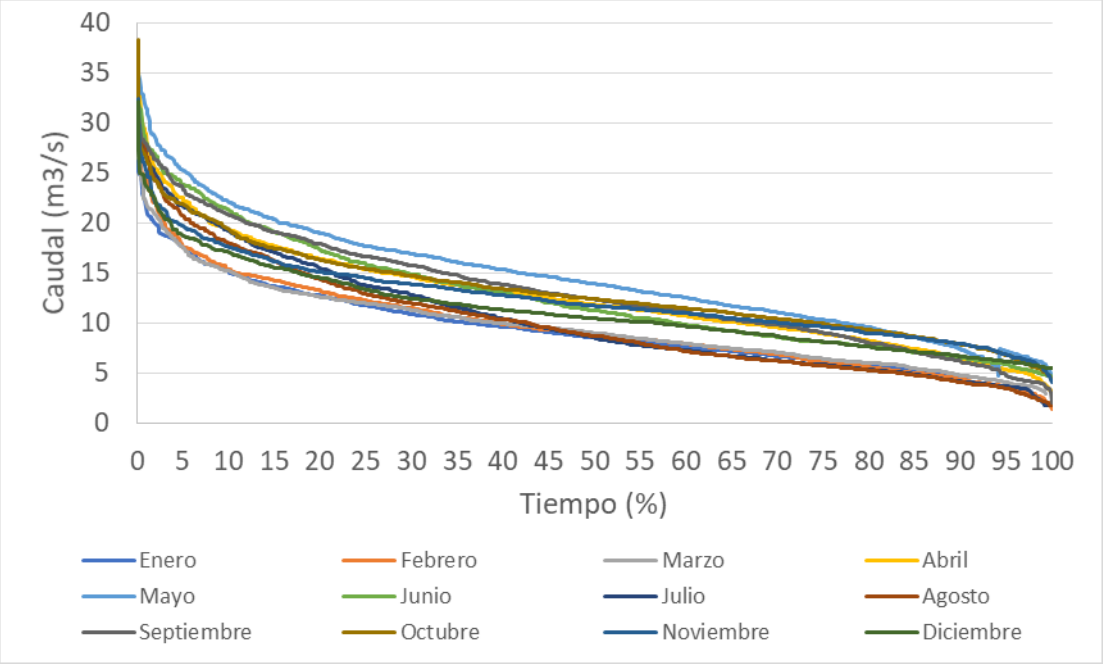


Figura 5-125. Curva de Duración de Caudales Mensuales. Condición Hidrológica de Año Medio

Para la condición climática de Fenómeno de El Niño “Neutro”, se obtuvieron valores del índice Q95% más altos que para la condición hidrológica de Año Medio, resultados que eran de esperarse si se tiene en cuenta que la condición hidrológica de “Año Medio” incluye períodos de temporadas húmedas, secas, de El Niño y La Niña,

mientras que la condición Fenómeno de El Niño “Neutro” excluye las fases cálidas y frías de este fenómeno climático, ver Tabla 5-120 y Figura 5-126.

Tabla 5-120. Curva de Duración de Caudales Mensuales. Fenómeno de El Niño, condición climática “Neutra” (m^3/s)

% Exedencia de tiempo	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
5	18,0	18,7	18,4	22,0	26,5	23,9	21,0	21,6	23,8	22,5	22,0	17,7
10	15,6	15,4	15,8	18,6	23,2	21,5	18,2	19,0	21,5	21,1	18,5	15,4
15	13,7	14,1	13,9	16,9	20,6	19,2	16,5	17,0	20,0	19,1	17,3	13,4
20	12,8	13,1	12,9	15,8	19,5	17,2	14,6	15,7	18,5	17,7	15,3	12,5
25	12,2	12,5	12,2	15,0	18,2	15,7	13,1	13,8	17,2	16,8	14,4	11,8
30	11,3	11,7	11,6	14,2	17,3	14,8	11,7	12,5	16,4	15,7	14,0	11,4
35	10,8	10,8	10,9	13,6	16,8	13,6	10,6	11,6	15,2	15,1	13,3	10,9
40	10,0	10,2	10,1	12,9	15,9	12,7	9,5	11,0	14,1	14,3	12,8	10,6
45	9,6	9,3	9,7	12,3	15,0	11,6	8,8	10,2	13,5	13,6	12,0	10,2
50	9,2	9,0	9,3	11,8	14,5	11,0	7,8	9,4	12,8	13,1	11,7	10,0
55	8,7	8,6	8,8	11,3	14,0	10,2	7,4	8,5	12,3	12,5	11,3	9,7
60	8,3	8,4	8,3	10,7	13,4	9,4	6,9	7,7	11,7	12,1	10,9	9,4
65	8,0	8,0	8,0	10,1	12,8	8,7	6,5	7,0	11,3	11,4	10,4	8,8
70	7,6	7,6	7,4	9,4	12,1	8,2	6,1	6,5	10,3	11,0	10,0	8,2
75	7,4	7,2	7,0	9,0	11,5	7,7	5,7	6,1	9,8	10,4	9,4	7,9
80	7,1	6,7	6,5	8,5	10,9	7,3	5,4	5,6	9,0	10,0	8,9	7,2
85	6,6	5,7	6,1	7,5	10,1	6,7	4,9	5,2	8,0	9,1	8,4	6,8
90	6,3	5,0	5,4	6,9	9,1	6,1	4,2	4,6	7,0	8,2	7,9	6,3
95	5,5	4,0	4,5	5,8	7,9	5,0	3,6	3,5	6,0	7,1	7,5	6,0
100	4,4	1,7	1,6	4,0	4,7	3,2	1,8	1,8	4,0	4,8	5,7	5,3

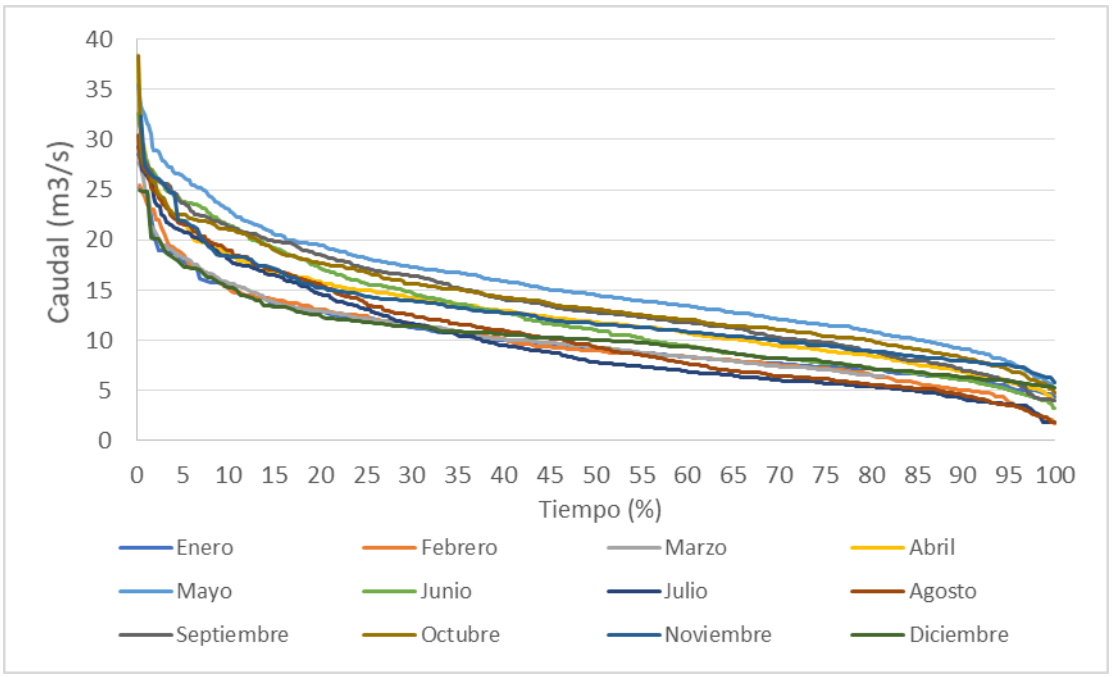


Figura 5-126. Curva de Duración de Caudales Mensuales. Condición Hidrológica Fenómeno de El Niño, fase “Neutra”

Los valores del índice Q95% para la fase fría del Fenómeno de El Niño, presentan valores que varían entre los 4,4 m^3/s para el mes de julio y 9,3 m^3/s para abril. El aumento en los caudales ambientales en esta fase son el reflejo de las altas precipitaciones que se dan durante la fase fría del Fenómeno de El Niño, ver Tabla

5-121 y

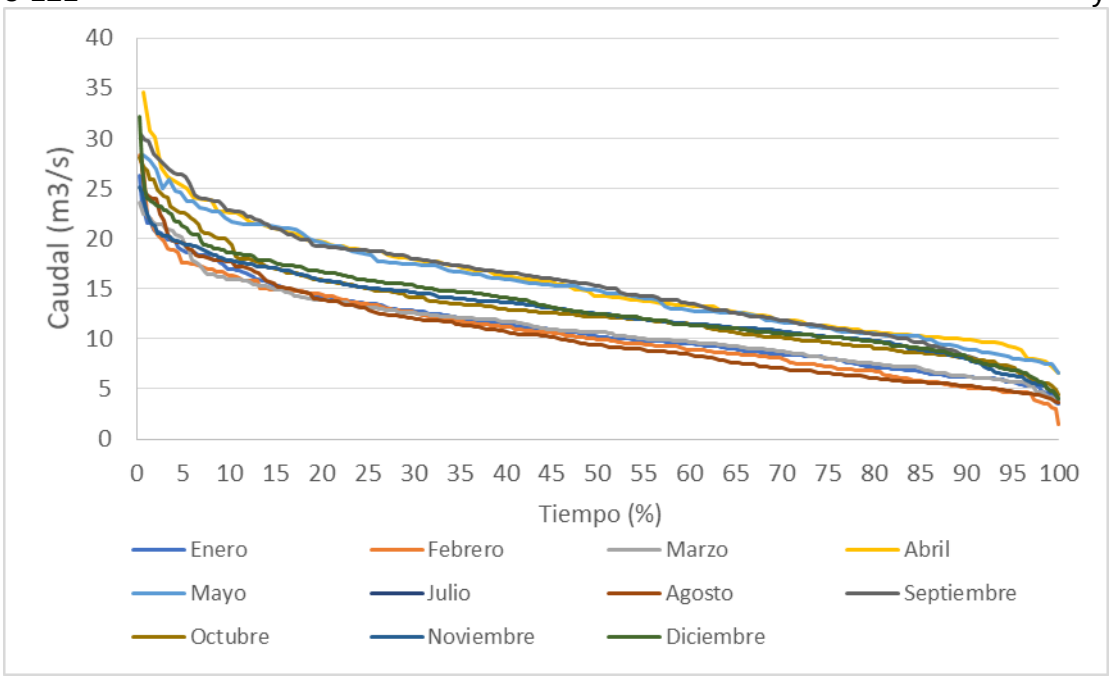


Figura 5-127.

Tabla 5-121. Curva de Duración de Caudales Mensuales. Fenómeno de El Niño, condición climática “Niña”

% Exedencia de tiempo	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
5	18,9	17,6	20,2	25,4	24,6	24,9	23,6	19,6	26,3	22,5	19,6	21,2
10	17,0	16,4	16,0	22,7	22,1	23,1	21,7	17,8	22,8	19,6	17,9	18,6
15	15,4	14,9	15,0	21,1	21,3	21,4	19,4	15,5	21,1	17,1	17,1	17,7
20	14,3	14,5	13,8	19,7	19,6	19,6	18,2	14,0	19,2	15,9	15,8	16,7
25	13,6	13,4	13,1	18,8	18,4	17,8	16,8	13,1	18,9	15,1	15,1	15,9
30	12,8	12,7	12,6	18,0	17,4	16,8	15,6	12,1	18,0	14,2	14,7	15,4
35	12,1	11,9	12,1	17,3	16,7	15,7	14,2	11,5	17,4	13,5	14,1	14,7
40	11,5	11,2	11,7	16,3	15,9	14,9	13,6	10,8	16,6	12,9	13,7	14,1
45	11,0	10,6	10,9	15,8	15,4	14,4	13,2	10,2	16,0	12,6	13,1	13,2
50	10,3	9,9	10,7	14,3	14,9	13,5	12,8	9,4	15,3	12,2	12,5	12,5
55	9,8	9,5	10,1	13,8	14,1	12,9	12,1	9,0	14,3	11,9	12,0	12,0
60	9,6	8,9	9,7	13,4	12,8	12,0	11,3	8,5	13,5	11,4	11,5	11,4
65	9,0	8,5	9,3	12,7	12,5	10,7	10,6	7,6	12,5	10,6	11,1	11,0
70	8,5	8,1	8,7	11,9	11,7	10,3	9,7	7,1	11,8	10,1	10,8	10,5

% Exedencia de tiempo	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
75	8,0	7,2	8,1	11,3	11,0	9,4	8,6	6,6	11,2	9,7	10,2	10,2
80	7,2	6,8	7,5	10,7	10,5	8,8	8,2	6,1	10,5	9,1	9,8	9,7
85	6,7	5,8	7,2	10,3	10,3	8,1	7,5	5,7	9,7	8,6	8,9	9,1
90	6,2	5,1	6,3	9,9	9,1	7,0	6,8	5,3	8,3	8,1	8,0	8,3
95	5,7	4,7	5,8	9,3	8,3	6,6	4,4	4,8	6,9	7,3	6,3	6,9
100	3,5	1,5	3,8	6,6	6,7	6,1	2,1	3,6	5,5	4,5	4,1	4,0

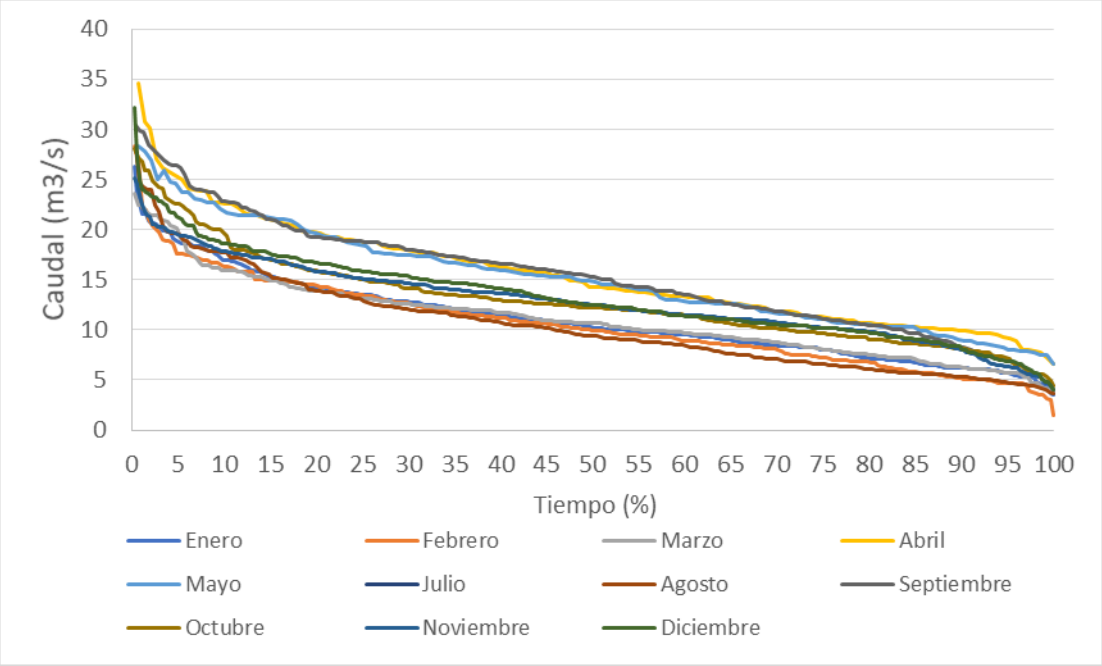


Figura 5-127. Curva de Duración de Caudales Mensuales. Condición Hidrológica Fenómeno de El Niño, fase “Niña”

En la fase cálida del Fenómeno de El Niño, el Q95% varía entre 2,9 y 7,1 m^3/s. En esta fase noviembre se presenta como el mes con mayores caudales, mientras que enero y agosto son los meses más afectados por este fenómeno, ver Tabla 5-122 y Figura 5-128.

Tabla 5-122. Curva de Duración de Caudales Mensuales. Fenómeno de El Niño, condición climática “Niño” (m^3/s)

% Exedencia de tiempo	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
5	15.4	17.9	12.3	20.4	23.9	20.9	22.3	20.3	18.7	19.1	19.2	13.6

% Exedencia de tiempo	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
10	12.9	14.9	10.6	17.8	22.0	18.9	19.9	17.2	15.7	17.3	16.2	11.9
15	10.9	13.2	10.1	16.0	20.4	17.0	16.7	14.8	14.8	16.2	15.1	11.1
20	9.8	11.6	9.2	14.9	18.9	15.6	14.6	13.0	13.6	15.3	14.3	10.4
25	9.0	10.4	8.5	13.6	17.4	14.1	13.5	11.9	12.9	14.6	13.7	9.8
30	8.4	9.7	8.0	12.8	16.3	13.2	11.8	10.4	11.7	14.0	13.1	9.2
35	7.9	9.2	7.6	12.2	15.7	12.4	10.0	9.1	11.1	13.5	12.6	8.8
40	7.5	8.0	7.3	11.1	14.8	11.5	9.0	8.2	10.5	12.9	12.0	8.3
45	6.9	7.4	6.6	10.6	14.2	11.0	8.0	7.4	10.2	12.5	11.7	7.9
50	6.5	6.9	6.1	9.9	12.9	10.4	7.5	6.7	9.6	11.9	11.3	7.5
55	6.2	6.3	6.0	9.6	12.1	9.8	6.7	6.2	9.1	11.5	10.9	7.3
60	5.7	6.0	5.8	8.8	11.2	9.2	6.3	5.6	8.6	11.1	10.4	7.0
65	5.5	5.6	5.3	8.1	10.7	8.8	6.0	5.1	7.8	10.6	9.9	6.5
70	5.2	5.0	5.0	7.6	9.9	8.2	5.6	4.7	6.7	10.3	9.6	6.2
75	4.9	4.6	4.7	6.8	9.6	8.0	5.1	4.3	6.3	9.6	9.2	5.8
80	4.5	4.2	4.5	6.0	8.9	7.4	4.7	3.9	5.8	9.1	8.9	5.2
85	4.0	4.0	4.3	5.5	8.3	7.0	4.3	3.8	5.0	8.2	8.5	4.8
90	3.6	3.8	3.9	5.2	7.7	6.2	4.2	3.5	4.4	7.4	8.0	4.4
95	2.9	3.2	3.8	4.5	7.0	5.3	3.9	2.9	4.2	6.5	7.1	4.2
100	2.1	2.6	2.8	3.2	6.0	4.2	3.3	2.1	2.1	4.3	5.0	2.4

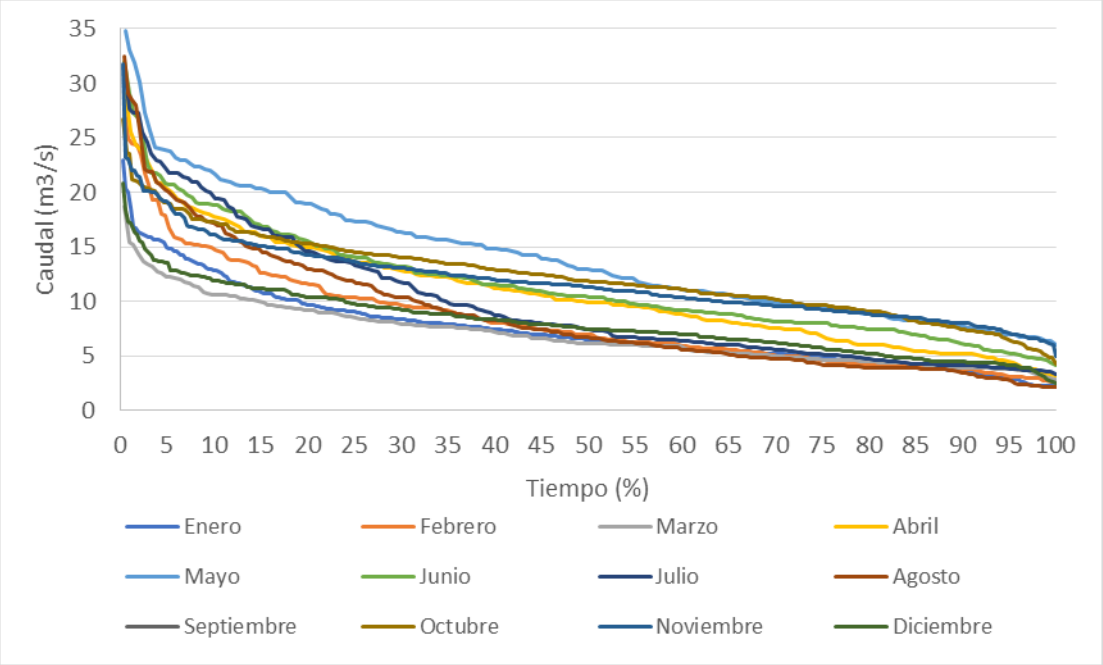


Figura 5-128. Curva de Duración de Caudales Mensuales. Condición Hidrológica Fenómeno de El Niño, fase "Niño"

En la Tabla 5-123 y Figura 5-129, se observan los caudales medios mensuales para las cuatro condiciones evaluadas. Además, se observa el comportamiento bimodal de los caudales que se debe a los dos períodos secos (diciembre-marzo y julio-agosto) y a los dos períodos húmedos (abril-mayo y septiembre-noviembre).

Tabla 5-123. Caudal Medio (Qm) para diferentes condiciones hidrológicas (m^3/s)

Mes	Qm - Año Medio	Qm - Neutro	Qm - Niña	Qm - Niño
Enero	9,35	10,04	11,02	7,33
Febrero	9,61	9,86	10,52	8,18
Marzo	9,60	9,97	11,02	6,90
Abril	12,59	12,41	15,48	10,76
Mayo	15,04	15,35	15,09	13,94
Junio	12,43	12,32	14,14	11,49
Julio	10,34	9,81	12,97	9,72
Agosto	10,01	10,50	10,37	8,63
Septiembre	13,09	13,66	15,32	9,84
Octubre	13,06	13,85	12,83	12,22
Noviembre	12,37	12,62	12,76	11,75
Diciembre	10,62	10,36	13,17	7,97
Medio	**11,51**	**11,73**	**12,89**	**9,89**

Qm: caudal medio

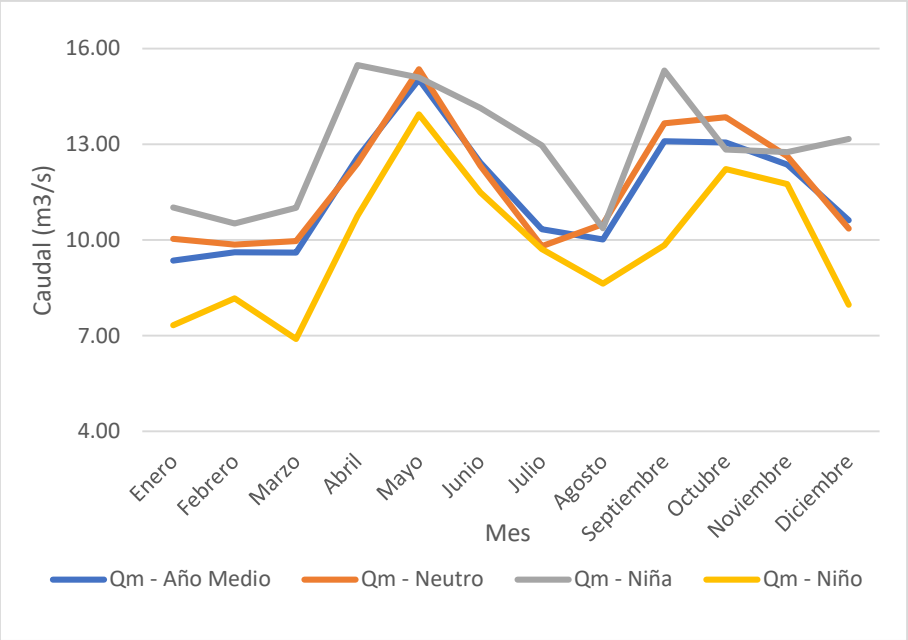


Figura 5-129. Caudal Medio para diferentes condiciones hidrológicas, m^3/s

En la Tabla 5-124 y Figura 5-130, se observa el índice hidrológico Q95% para las condiciones hidrológicas analizadas. Si se comparan los resultados encontrados para los meses de octubre, noviembre y diciembre en la fase húmeda de El Niño, con los resultados de las demás fases para estos mismos meses, no se observa una fuerte influencia de este fenómeno natural con el caudal que permanece el 95% del tiempo en el cauce del río Cocorná. Estos resultados se pueden explicar si se tienen en cuentan los resultados de Ramírez B. y Jaramillo R. (2009), quienes hallaron la relación entre el ONI y la lluvia en la región andina central de Colombia, encontrando que, en algunos casos, en los meses de mayores precipitaciones, la lluvia bajo presencia del ENSO no es diferente a la que ocurre bajo condiciones neutras.

Tabla 5-124. Q95% para diferentes condiciones hidrológicas (m^3/s)

Mes	Qamb - Año Medio	Qamb - Neutro	Qamb - Niña	Qamb - Niño
Enero	3,82	5,49	5,65	2,94
Febrero	3,74	3,99	4,68	3,16
Marzo	4,12	4,46	5,76	3,79
Abril	5,42	5,79	9,34	4,49
Mayo	7,22	7,89	8,26	6,99
Junio	5,93	5,01	6,56	5,32

Mes	Qamb - Año Medio	Qamb - Neutro	Qamb - Niña	Qamb - Niño
Julio	3,69	3,62	4,43	3,87
Agosto	3,52	3,53	4,80	2,85
Septiembre	4,88	6,04	6,89	4,16
Octubre	6,80	7,07	7,26	6,46
Noviembre	6,92	7,53	6,34	7,15
Diciembre	6,19	5,97	6,88	4,17
Medio	**5,19**	**5,53**	**6,40**	**4,61**

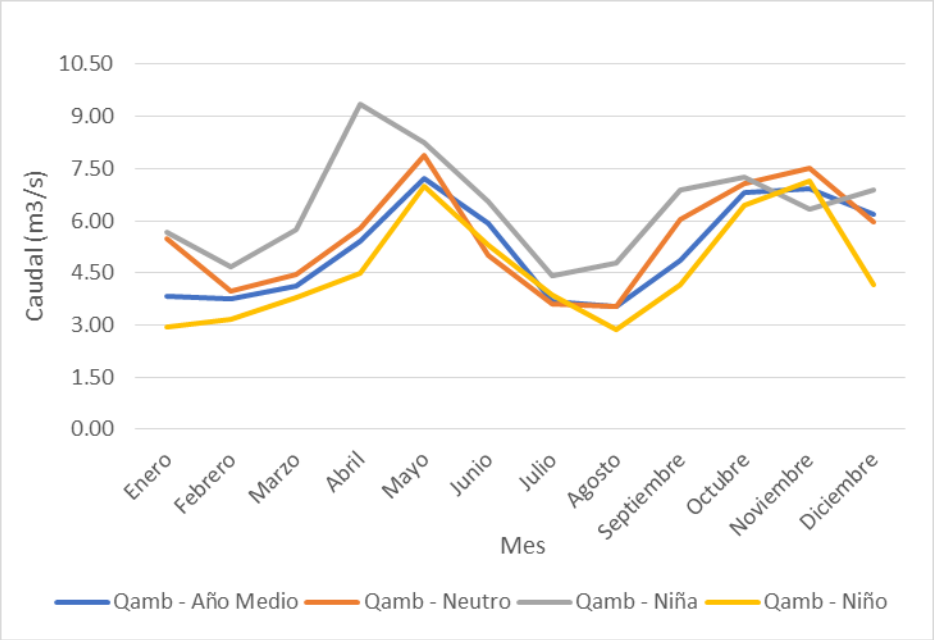


Figura 5-130. Q95% para diferentes condiciones hidrológicas, m^3/s

5.1.4.8.2 Caudal Ambiental por el método de Grecco modificado

A continuación, se presentan los resultados del caudal ambiental obtenidos aplicando la metodología de EPM (2012), la cual se basa en la metodología de Grecco (2005), para estimar el caudal ambiental en un punto de interés.

- Longitud del río con drástica reducción de caudal

Para determinar la longitud del río Cocorná que presentará una drástica reducción de caudal por la operación del proyecto, se calculó el caudal medio aportado por los afluentes del río en el tramo intervenido o con caudal reducido. En total se observaron 7 afluentes sin nombre con áreas tributarias menores a los 0,5 km^2 y caudales medios

menores a 47 L/s y tres afluentes permanentes de mayor magnitud conocidos como quebradas La Dolores, La Pisquina y La Rumbona, con un caudal medio de 285, 320 y 140 L/s respectivamente y áreas tributarias de 2,78; 3,02 y 1,24 km2 correspondientemente. Ver Tabla 5-125 y Figura 5-131.

Teniendo en cuenta que el caudal aportado por dichos afluentes (0,96 m^3/s), más el caudal aportado por zonas de escurrimiento directo (1,19 m^3/s, para un total de 2,13 m^3/s) no alcanza a sumar el 50% del Q95% (Q95% de 5,19 m^3/s, para un 50% de 2,59 m^3/s), la longitud del río **con drástica reducción de caudal, es igual a la longitud total del tramo comprendido entre la captación y la descarga.**

Tabla 5-125. Tributarios del río Cocorná en el tramo con caudal reducido

Subcuenca	Caudal (m^3/s)	Área Cuenca tributaria (km^2)	Margen del río
Q. Sin Nombre 2	0,012	0,12	Izquierda
Q. Sin Nombre 3	0,036	0,36	
Q. Sin Nombre 4	0,044	0,43	
Q. Sin Nombre 5	0,014	0,14	
Q. Sin Nombre 6	0,030	0,28	
Q. Sin Nombre 7	0,047	0,45	
Q. Sin Nombre 8	0,027	0,27	Derecha
Q. La Dolores	0,285	2,78	
Q. La Pisquina	0,14	3,02	
Q. La Rumbona	0,32	1,24	
Total	**0,955**	**9,09**	

Q: Quebrada.

Con una longitud de 3.702 m entre la captación del proyecto y la descarga de la generación, el factor ponderador según la metodología de Grecco modificada es de **5**.

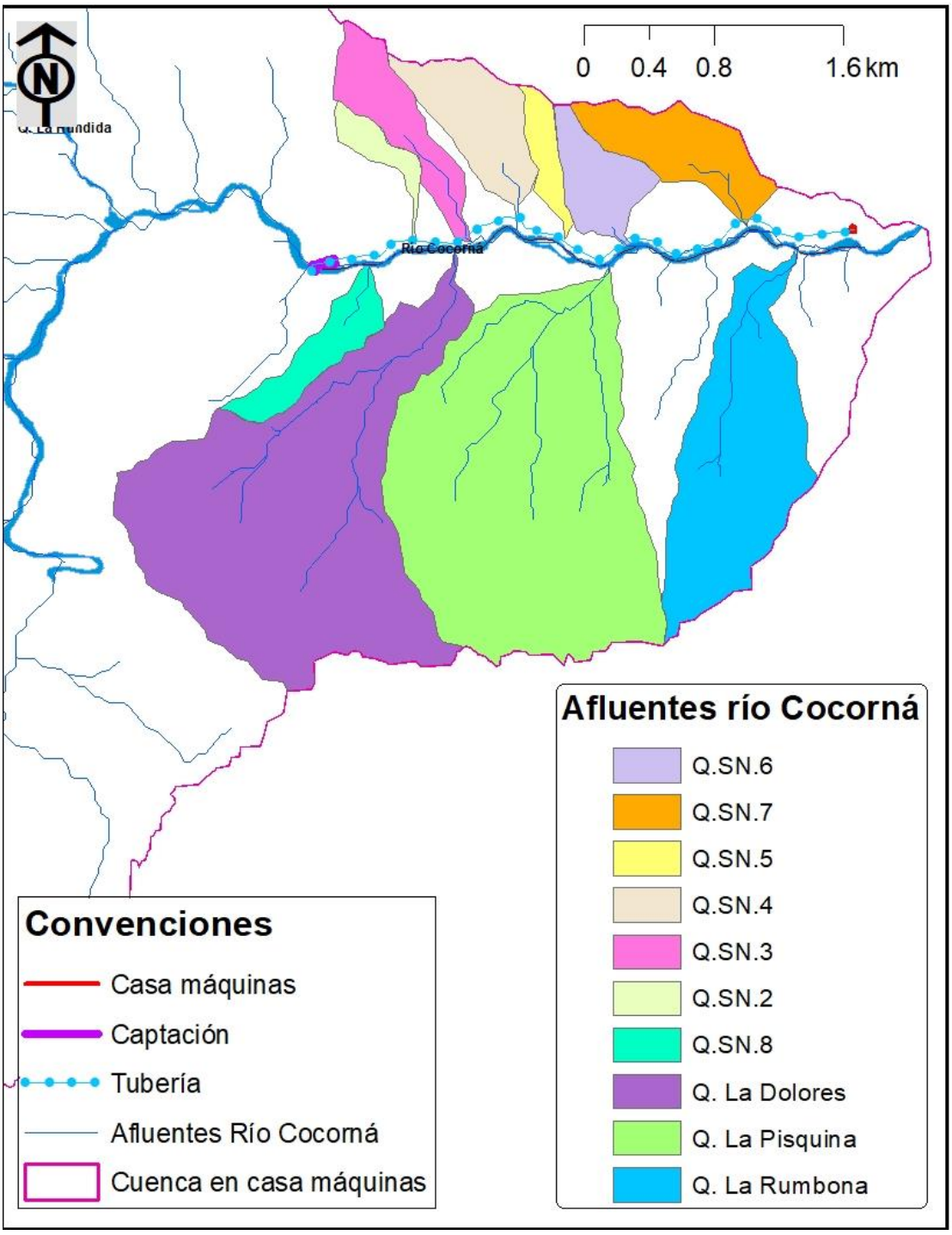


Figura 5-131. Principales afluentes del tramo con caudal reducido

- **Calidad del agua del río (Índice de calidad IFSN)**

Para evaluar la calidad fisicoquímica y microbiológica del Río Cocorná, en el tramo afectado por el proyecto, se tomaron muestras de agua en dos campañas diferentes, la primera realizada en noviembre del 2015 (temporada de invierno) y la segunda en septiembre de 2018 (temporada de transición verano-invierno), en varios puntos del tramo de río afectado por el proyecto: zona de captación, parte media del tramo con reducción de caudal y aguas abajo de la descarga. El detalle de los resultados en cada campaña de muestreo se presenta en la sección de Calidad del Agua de este informe.

De acuerdo con los resultados obtenidos para el cálculo del Índice de Calidad del Agua ICA, ver numeral 5.1.1.3 la calidad del agua del Río Cocorná es Buena en todos los puntos de muestreo y en ambas campañas de monitoreo. El principal factor de contaminación según los parámetros analizados y que fueron utilizados para calcular el ICA es la contaminación bacteriana (coliformes totales y fecales).

Para la calificación de la calidad del agua con la Metodología de Grecco modificada, se promediaron los resultados obtenidos en todos los puntos de muestreo y en ambas campañas de monitoreo, obteniendo un ICA promedio de 75,4 que caracteriza aguas de calidad buena, para un factor ponderador de **8**.

- **Requerimiento de agua para la dilución de carga contaminante que ingresa en el sector afectado (DQO)**

Para evaluar la demanda de agua para la dilución de contaminantes se requiere la concentración de oxígeno disuelto necesaria para degradar químicamente la materia orgánica (DQO). Además, mientras más contaminada este una fuente hídrica, mayor será la cantidad de agua necesaria para la dilución de contaminantes hasta valores que no afecte la sostenibilidad de los ecosistemas acuáticos, ni ponga en riesgo la salud de las personas que tengan contacto primario o secundario con la fuente hídrica.

En base a los resultados, ver Tabla 5-126, la demanda química de oxígeno en los puntos monitoreados en la campaña de invierno del año 2015 tiene un valor medio de 14,4 mg/L. En la transición del 2018 se obtuvo un valor medio de 32 mg/L. Para la selección del factor ponderador de Grecco se asumió la condición más desfavorable, es decir, se tomó el valor medio de los valores de la DQO del año 2018 con un factor ponderador de **8**.

Tabla 5-126. Resultados de la Demanda Química de Oxígeno en los puntos de muestreo sobre el río Cocorná

DQO (mg/L)				
Fecha muestreo	**Captación**	**Medio**	**Descarga**	**Promedio**
Noviembre de 2018 - invierno	19,8	11,6	11,9	14,4

DQO (mg/L)				
Semtiembre de 2018 – Transición	58,77	22,41	14,7	32,0
Promedio				**23,2**

- **Índice de Integridad Biótica de Peces (IIBpeces)**

El Índice de Integridad Biótica de Peces, calculado como el promedio de los tramos de muestreo (captación, tramo medio y descarga) para cada campaña de monitoreo, tiene un valor de 0,38 para el muestreo del 2015 y de 0,47 para el año 2018, ver Tabla 5-127.

Para seleccionar el factor ponderador de Grecco se asumió la posición más conservadora, es decir, aquella en la cual el río Cocorná tienen una mayor integridad biótica de peces (campaña del año 2018) y que por tanto requiere un mayor caudal de garantía ambiental para su conservación. De esta forma el factor ponderador de Grecco es de **5**.

Tabla 5-127. Índice de integridad biótica de peces. Noviembre de 2015

Métrica	0.2	0.6	1	Valor 2015	Puntaje
Porcentaje de Individuos Nativos (IN)	< 33%	33 – 67 %	> 67 %	0.900	0.2
Porcentaje de Especies Nativas (EN)	< 33%	33 – 67 %	> 67 %	25.00	0.2
Porcentajes de especies amenazadas (EA)	< 10 %	10 – 30 %	> 30 %	0	0.2
Porcentaje de individuos carnívoros (IC)	< 1 %	1 – 5 %	> 5 %	0	0.2
Proporción de Individuos con Anormalidades (IA)	> 5 %	1 – 5 %	< 1 %	0	1
Porcentaje de Individuos Omnívoros (IO)	> 45 %	10 – 45 %	< 10 %	99.1	0.2
Porcentaje de Individuos invertívoros (II)	< 25 %	25 – 80 %	> 80 %	0	0.2
Porcentaje de individuos detritívoros (ID)	> 50 %	10 – 50 %	< 10 %	0.900	1
Diversidad de SHANNON - WIENER (SW)	< 1.5	1.5 - 2.5	> 2.5	0.23	0.2
				Valor IIB Peces	**0.38**

Tabla 5-128. Índice de integridad biótica de peces. Septiembre de 2018

Metrica	0.2	0.6	1	Valor - 2018	Puntaje
Porcentaje de Individuos Nativos (IN)	< 33%	33 – 67 %	> 67 %	53.33	0.6

Metrica	0.2	0.6	1	Valor - 2018	Puntaje
Porcentaje de Especies Nativas (EN)	< 33%	33 – 67 %	> 67 %	40.00	0.6
Porcentajes de especies amenazadas (EA)	< 10 %	10 – 30 %	> 30 %	0	0.2
Porcentaje de individuos carnívoros (IC)	< 1 %	1 – 5 %	> 5 %	0	0.2
Proporción de Individuos con Anormalidades (IA)	> 5 %	1 – 5 %	< 1 %	0	1
Porcentaje de Individuos Omnívoros (IO)	> 45 %	10 – 45 %	< 10 %	93.3	0.2
Porcentaje de Individuos invertívoros (II)	< 25 %	25 – 80 %	> 80 %	0	0.2
Porcentaje de individuos detritívoros (ID)	> 50 %	10 – 50 %	< 10 %	6.7	1
Diversidad de SHANNON - WIENER (SW)	< 1.5	1.5 - 2.5	> 2.5	1.26	0.2
				Valor IIB Peces	**0.47**

- **Especies acuáticas amenazadas, que migran o se encuentran en peligro de extinción**

De acuerdo con la caracterización realizada, en el tramo que va a ser afectado por el proyecto, no se encontraron especies amenazadas, migratorias o endémicas, motivo por el cual el factor de ponderación de Grecco a considerar es de **0**.

- **Calidad biológica del agua (índice de calidad BMWP'/Col)**

Para evaluar la calidad hidrobiológica del Río Cocorná en el tramo que va a ser afectado por el proyecto se utilizó el índice Biological Monitoring Working Party - BMWP- para Colombia, el cual correlaciona la calidad del agua de la fuente hídrica con las poblaciones acuáticas de macro-invertebrados existentes.

El BMWP fue evaluado en los 3 tramos donde se monitoreo la calidad fisicoquímica y microbiológica del agua en las campañas de monitoreo realizadas en noviembre de 2015 y septiembre de 2018: sector de la captación, tramo medio del sector con caudal reducido y zona de descarga. Para mayor detalle de los organismos encontrados ver el Capítulo 5, Medio Biótico, apartado de Ecosistemas Acuáticos.

Los resultados obtenidos para el BMWP muestran valores de bio-indicación de calidad Buena a Muy Buena en captación (clase I aguas muy limpias y clase II agua limpias). En el tramo medio y en descarga la calidad encontrada es Buena (Clase II aguas limpias). Ver Tabla 5-129.

Tabla 5-129. Resultados de la aplicación del índice BMWP, en los tramos de muestreo del río Cocorná

Fecha	Tramo	Valor BMWP	Clase	Calidad	Característica	Ponderador Grecco
nov-15	CAP	115	II	Buena	Aguas limpias	8
	MED	120	II			8
	DES	174	I	Muy buena	Aguas muy limpias	10
sep-18	CAP	132	I			10
	MED	115	II	Buena	Aguas limpias	8
	DES	117	II			8

Cap: captación. Med: tramo medio. Des: descarga

Para le estimación del caudal de garantía ambiental se tomó el factor de ponderación más elevado (**10**), con el fin de aumentar los caudales ambientales mensuales del río y por tanto favorecer la protección y conservación de las especies de flora y fauna presentes.

- **Índice Biótico de Vegetación Riparia (IBVeg Rip)**

Los sitios de recolección de muestras para calcular el índice biótico de vegetación riparia, fueron ubicados considerando los sitios de muestreo de la fauna acuática, es decir, captación, tramo medio y descarga. El detalle de la metodología usada y de los resultados encontrados se presenta en el Capítulo 5 de Caracterización del Medio Biótico, sección Ecosistemas Acuáticos de este EIA.

Según los resultados encontrados en cada una de las parcelas (ver Tabla 5-130) y promediando dichos resultados para todo el tramo con caudal reducido, se obtiene un índice de vegetación riparia de 0,63 con Moderada Integridad Biótica y correspondiente a un factor ponderador de Grecco de **7**.

Tabla 5-130. Índice de Vegetación Riparia

Tramo	Parcela	IIBveg Rip	Descripción	Ponderador Grecco
Casa de Máquinas	1	0,54	Moderada integridad biótica	6
	2	0,63	Moderada integridad biótica	7
Tramo medio	3	0,66	Moderada integridad biótica	7
	4	0,5	Moderada integridad biótica	5
Captación	5	0,71	Moderada integridad biótica	8
	6	0,71	Moderada integridad biótica	8
Promedio IBVeg Rip		**0,63**	**Moderada integridad biótica (estado ecológico bueno para esta comunidad)**	**7**

- **Diversidad del Perifiton**

Según los resultados encontrados con los muestreos de invierno del 2015 para este índice, el agua del río Cocorná en el tramo analizado (entre captación y descarga) tiene una calidad que varía entre muy contaminada y medianamente contaminada, resultados que según lo observado en campo y el análisis de las demás variables bióticas y fisicoquímicas evaluadas, no son totalmente representativas de las condiciones bióticas medias del río Cocorná y más bien representan las condiciones particulares del muestreo realizado en invierno, donde debido a la condición de aguas altas se pudo ver reducida la cantidad y diversidad de los microorganismos encontrados, ver Tabla 5-131. Los monitoreos realizados en el año 2018 indican aguas medianamente contaminadas.

Con el fin de garantizar suficiente agua para la dilución de contaminantes y favorecer la preservación y protección de las especies acuáticas, se tomó un factor ponderador de Grecco de **7**, correspondiente a aguas que tienen un grado de contaminación media.

Tabla 5-131. Diversidad del Perifiton

Año	Tramo	Diversidad (H)	Calidad	Ponderador Grecco
2015	Captación	0,62	Aguas muy contaminadas	3
	Tramo Medio	0,70	Aguas muy contaminadas	3
	Descarga	1,17	Aguas medianamente contaminadas	4
2018	Captación	1,53	Aguas medianamente contaminadas	6
	Tramo Medio	1,89	Aguas medianamente contaminadas	7
	Descarga	1,73	Aguas medianamente contaminadas	6
	Promedio	**1,27**	**Aguas medianamente contaminadas**	**5**

- **Modificación del Paisaje**

Para el análisis de modificación del paisaje se consideró el escenario más conservador, es decir, aquel en el cual todo el tramo con caudal reducido puede ser visto en algún momento la fase de operación del proyecto, por la población del área de influencia o por visitantes de la zona. Esta consideración implica que los 3,7 km de longitud del tramo comprendido entre la captación y la descarga del proyecto son tenidos en cuenta para la selección del factor de ponderación de Grecco, el cual para dicha extensión tiene un valor de **4**.

- **Usos del agua en el sector con caudal alterado**

En el tramo con caudal reducido no hay concesiones de agua sobre el río Cocorná. Así mismo, en los recorridos de campo no se identificaron captaciones de agua sobre este ecosistema hídrico, lo que genera un resultado con un factor ponderador de 0.

Sin embargo, debido a que el río Cocorná y los charcos que allí existen, ubicados en el tramo con caudal reducido, configuran un espacio de encuentro e interacción social en torno al ecoturismo, el ocio y la recreación y, a que la población del municipio de Cocorná siente un fuerte arraigo por estos espacios naturales, la actividad turística y recreativa en el tramo de caudal reducido fue incluida dentro de la metodología usada para hallar el caudal ambiental.

Para la inclusión de estas variables se tuvo en cuenta si en el tramo afectado por el proyecto se realizaban este tipo de actividades y en caso afirmativo se asigna un valor ponderador de 10. Si no se realizan actividades turísticas ni recreativas el factor ponderador es de cero. Ver Tabla 5-132.

La modificación de la metodología Grecco, incluyendo las actividades turísticas y recreativas que tradicionalmente se han desarrollado en el río Cocorná, favorece la disponibilidad del recurso hídrico para este tipo de aprovechamientos.

Tabla 5-132. Parámetros de calificación la variable: Importancia de la actividad turística y recreativa

Aspecto ambiental	Metodología	Ponderador
Desarrollo de actividades turísticas y recreativas	Ausencia	0
	Presencia	10

Teniendo en cuenta lo explicado en los párrafos anteriores y que en el tramo analizado existen 13 charcos en los cuales se realizan con frecuencia actividades turísticas y de ocio, se asigna un factor ponderador de **10**.

El detalle de los charcos identificados en el trabajo de campo de este EIA se presenta en el numeral 5.1.4.9.5.

Los resultados de la evaluación de las 10 variables consideradas en la metodología de EPM (2012) se presentan en la Tabla 5-133.

Tabla 5-133. Calificación de variables para determinar el caudal de garantía ambiental (CGA)

Variable	Calificación	Justificación	Factor Ponderador (%)
Longitud del río con drástica reducción de caudal	5	Longitud = 3702 m	10
Calidad de agua del río (Índice de calidad IFSN)	8	WQI-NSF = 75,4	10
Requerimiento de agua para dilución de carga contaminante que ingresa en el sector afectado (DQO)	8	DQO = 32,0 mgO_2/L	10
Índice de Integridad Biótica de Peces (IIBpeces)	5	IIB = 0,47	10
Especies acuáticas amenazadas, que migran o se encuentran en peligro de extinción	0	No hay especies migratorias o amenazadas	10
Calidad biológica del agua (Índice de calidad BMWP'/Col)	10	BMWP = 136,3	10
Índice Biótico de la Vegetación Riparia (IBVeg Rip)	7	IBVeg Rip = 0,63	10
Diversidad del Perifiton	6	Diversidad H = 1,71	10
Modificación del paisaje	4	Longitud = 3702 m	10
Usos del agua en el sector con caudal alterado	10	Desarrollo de actividades turísticas y recreativas en el río	10
Total	**63**		**100**

De acuerdo con la calificación de variables realizada se obtiene un factor ponderador del 63%, el cual afecta la serie de caudales mínimos o caudales ecológicos naturales (Q95%) de la corriente en estudio que se presenta en la Tabla 5-134, para finalmente obtener el caudal de garantía ambiental mensual (QGA) que se presenta en la misma tabla, con un valor medio de 3,3 m^3/s. El requerimiento de agua para la dilución de contaminantes, la buena calidad fisicoquímica y biológica del agua y el uso recreativo del río en algunos puntos, fueron las variables que presentaron una mayor contribución en dicho factor. Factores de ponderación como el encontrado indican un impacto alto de la reducción del caudal sobre las condiciones naturales del cauce.

Tabla 5-134. Caudales de Garantía Ambiental para el tramo afectado por el proyecto hidroeléctrico Cocorná III

Mes	Caudal Medio mensual (m^3/s)	Caudal de Garantía Ambiental (EPM 2012) (m^3/s)	Q95% (m^3/s)
Enero	9,4	2,4	3,8
Febrero	9,6	2,4	3,7
Marzo	9,6	2,6	4,1
Abril	12,6	3,4	5,4
Mayo	15,0	4,5	7,2
Junio	12,4	3,7	5,9
Julio	10,3	2,3	3,7
Agosto	10,0	2,2	3,5
Septiembre	13,1	3,1	4,9
Octubre	13,1	4,3	6,8
Noviembre	12,4	4,4	6,9
Diciembre	10,6	3,9	6,2
Promedio	**11,5**	**3,3**	**5,2**

5.1.4.8.3 Caudal ambiental seleccionado

Los caudales ambientales para el proyecto se tomarán igual a los caudales de garantía ambiental encontrados con la metodología de EPM (2012) y que fueron mostrados en la Tabla 5-134**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**. El Caudal Ambiental medio es de 3,3 m^3/s, correspondiente a un 28,4% del caudal medio del río Cocorná en el punto de captación del proyecto.

Como se puede observar en la siguiente figura, el caudal ambiental mensual varía entre 2,2 m^3/s para el mes más seco (agosto) y 4,5 m^3/s para el mes más lluvioso (mayo).

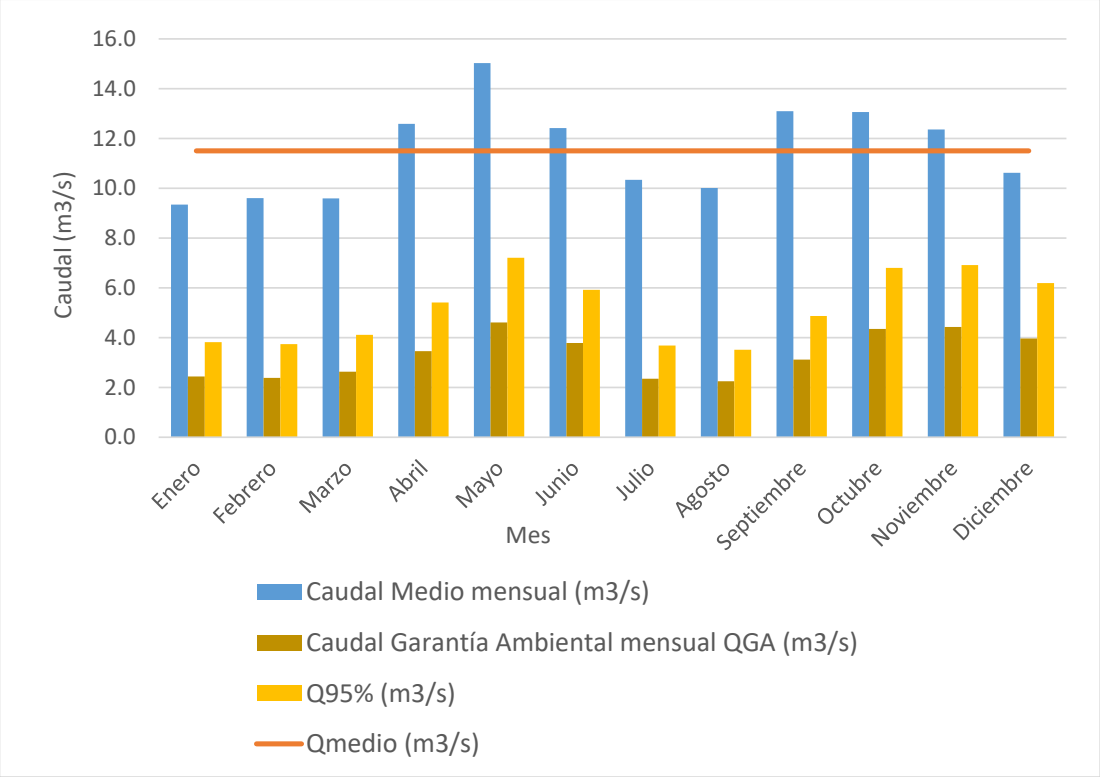


Figura 5-132. Ciclo anual de caudales medios, ecológicos naturales y ambiental para el tramo a intervenir por el proyecto

5.1.4.8.4 Caudal aprovechable y caudal remanente

El caudal aprovechable para el proyecto es calculado como el caudal medio del río Cocorná en la captación de la PCH, menos el caudal demandado por otros usuarios del río; que en este caso es 0, menos el caudal ambiental, el cual varía mes a mes de acuerdo con el Q95% y los caudales de garantía ambiental obtenidos con la metodología de Grecco modificada (ver Tabla 5-134). Dicho caudal tiene un valor medio de 8,19 m^3/s, con un mínimo de 6,66 m^3/s en diciembre y un máximo de 10,42 m^3/s en mayo. Ver Tabla 5-135 y Figura 5-133.

Tabla 5-135. Caudal mensual Aprovechable (Qapr) para el proyecto

Mes	Caudal Medio mensual (m^3/s)	Caudal Ambiental mensual (m^3/s)	Qamb/Qm (%)	Caudal aprovechable mensual (m^3/s)
Enero	9,4	2,4	25,8	6,94
Febrero	9,6	2,4	24,5	7,26
Marzo	9,6	2,6	27,0	7,01
Abril	12,6	3,4	27,1	9,18
Mayo	15,0	4,5	30,2	10,49

Mes	Caudal Medio mensual (m^3/s)	Caudal Ambiental mensual (m^3/s)	Qamb/Qm (%)	Caudal aprovechable mensual (m^3/s)
Junio	12,4	3,7	30,0	8,69
Julio	10,3	2,3	22,5	8,02
Agosto	10,0	2,2	22,1	7,80
Septiembre	13,1	3,1	23,5	10,02
Octubre	13,1	4,3	32,8	8,78
Noviembre	12,4	4,4	35,2	8,01
Diciembre	10,6	3,9	36,7	6,72
Promedio	**11,5**	**3,3**	**28,1**	**8,24**

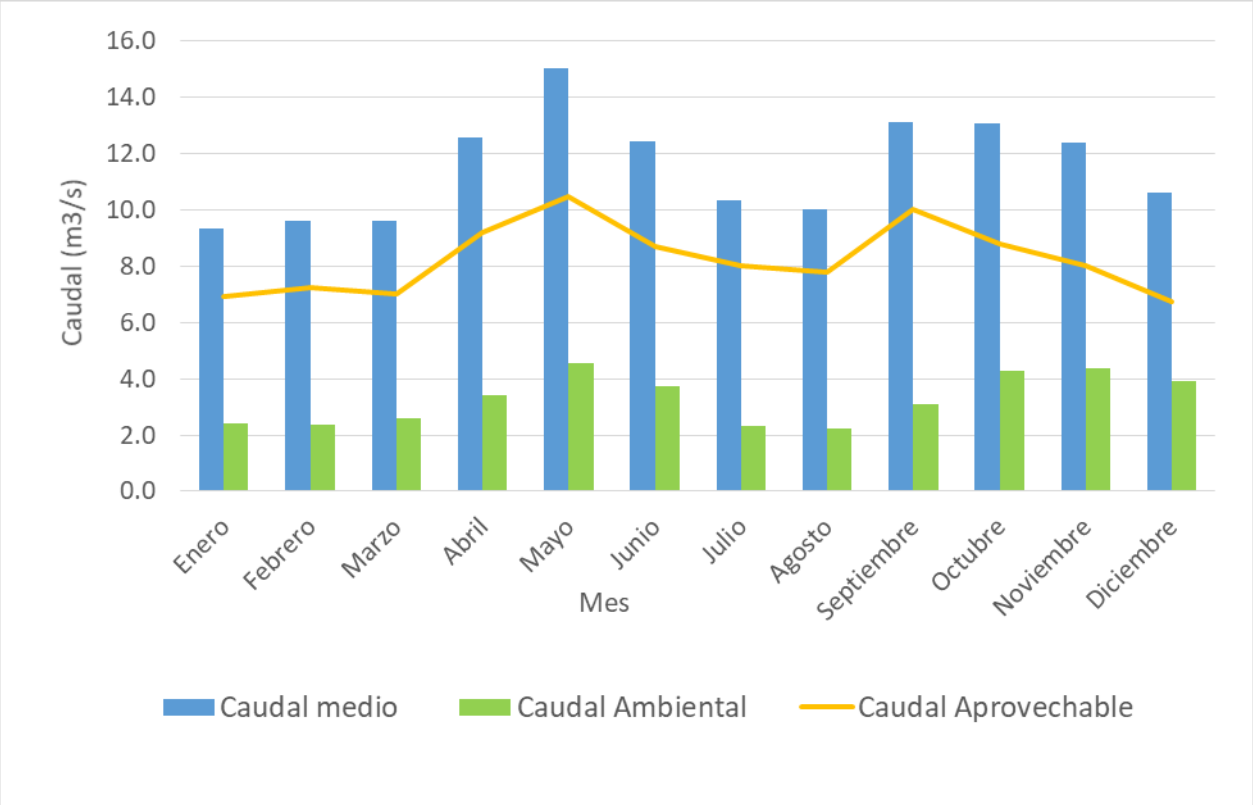


Figura 5-133. Caudal Aprovechable para el proyecto

El caudal remanente está compuesto por el caudal ambiental más el caudal demandado por otros usuarios en el tramo afectado por el proyecto, que para este caso es de 0 L/s, dejando como caudal remanente promedio un valor de 3,3 m^3/s y mensual los valores presentados en la columna Caudal Ambiental Mensual de la tabla anterior.

Es importante resaltar que en caso de que el caudal en el río exceda el caudal de diseño de la PCH, los caudales de excedencia serán retornados al cauce en el mismo punto de captación, aumentando el caudal en el tramo intervenido por el proyecto.

Así mismo, además del caudal remanente medio de 3,3 m^3/s, en este tramo se tendrá el caudal aportado por los afluentes del río Cocorná en el tramo intervenido por el proyecto, ver Tabla 5-125, más el caudal de las zonas de escurrimiento directo. En total el aporte medio entre la captación y la descarga del proyecto es de 2,13 m^3/s.

El caudal del río Cocorná, teniendo en cuenta los aportes realizados por las afluentes antes mencionados y que fueron presentados en la Figura 5-131 además de las zonas de escurrimiento directo al río, sin proyecto y con proyecto, se presenta en la Tabla 5-136.

Tabla 5-136. Caudal del río Cocorná en diferentes puntos de interés en condiciones sin proyecto y con proyecto

Punto de interés	Condiciones sin proyecto		Condiciones con proyecto
	Caudal medio (m^3/s)	Caudal río Cocorná (m^3/s)	Caudal remanente (m^3/s)
Captación	11,530	11,532	3,300*
Drenaje SN 2	0,012	11,543	3,312
Drenaje SN 3	0,036	11,580	3,348
Drenaje SN 4	0,044	11,623	3,392
Drenaje SN 5	0,014	11,638	3,406
Drenaje SN 6	0,030	11,668	3,436
Drenaje SN 7	0,047	11,715	3,483
Drenaje SN 8	0,027	11,742	3,510
Q. La Dolores	0,285	12,027	3,795
Q. La Pisquina	0,320	12,347	4,115
Q. La Rumbona	0,140	12,487	4,255
Afluentes directos	1,178	13,665	5,433
Caudal antes de la descarga	13,665	13,665	5,433
Caudal recuperado entre Captación-CM	2,133	2,133	2,133

*: Caudal ambiental promedio

5.1.4.9 Dinámica fluvial del río Cocorná

La dinámica fluvial de una corriente está definida por dos factores principales. El primero consiste en la morfología fluvial, la cual resume el comportamiento histórico

hidrológico y de transporte de material en el cauce del río, condiciones que derivan en la formación de determinado tipo de cauce. El segundo factor es la hidrología, la cual describe los regímenes de los caudales medios, máximos y mínimos actuales en el cauce estudiado.

El aspecto hidrológico se detalla en los numerales 5.1.4.5, 5.1.4.6 y 5.1.4.7 de este informe. A continuación, se describen los principales aspectos morfológicos del tramo afectado del río Cocorná por la intervención de la PCH Cocorná III.

Para caracterizar la morfología fluvial de dichas corrientes se utilizó el método propuesto por Rosgen (1997), en el cual, la dinámica fluvial de los ríos, se clasifica según la relación de estrechamiento ("*Entrenchment Ratio*"), la relación Ancho/Profundidad ("*Width/Depth*"), la sinuosidad del cauce ("*Sinuosity*"), la pendiente del fondo ("*Slope*") y el material de conformación del fondo ("*Bed Rock*").

5.1.4.9.1 Parte 1: Clasificación de la corriente Nivel I

El nivel de clasificación I propuesto por Rosgen (1997) cumple con las siguientes funciones:

- Prever la integración inicial de las características de la cuenca, tipo de valle y formas de relieve con la morfología de la red de drenaje.
- Proporcionar un marco coherente para asociar la información del río y relacionarla con aspectos básicos de morfología de ríos. El Mapeo de atributos fisiográficos en el Nivel I puede determinar rápidamente la localización y el porcentaje aproximado de tipos de ríos dentro de un tipo de cuencas y/o valle.
- Ayudar en el establecimiento de prioridades para la realización de evaluaciones más detalladas (ej. estudios de riesgo, estudios de inundaciones y avenidas torrenciales).
- Correlacionar caracterizaciones generales de otras variables como hábitat de los peces, las categorías de navegación fluvial y hábitats de ribera con las características de las corrientes (definidas en este sistema de clasificación).

La ventaja de una clasificación amplia (general), es que permite una delimitación inicial y rápida de los tipos de flujo y muestra la distribución espacial de estos dentro del área de estudio. En la Figura 5-134 se muestra la clasificación de Rosgen (Rosgen & Silvey, 1996) Nivel I, la cual se realiza mediante la relación entre la pendiente, la sección transversal y el alineamiento horizontal del río.

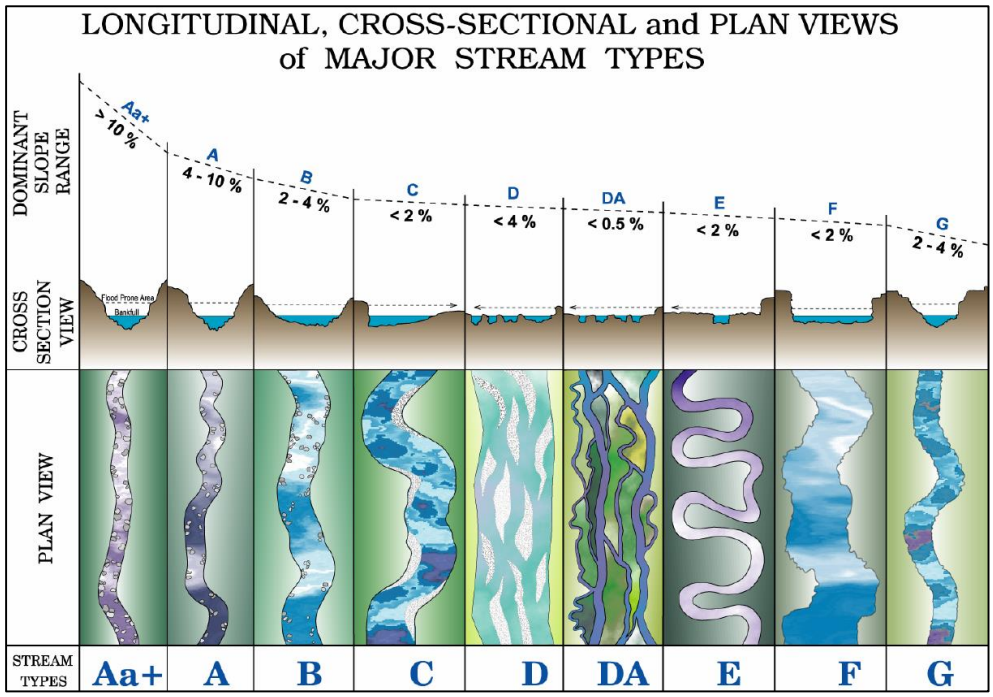


Figura 5-134 Clasificación de una corriente de agua según la pendiente de fondo, la sección transversal y el alineamiento horizontal. Tomado de (Rosgen & Silvey, 1996)

En la Figura 5-135, Figura 5-136 y la Foto 5-3 se muestra el perfil longitudinal y algunas secciones del cauce del río Cocorná, con el objetivo de asociar el tramo afectado a una clasificación morfológica que permita inferir acerca de la dinámica fluvial del río. El río Cocorná, hasta el sitio de descarga de la PCH, presenta altas pendientes, mayores al 4%, poca sinuosidad y un cauce encañonado.

Asociando la información del río extraída a partir del levantamiento topográfico y visitas de campo, a la clasificación propuesta por Rosgen, el río Cocorná se enmarca en la clasificación de una corriente con tramos tipo “Aa+” y “A”.

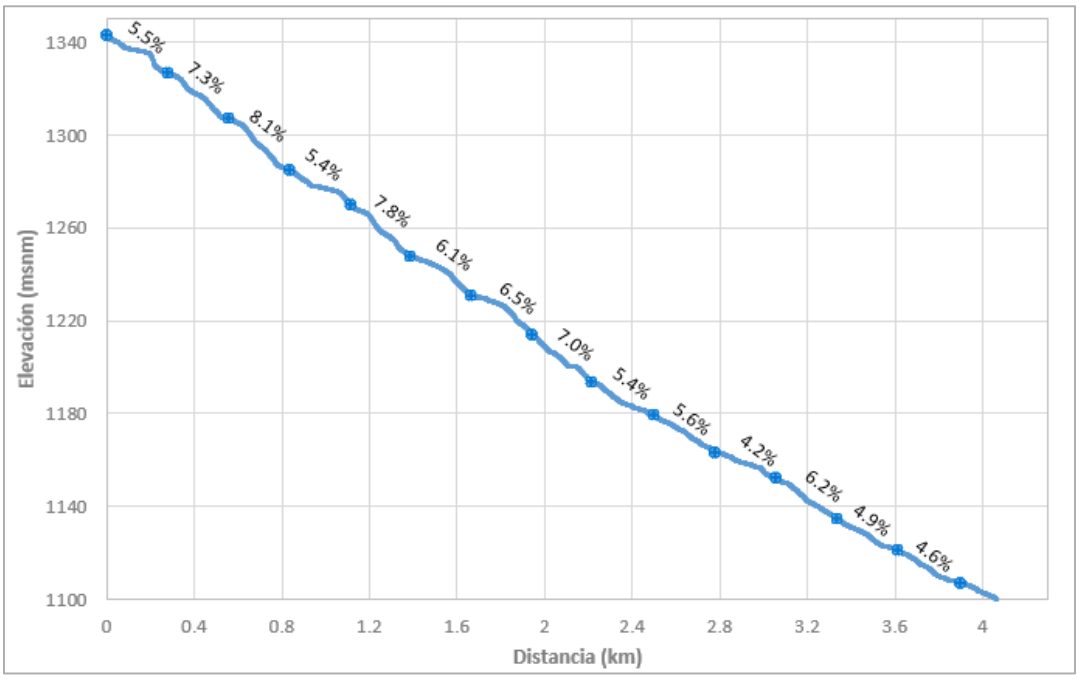


Figura 5-135 perfil del río Cocorná en el tramo afectado por el Proyecto Hidroeléctrico Cocorná III.

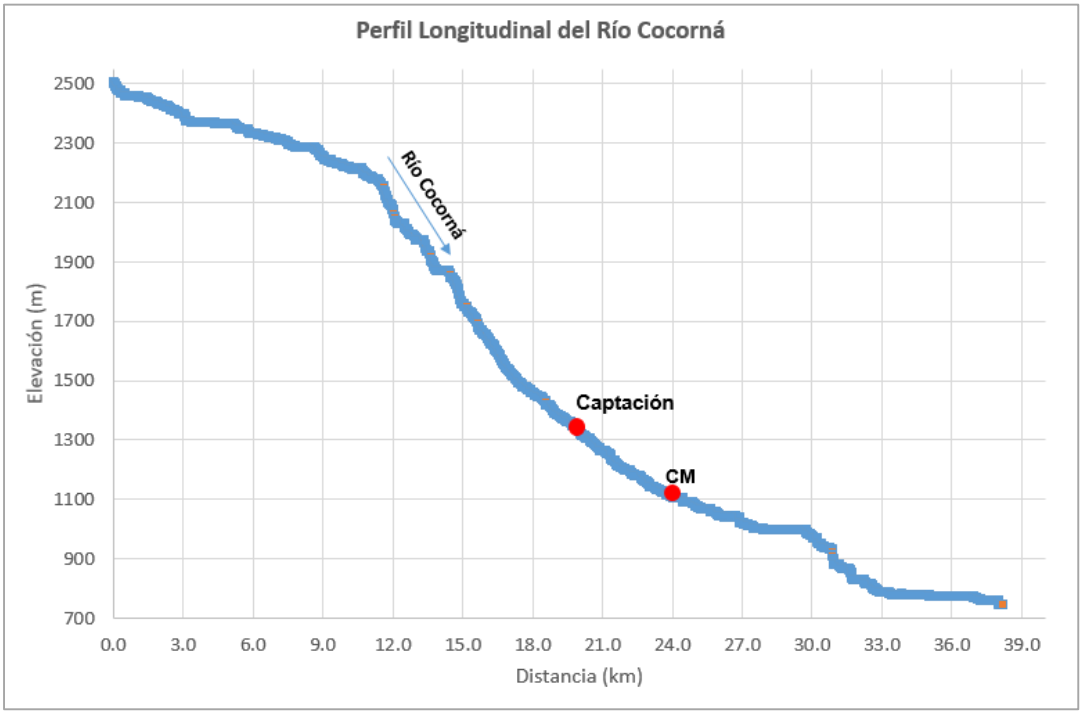
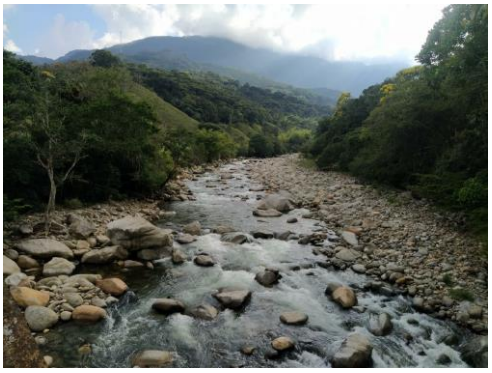


Figura 5-136. Perfil longitudinal del río Cocorná desde su nacimiento hasta su desembocadura al río Calderas

Vista hacia aguas abajo desde el puente colgante de la vereda Mazotes

Vista hacia aguas arriba desde el puente colgante de la vereda Mazotes



Vista hacia aguas arriba puente sector Las Arenosas

Tramo medio. Sector con caudal reducido

Foto 5-3. Cauce del río Cocorná en el tramo afectado por el Proyecto Hidroeléctrico Cocorná III.

Las corrientes tipo “Aa+” se caracterizan por tener una pendiente muy alta (> 10%), un cauce encañonado, una relación ancho/profundidad baja y estar totalmente confinada (lateramente contenida[1]). Las formas del lecho tienen una morfología de caída/piscina con vertederos, flujos de escombros, y cascadas. A menudo se producen en zonas de flujos aluvio-torrenciales, zonas de depositación profunda o terrenos estructuralmente controlados, o influenciados por fallas, diaclasamientos u otras zonas de contacto estructural.

Las condiciones de flujo con el caudal de banca llena, son generalmente torrenciales o de cascada. El material de conformación del cauce suele estar asociado al basamento rocoso, zonas de depositación profunda y/o zonas profundamente incisadas en suelos residuales.

1 No hay procesos de socavación (erosión) que puedan llegar a cambiar el alineamiento horizontal del cauce.

Una corriente de tipo "Aa+" se puede describir como un sistema de alta energía y de alto suministro de sedimentos debido a sus altas pendientes y secciones transversales estrechas y profundas. Generalmente, se encuentran en valles tipos I, III y VII. Ver Figura 5-137.

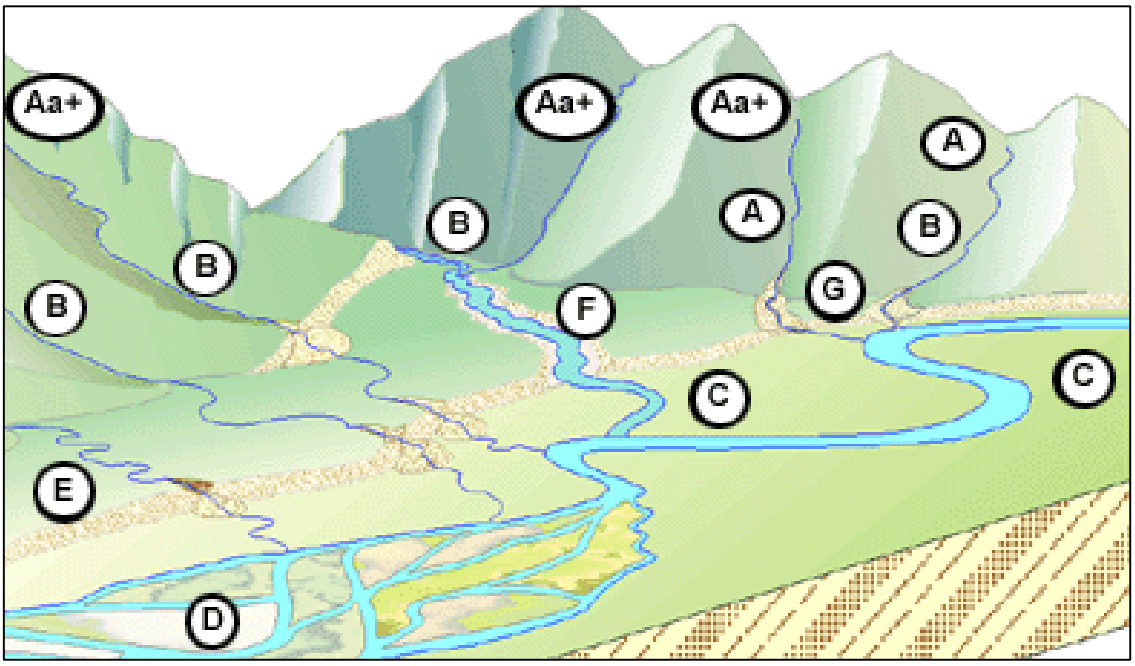


Figura 5-137 Tipo de cauces y valles asociados a las diferentes formas del terreno.

El tipo de corriente “A” es similar al descrito para el tipo “Aa+”, en términos referidos a aspectos del relieve y características del cauce; siendo la excepción las pendientes del fondo que varían de 4 a 10%, y que el flujo de caudal a banca llena es de tipo caída/piscina (con piscinas profundas). Generalmente, se encuentran en valles tipos I, III y VII. La descripción de la morfología del valle según su tipo se presenta a continuación:

5.1.4.9.2 Parte 2: Morfología del valle en el tramo de interés para el proyecto

Cada tipo de corriente está asociada a determinadas formas de terreno, como se observa en la Figura 5-137.

Los valles tipo VII consisten en un relieve escarpado a moderadamente escarpado, con alta densidad de drenaje y un suministro alto de sedimentos. Las corrientes son muy incisadas en suelos residuales, coluviales o aluviales. Los suelos residuales provienen frecuentemente de rocas sedimentarias

Los valles tipo III son principalmente de naturaleza deposicional, con formaciones con características de abanicos aluviales o detritos coluviales, tienen pendientes de las vertientes del valle moderadamente empinadas o mayores a 2%.

Los valles tipo I, conocidos como cañones con taludes jóvenes, representan el tramo de análisis del proyecto PCH Cocorná III. Estos valles se caracterizan por tener forma en V, son confinados y generalmente están controlados estructuralmente y/o asociados a sistemas de fallas. Las elevaciones del relieve son altas, las pendientes del fondo del valle son mayores que 2%, y/o pueden ser pendientes fluviales altamente disectadas. Los materiales del lecho varían entre basamento rocoso a suelo residual como coluvión, flujos de lodos, depósitos de morrenas, entre otros materiales en las mismas condiciones de depositación. Ver Figura 5-138.

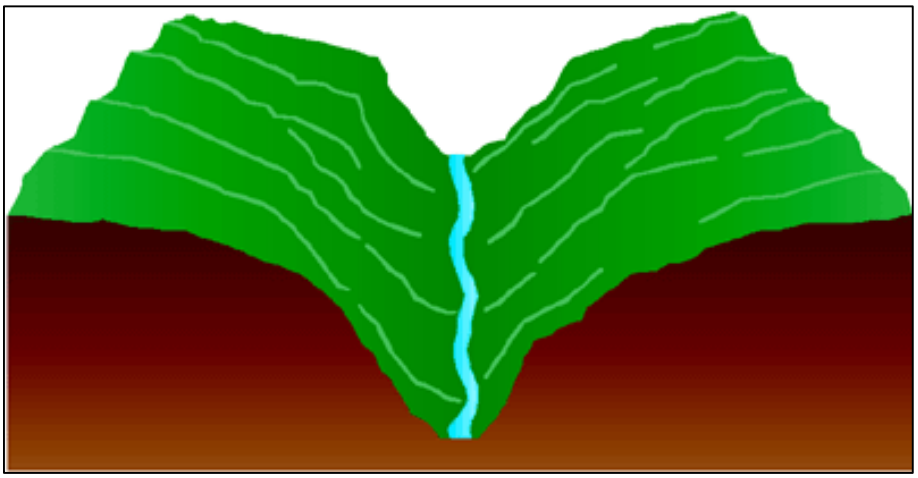


Figura 5-138 Valle tipo I (Rosgen).

Los tipos de ríos comúnmente observados en los valles Tipo I, son el tipo “A” y “G”; que típicamente son canales de caída/piscina con pendientes escarpadas, exhibiendo grandes caídas o cascadas. Los procesos erosivos varían de muy baja y estable a altamente erosionables, produciendo avenidas aluvio-torrenciales, o avalanchas.

5.1.4.9.3 Parte 3: Clasificación de la corriente Nivel II

La clasificación de la corriente según el Nivel II, requiere mediciones en campo de algunas de las características hidráulicas y morfométricas del cauce y del valle donde este se encuentra.

Los criterios usados para realizar la clasificación de la corriente en el Nivel II de Rosgen son la sección transversal del canal (relación ancho/profundidad de la lámina de agua, grado de contención vertical del canal, materiales dominantes en el canal), el perfil longitudinal de la corriente (pendiente, presencia de rápidos, pozas, escalones, cascadas, etc.) y el grado de sinuosidad del cauce.

Para el cauce del río Cocorná se tienen los siguientes resultados:

- La relación de estrechamiento (Entrenchment ratios - ER)

La relación de estrechamiento representa el grado de confinamiento vertical del cauce y se cuantifica como el cociente entre el ancho de la llanura de inundación sobre el ancho del cauce en condición de banca llena (ver Figura 5-147).

$$ER = \frac{Ancho\ del\ área\ propensa\ a\ inundaciones}{Ancho\ del\ canal\ a\ banca\ llena}$$

El ancho del área propensa a inundaciones se mide a una elevación que corresponde al doble de la profundidad máxima del canal a banca llena.

En el tramo con caudal reducido se estimó el radio de confinamiento en 4 tramos diferentes: captación, tramo medio parte superior, tramo medio parte inferior y casa de máquina y se encontró que en el río Cocorná, en el tramo de interés para el proyecto, esta relación se encuentras entre 1,4 y 1,7, lo que indica una corriente que se caracteriza por ser tipo A y B, ver Figura 5-147. Para el análisis se tomaron dos secciones características de cada tramo, en la Tabla 5-137 y Figura 5-139 a Figura 5-146 se presentan los resultados obtenidos, así como las secciones transversales analizadas por tramo, respectivamente.

- Relación ancho / profundidad (W/D)

La relación de ancho/profundidad se define como la relación entre el ancho de la superficie del cauce y la profundidad media del canal en condición de banca llena. Esta relación es clave para entender la distribución de la energía disponible en un canal, y la capacidad hidráulica para transportar sedimentos. De los criterios de clasificación, la relación W/D es el indicador más sensible y evidente sobre las tendencias a inestabilidad del canal; proporcionando una evaluación rápida y visual de la estabilidad de éste.

$$W/D = \frac{Ancho\ del\ canal\ a\ banca\ llena}{Profundiad\ media\ del\ canal\ a\ banca\ llena}$$

La variación espacial de la relación W/D a lo largo del cauce puede ser utilizada para interpretar cambios en la estabilidad del canal debido a perturbaciones (o controles) en el cauce o la cuenca.

La distribución de energía en un canal con una alta relación W/D (por ejemplo canales anchos y superficiales) es tal que se genera “estrés” en zonas cercanas a la banca. A medida que se incrementa el valor de W/D (canal más ancho y menos profundo) también aumenta el esfuerzo sobre las bancas y por ende la erosión de las mismas. El proceso de erosión acelerada generalmente es resultado de altos gradientes de velocidad y alto esfuerzo en las fronteras (bancas y fondo), mientras que la velocidad y el esfuerzo cortante disminuyen debido a la reducción de la relación W/D.

Al incrementar el suministro de sedimento, debido a la erosión en la banca, se produce un ensanchamiento del cauce, generando que, gradualmente, se pierda capacidad de transporte; esto a su vez, contribuye a la depositación y formación de

barras, que acelera la erosión en las bancas, constituyendo un ciclo que se repite a lo largo del cauce.

Específicamente en el tramo intervenido por el proyecto, se tiene una pendiente promedio de 5,8%, lo que favorece el desarrollo de altos gradientes de velocidad y baja depositación de sedimentos en las orillas o en forma de barras. La sección transversal media del río propicia una alta relación ancho/profundidad del canal a banca llena.

Para la determinación del ancho del canal y la profundidad del agua a banca llena, se consideró que las crecientes formadoras del lecho corresponden a un caudal con período de retorno de 2.33 años. Los resultados obtenidos para la relación W/D son característicos de corrientes tipo B o C. Ver Tabla 5-137, Figura 5-139 a Figura 5-146 y Figura 5-147.

Tabla 5-137. Resultados del análisis para la Clasificación de la corriente Nivel II

Parámetro	Tramo 1. Captación		Tramo 3. Tramo intermedio	
	Sección 110	Sección 120	Sección 70	Sección 80
Cota 2.33 años (msnm)	1325.5	1326.84	1187.22	1188.06
Cota interior terreno (msnm)	1323.23	1324.41	1185.19	1186.02
Ancho de canal a banca llena (2.33 años) (W) (m)	35.58	41.17	39.9	36.87
Profundidad máxima del canal (2.33 años) (m)	2.27	2.43	2.03	2.04
Profundidad media del canal a banca llena (D) (m)	1.53	1.60	1.13	1.31
Ancho (área propensa a inundaciones) (m)	48.71	69.77	47.33	49.07
Profundidad propensa a inundación (m)	4.54	4.86	4.06	4.08
Radio de confinamiento (ER)	1.37	1.69	1.19	1.33
Relación ancho/profundidad (W/D)	23.23	25.66	35.31	28.11
Parámetro	**Tramo 2. Tramo intermedio**		**Tramo 4. Descarga**	
	Sección 100	**Sección 110**	**Sección 130**	**Sección 140**
Cota 2.33 años (msnm)	1272.32	1273.06	1113.68	1113.56
Cota interior terreno (msnm)	1270.77	1270.77	1111.29	1112.01
Ancho de canal a banca llena (2.33 años) (W) (m)	53.26	47.54	54.79	56.54

Profundidad máxima del canal (2.33 años) (m)	1.55	2.29	2.39	1.55
Profundidad media del canal a banca llena (D) (m)	0.91	1.17	1.40	0.99
Ancho (área propensa a inundaciones) (m)	53.58	57.09	79.88	58.14
Profundidad propensa a inundación (m)	3.1	4.58	4.78	3.1
Radio de confinamiento (ER)	1.01	1.20	1.46	1.03
Relación ancho/profundidad (W/D)	58.53	40.63	39.10	57.28

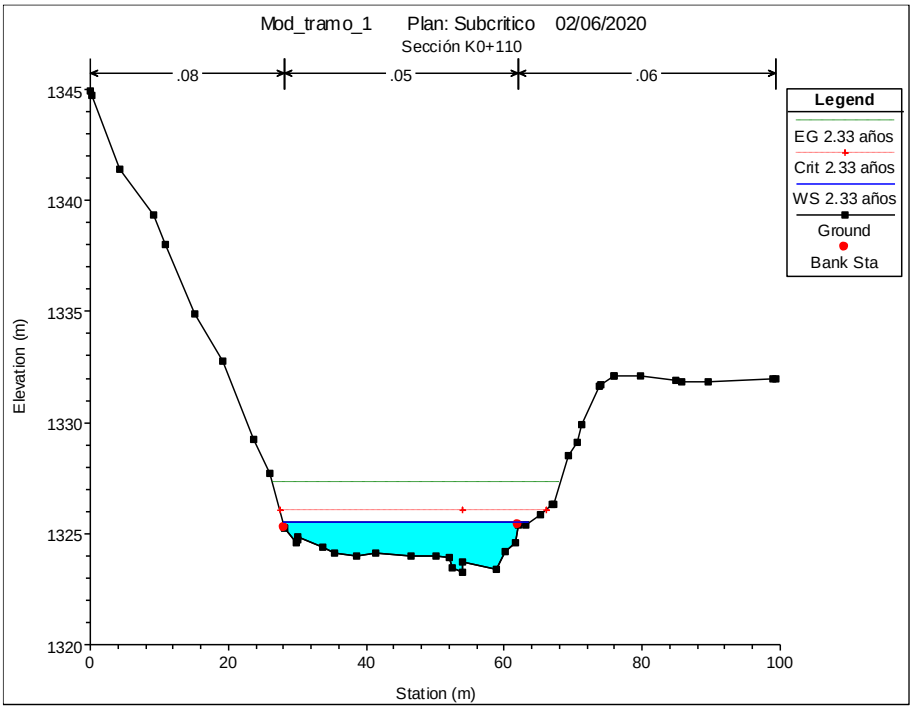


Figura 5-139. Sección transversal k0+110. Tramo Captación

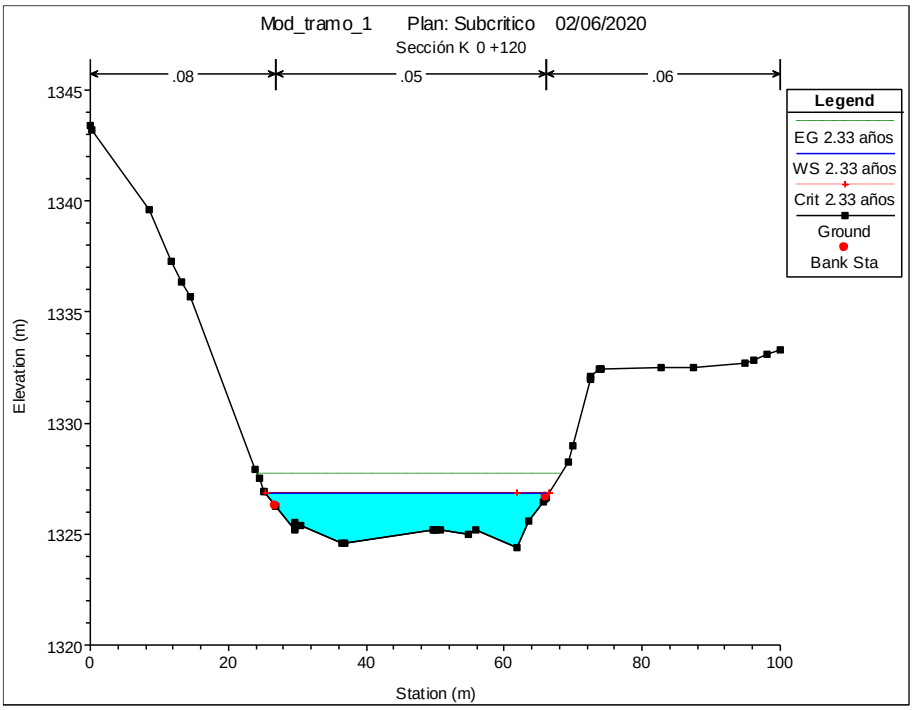


Figura 5-140. Sección transversal k0+120. Tramo Captación

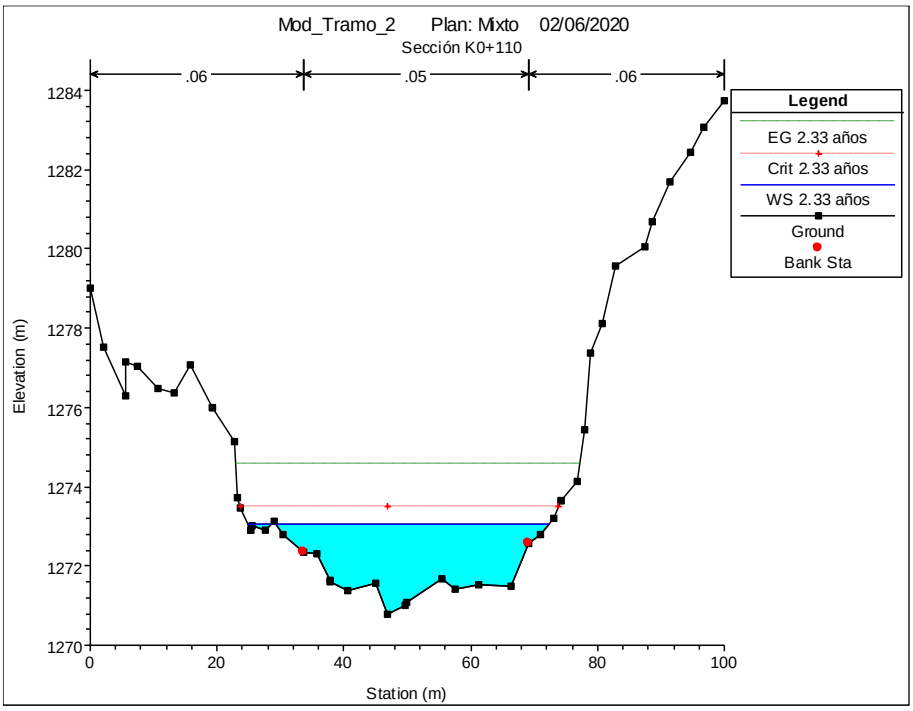


Figura 5-141. Sección transversal k0+110. Tramo medio superior

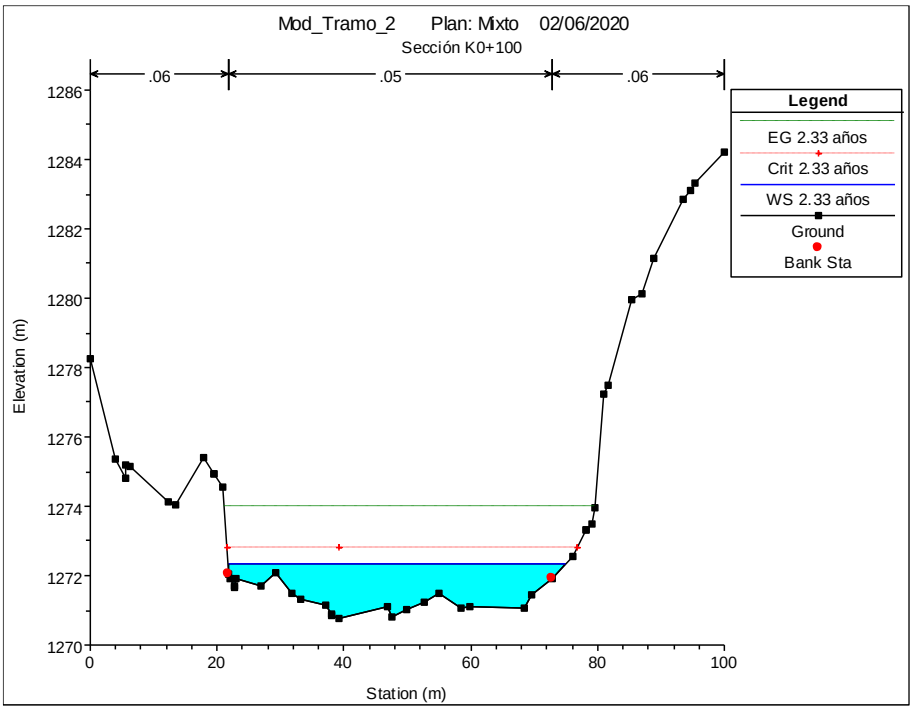


Figura 5-142. Sección transversal k0+100. Tramo medio superior

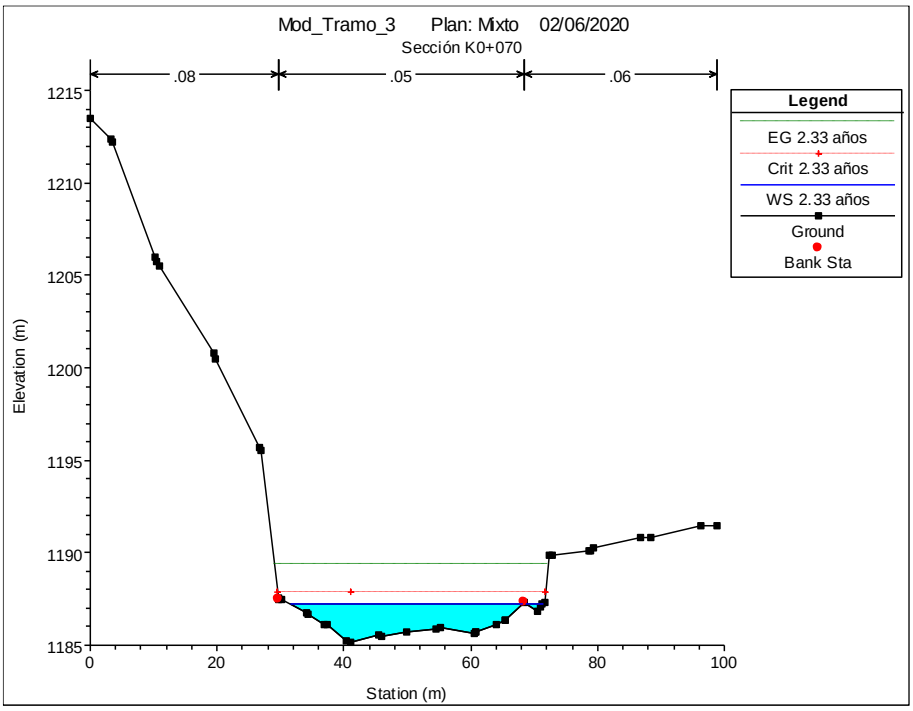


Figura 5-143. Sección transversal k0+070. Tramo medio inferior

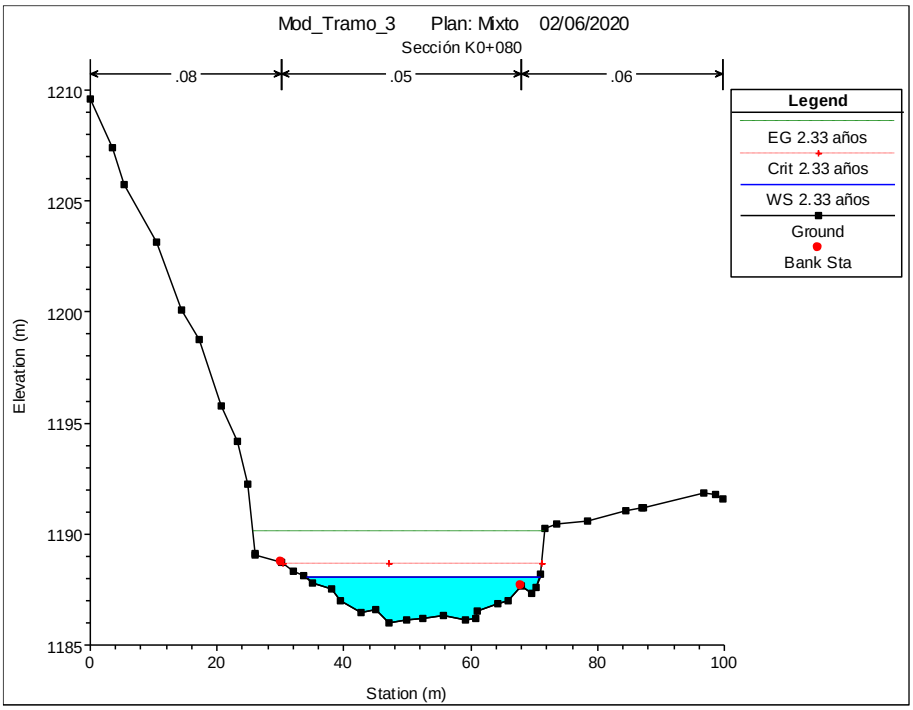


Figura 5-144. Sección transversal k0+80. Tramo medio inferior

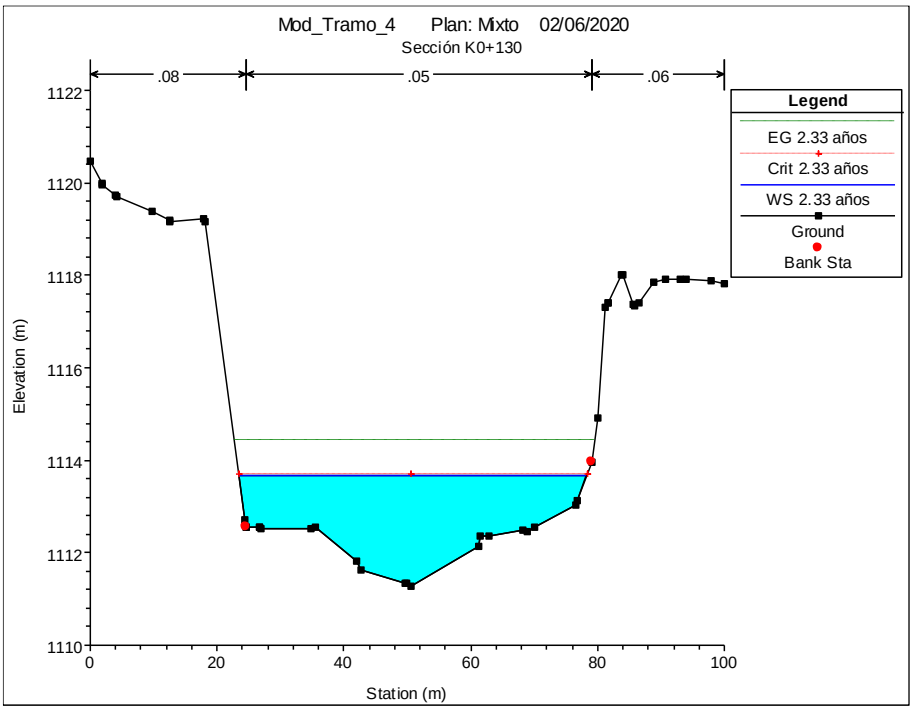


Figura 5-145. Sección transversal k0+130. Tramo Descarga

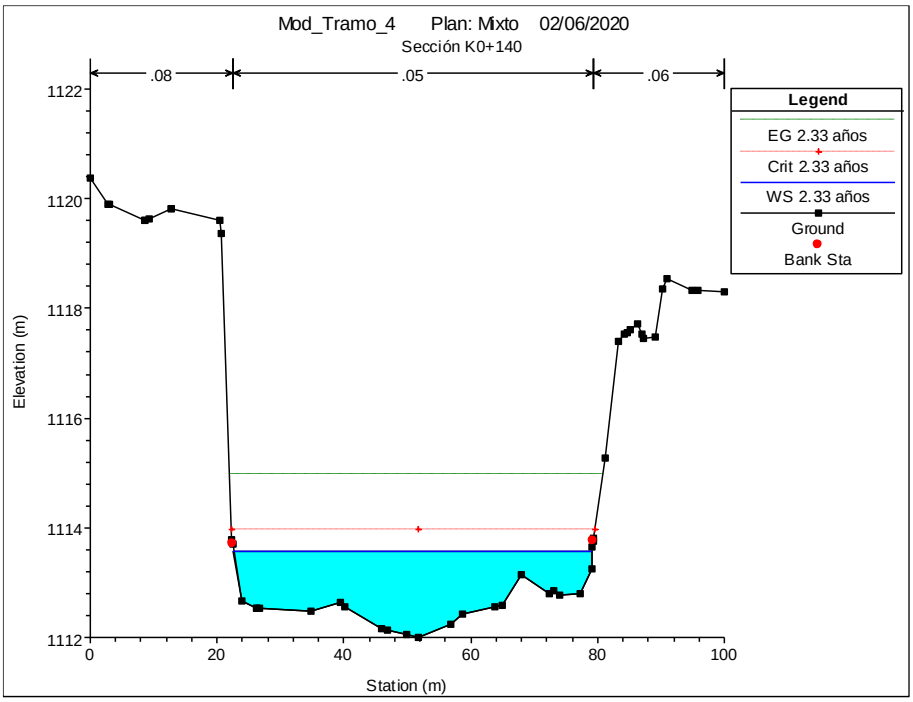


Figura 5-146. Sección transversal k0+140. Tramo Descarga

- Sinuosidad (Is)

Como se explicó anteriormente, la sinuosidad se calcula como la relación entre lo longitud total del cauce natural del río, sobre la longitud del valle en línea recta. Hasta la captación del proyecto se obtuvo un valor del Is de 1,49 y para toda la cuenca del río Cocorná de 1,64. De acuerdo con la clasificación de la corriente Nivel II de Rosgen el valor obtenido para el Is refleja una moderada sinuosidad del canal hasta la PCH y una mayor sinuosidad para la Cuenca del Río Cocorná hasta su desembocadura al río Calderas.

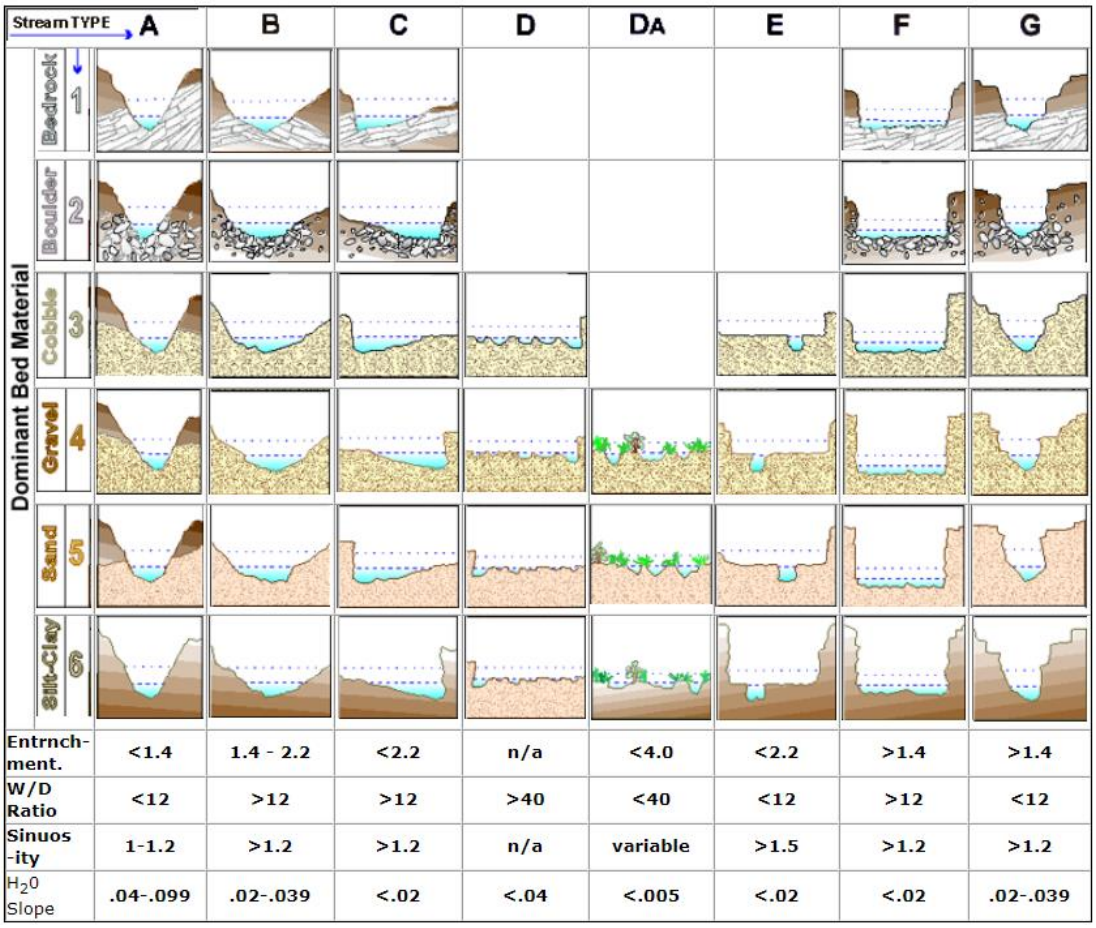
- Pendiente

La pendiente de la superficie del agua es una variable muy importante en la morfología del canal de un río y en sus funciones biológicas, de transporte de sedimentos y en el comportamiento hidráulico del cuerpo de agua. El análisis del perfil longitudinal proporciona información relacionada con la profundidad y velocidad de la lámina de agua, así como con el tamaño de las partículas del lecho del cauce, además permite hacer comparaciones de dichas características entre tramos diferentes del mismo río o entre tramos de ríos diferentes.

La pendiente se estimó utilizando la información del perfil longitudinal del río, donde, del modelo de elevación digital se obtiene el dato de elevación u ordenada y la distancia entre dos puntos proporcionó información de la abscisa. La pendiente del

río Cocorná tiene un promedio de 4,61% con sectores de altas pendientes con valores cercanos al 20% y sectores muy planos con pendientes cercanas al 0%. En el tramo con caudal reducido la pendiente promedio es del 5,8%.

En la Figura 5-147 se presenta el resumen de los parámetros de la clasificación Nivel II de Rosgen. Según los resultados obtenidos para las variables analizadas y la figura mencionada, la corriente del río Cocorná se puede clasificar como una corriente tipo B o C, dependiendo del tramo estudiado, con canto rodado (Boulder) como el material dominante del lecho del cauce.



Stream TYPE	A	B	C	D	DA	E	F	G
Entrnch-ment.	<1.4	1.4 - 2.2	<2.2	n/a	<4.0	<2.2	>1.4	>1.4
W/D Ratio	<12	>12	>12	>40	<40	<12	>12	<12
Sinuos-ity	1-1.2	>1.2	>1.2	n/a	variable	>1.5	>1.2	>1.2
H_20 Slope	.04-.099	.02-.039	<.02	<.04	<.005	<.02	<.02	.02-.039

Figura 5-147. Resumen de los parámetros de la clasificación Nivel II de Rosgen

Fuente: https://cfpub.epa.gov/watertrain/moduleFrame.cfm?parent_object_id=1253

5.1.4.9.4 Alteración de la dinámica fluvial en el río Cocorná

A continuación, se comparan las condiciones hidrológicas inalteradas del cauce (sin proyecto) con las condiciones alteradas, con el objetivo de cuantificar el efecto de la central sobre el régimen de caudales en el tramo del proyecto afectado.

Dado que en el tramo afectado no se encuentran aportes hídricos importantes por parte de los afluentes, se considera que la variación espacial de los caudales medios y máximos en el tramo es nula.

5.1.4.9.4.1 Caudales en condiciones naturales

En la Figura 5-148 y la Figura 5-149 se muestra la serie de caudales diarios y la curva de duración de caudales en el sitio de aprovechamiento de la PCH Cocorná III; la serie de caudales fue escalada con base en los registros de caudal de la estación limnigráfica “La Garrucha”. Para mayor detalle de la transferencia del caudal, consultar el numeral 5.1.4.6.

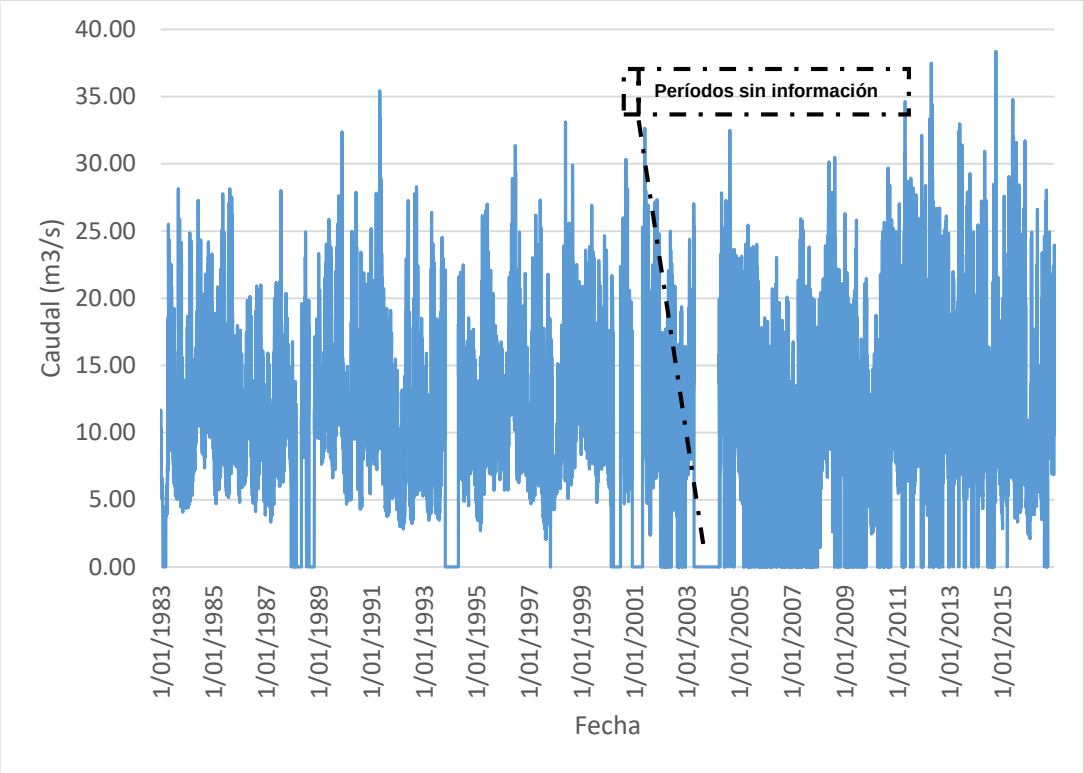


Figura 5-148. Caudales medios diarios en el sitio de aprovechamiento de la PCH Cocorná III.

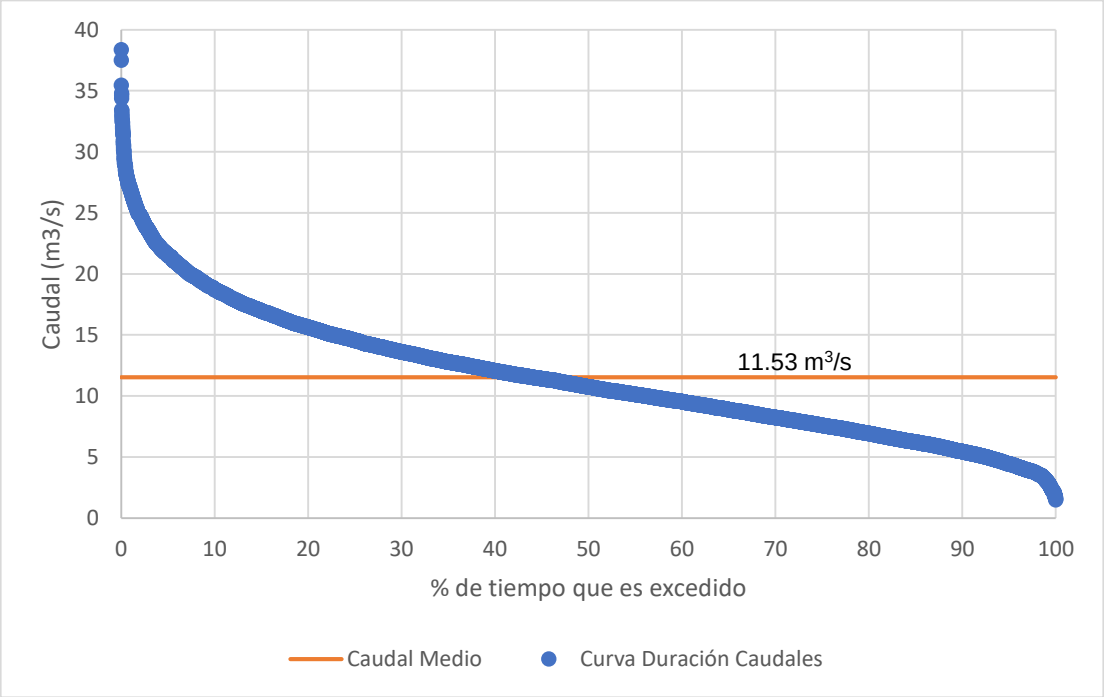


Figura 5-149. Curva de duración de caudales en el sitio de aprovechamiento de la PCH Cocorná III

5.1.4.9.4.2 Caudales en condiciones alteradas (intervención del proyecto)

En la Figura 5-150 se muestra el caudal remanente en el sitio de aprovechamiento de la PCH Cocorná III; es decir el caudal que queda en el río después de sustraer el caudal de generación en la central, respetando en todo momento el caudal ambiental definido para cada mes y que fue presentado en el numeral 5.1.4.8.3. Mientras que en la Figura 5-151 se muestra el caudal que se utilizaría para la generación de energía en la central.

De estas dos gráficas se concluye qué, el caudal promedio que permanecería en el río Cocorná durante la operación de proyecto es de 4,48 m^3/s, mientras que el caudal medio turbinado o usado para la generación de energía es de 7,07 m^3/s.

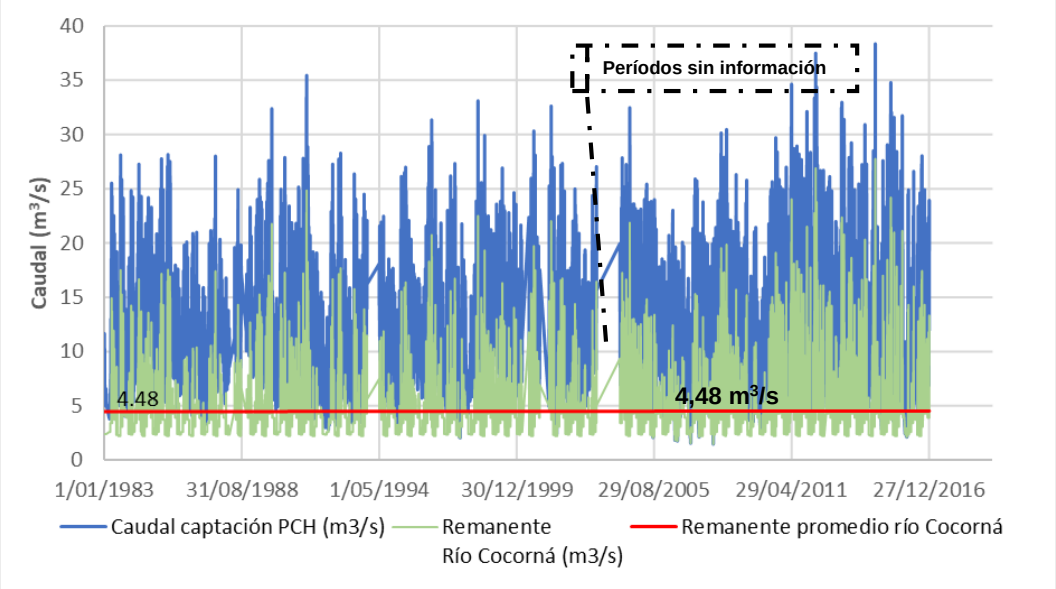


Figura 5-150. Caudales medios diarios remanentes en el río Cocorná, en el sitio de aprovechamiento de la PCH.

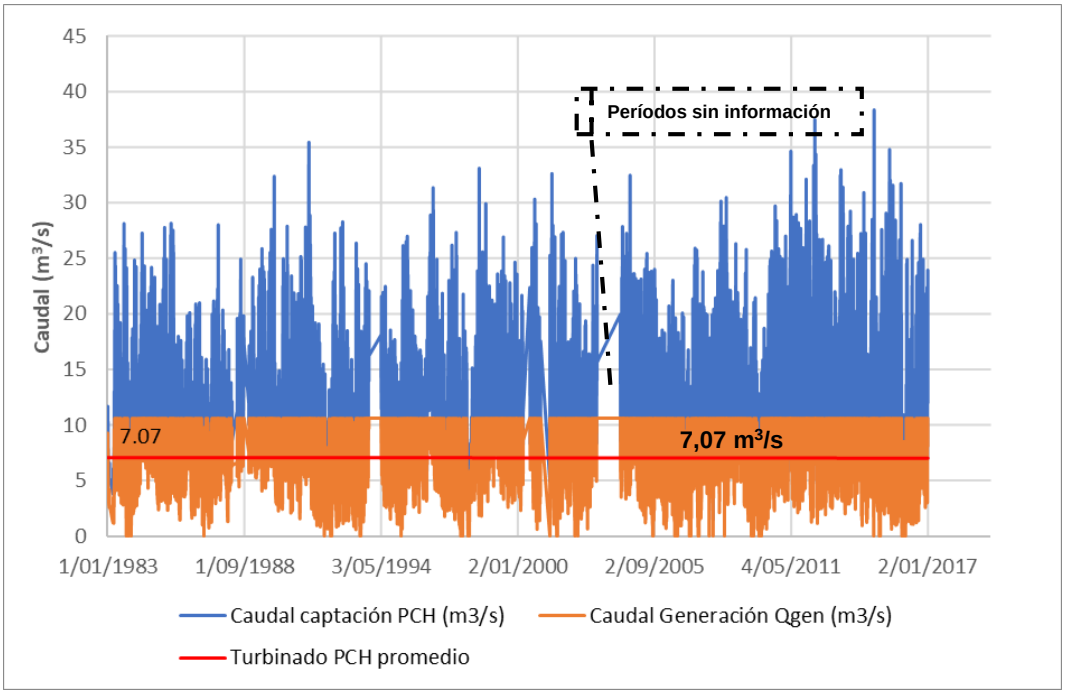


Figura 5-151. Caudales medios diarios turbinados en el sitio de aprovechamiento de la PCH Cocorná III.

En la Figura 5-152 se muestra la curva de duración de caudales “sin alterar”, generada con la serie de caudales transferida de la estación La Garrucha al sitio de captación;

la curva de caudales “remanentes” que corresponde a los caudales remanentes en el río cuando la central está operando y la curva de caudales turbinados, o de generación. Las tres curvas fueron estimadas en el sitio de aprovechamiento de la PCH. En la Tabla 5-138 se muestran los cambios en los cuartiles de la curva de duración de caudales, mientras que en la Tabla 5-139 se muestra el cambio en los caudales medios en el sitio de aprovechamiento de la PCH Cocorná III.

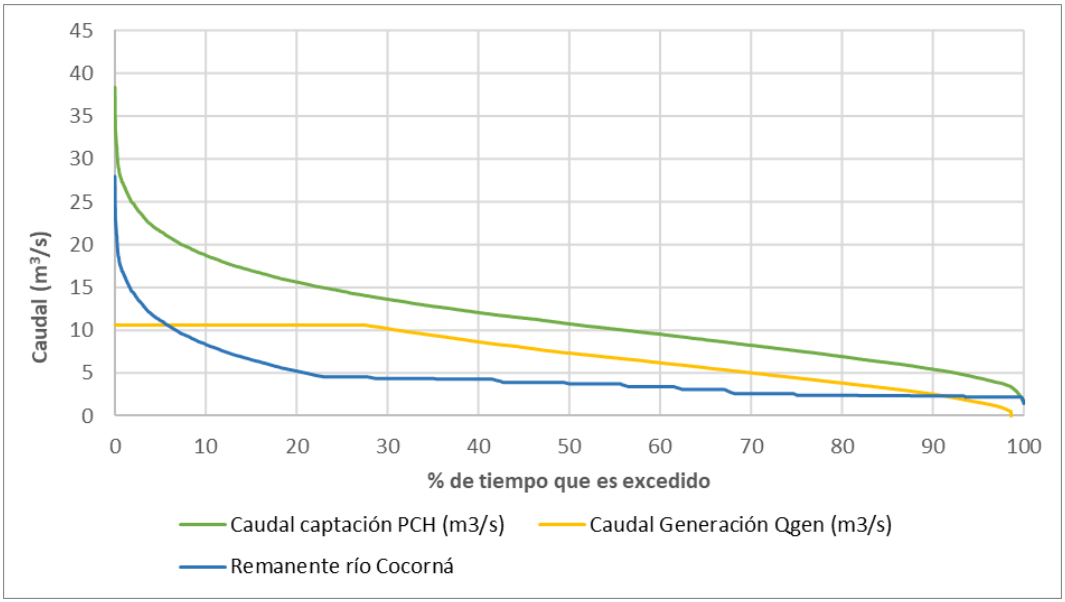


Figura 5-152. Curva de duración de caudales en el sitio de aprovechamiento de la PCH Cocorná III.

Tabla 5-138. Reducción de caudales en el sitio aprovechamiento de la PCH Cocorná III en la fase de operación del proyecto

Porcentaje Excedencia de tiempo (%)	Caudal captación PCH (m^3/s)	Caudal Remanente río Cocorná (m^3/s)	Porcentaje remanente (%)
5	21,5	11,1	51,7
10	18,7	8,3	44,5
15	17,0	6,6	38,7
20	15,6	5,2	33,5
25	14,6	4,5	31,2
30	13,6	4,4	32,0
35	12,8	4,4	34,1
40	12,1	4,3	35,5
45	11,4	3,9	34,2
50	10,7	3,8	34,9
55	10,1	3,7	36,8

Porcentaje Excedencia de tiempo (%)	Caudal captación PCH (m^3/s)	Caudal Remanente río Cocorná (m^3/s)	Porcentaje remanente (%)
60	9,5	3,4	35,7
65	8,9	3,1	34,6
70	8,2	2,6	31,5
75	7,6	2,4	32,0
80	6,9	2,4	34,8
85	6,2	2,4	37,8
90	5,4	2,3	42,6
95	4,4	2,2	50,1
100	1,5	1,5	100,0
Promedio			**40,3**

Tabla 5-139. Caudales en el tramo afectado por la PCH Cocorná III.

Caudal	Valor (m^3/s)
Caudal medio del río Cocorná en el sitio de captación de la PCH Cocorná III (condición actual)	11,53
Caudal medio turbinado por la PCH Cocorná III	7,06
Caudal medio remanente del río Cocorná en el sitio de captación de la PCH Cocorná III (en fase de operación del proyecto)	4,48

5.1.4.9.4.3 Análisis de la posible alteración del régimen natural de inundaciones

Dado que la PCH Cocorná III está concebida con una captación "a filo de agua" ("*run of the river*"), la variabilidad espacio-temporal de las inundaciones no se ven afectados por la presencia de las obras de la central, ya que:

- Durante las crecientes, dadas las altas concentraciones de sedimentos, se detiene la generación en la central. Cuando el caudal del río excede 4 a 5 veces el caudal de diseño de la central, se apagan las turbinas y la generación de energía se detiene.
- No se genera un embalse con regulación de volumen (nivel constante), por lo tanto, no hay un amortiguamiento de la creciente; vale la pena aclarar que se tiene un pondaje de 5.800 m^3 generado por la construcción del azud (vertedero de excesos) que permanece lleno el 100% del tiempo y que tiene una altura de 4 m.
- El vertedero de excesos tiene la capacidad hidráulica para evacuar un caudal de creciente asociado al período de retorno de 200 años (445 m^3/s).

Sin embargo, con el fin de probar las afirmaciones antes realizadas, se realizará un análisis de la capacidad hidráulica del río Cocorná considerando dos escenarios diferentes: la situación actual del cauce del río y la condición futura con la construcción de las obras del proyecto en las zonas de captación y descarga, en las cuales se realiza la intervención del cauce.

En la zona donde se estudia el proyecto denominado PCH Cocorná lll, se implementarán obras de infraestructura para el aprovechamiento energético, conformadas principalmente por una bocatoma, esta estructura es la encargada de tomar parte del recurso hídrico del río Cocorná, que luego será transportado por una tubería a presión desde aguas arriba hasta la parte inferior donde se encuentra la casa de máquinas, las obras para la generación de energía y el canal de descarga donde se retornará el agua turbinada al río Cocorná.

Teniendo en cuenta la proyección de las obras es necesario realizar varios estudios hidráulicos a lo largo de este tramo del río Cocorná: el primero consiste en la modelación de todo el tramo del proyecto con caudal reducido, para los escenarios con y sin proyecto; el segundo y el tercer análisis incluyen el estudio hidráulico de dos subtramos ubicados en el sector medio del tramo intervenido, donde se realiza la modelación sin proyecto y el cuarto análisis en el sector de la casa de máquinas.

Los resultados de la modelación hidráulica permiten identificar los tramos del río donde se puede presentar una alteración de su dinámica fluvial, debido a la construcción de las obras de captación y durante la operación de la PCH y, además, permiten verificar que las obras proyectadas no van a ser afectadas por inundaciones ni por avenidas torrenciales.

5.1.4.9.4.3.1 Información Topobatimétrica

La topografía de la zona del proyecto fue obtenida a partir de información del instituto geográfico Agustín Codazzi (IGAC) en escala 1:10.000, luego se realizó una interpolación para tener más detalle del tramo de estudio, además se levantaron secciones batimétricas con estación total en las zonas de mayor interés, donde se encuentra la bocatoma (aguas arriba), la casa de máquinas (aguas abajo) y dos tramos intermedios, para de esta manera obtener secciones trasversales que representen el terreno en condiciones reales.

5.1.4.9.4.3.2 Consideraciones para las modelaciones

- Hidrológicas

Los caudales máximos usados en el presente estudio fueron los estimados en la sección Hidrología, numeral 5.1.4.7.6 de este informe. A continuación se muestran los caudales máximos de diseño calculados en el informe de hidrología antes mencionado. Ver Tabla 5-140.

Tabla 5-140.Caudales máximos para diferentes periodos de retorno.

Período de Retorno (años)	Captación Caudal (m^3/s)	Casa de máquinas Caudal (m^3/s)
2,33	289,4	307,1
5	327,7	350,2
10	355,0	381,5
25	385,6	416,8
50	406,6	440,3
100	426,4	463,8
200	445,0	484,7
500	468,1	511,4

- Coeficientes de rugosidad de Manning

La rugosidad del cauce principal del río Cocorná fue estimada con base en la ecuación desarrollada por Cowan 1956 (Chow et al., 1994). En esta ecuación Cowan tiene en cuenta 6 variables diferentes para encontrar el coeficiente de rugosidad. Las variables involucradas en el análisis son: tipo de material del cauce, grado de irregularidad asociado a las rugosidades superficiales y al grado de erosión de las bancas, variaciones drásticas de la sección transversal, presencia de obstrucciones naturales o artificiales en el cauce, vegetación existente y existencia de meandros. El resultado obtenido con esta metodología fue comparado con valores reportados por otros autores en cauces de montaña (Jarrett, 1985), así como con valores tabulados que dependen del tipo de material del cauce (Chow et al., 1994) y fotografías con coeficientes calibrados (Barnes, 1967).

Se empleó un valor del coeficiente de rugosidad de Manning en el cauce principal de 0,050 y valores del coeficiente de rugosidad en las bancas y llanuras de inundación que dependen del tipo de cobertura natural presente o del uso del suelo (cultivos, pastos, guaduales, plantación, bosque denso, bosque de galería, etc) que varían entre 0,0232 y 0,09.

- Condiciones de frontera y condición de flujo

La profundidad normal, estimada como la pendiente promedio del fondo del canal entre las secciones más cercanas a la sección de frontera fue utilizada como la condición de contorno para el flujo mixto tanto para la condición actual como para la condición a implementar, la cual contempla las obras que se pretenden construir a lo largo del tramo de estudio. El tipo de flujo fue seleccionado teniendo en cuenta que el cauce tiene pendientes cercanas al 5% en todo el tramo analizado, lo que genera una predominancia de las fuerzas cinéticas con respecto a las gravitacionales debido a las altas pendientes.

5.1.4.9.4.3.3 Modelación hidráulica en el tramo con caudal reducido

Se procede a utilizar el programa HEC-RAS 4.1.0, para realizar el análisis computacional y numérico del recorrido del flujo en el tramo donde se proyectan las obras de la PCH Cocorná lll para la condición actual o sin proyecto y para la condición futura o con proyecto.

Como se dijo antes, para el tramo de estudio se usó información del IGAC y se sacaron secciones transversales al eje del río cada 50 metros, con un ancho de 100 metros en su gran mayoría, para un total de 92 secciones.

Una vez ingresadas las secciones transversales, la información de caudales para diferentes periodos de retorno, número de Manning y las condiciones de frontera, se procede a realizar la modelación hidráulica bajo la hipótesis de flujo uniforme en régimen mixto.

A continuación, se presenta el esquema del tramo a modelar (ver Figura-5-153).

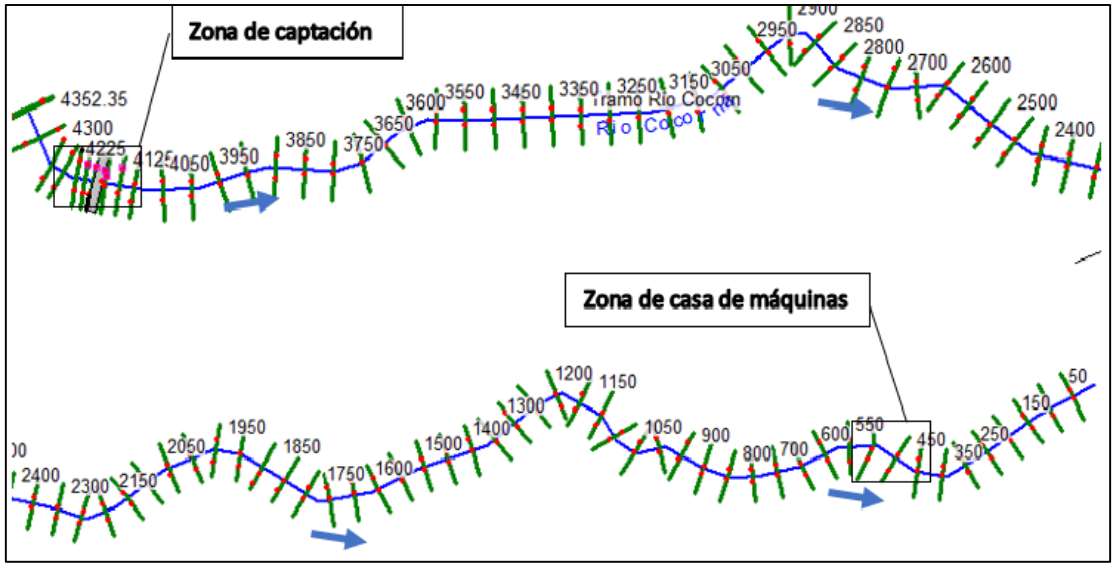


Figura-5-153 Esquema del tramo de estudio del río Cocorná

A continuación, se presentan los resultados obtenidos de la simulación hidráulica que arrojó el programa HEC-RAS 4.1.0, además se aclara que, aunque se realizó la modelación para ocho periodos de retorno diferentes, en este informe se presentarán los resultados para el periodo de retorno de 100 años. Los demás resultados se pueden consultar en el Anexo 5.1.7.2

Resultados

En la Figura 5-154 se presenta el perfil longitudinal del Río Cocorná del sector donde se ubicarán las obras de captación y derivación, para los caudales máximos “sin

proyecto". En la Figura 5-155se observa el perfil para los mismos caudales, pero "con proyecto". Al comparar los resultados obtenidos para cada uno de los caudales simulados, con y sin proyecto, se observa que las variaciones de la altura de la lámina de agua se dan principalmente en las secciones ubicadas aguas arriba del azud, hasta aproximadamente 150 arriba de esta obra y alrededor de 125 m aguas abajo. En el resto del perfil la altura de la lámina no varía al comparar los dos escenarios. Lo anterior se debe a que la PCH Cocorná III es un proyecto a filo de agua que genera un embalse casi despreciable y por tanto no genera una regulación de los caudales presentes en el río, dejando pasar sobre el azud todo el caudal que sobrepasa la capacidad de la captación, la cual está diseñada para un caudal de 15,1 m^3/s, correspondiente a la suma del caudal de diseño de la central (10,6 m^3/s) más el caudal ambiental mensual más elevado (4,5 m^3/s). Este último caudal es retornado al río Cocorná por la compuerta de descarga diseñada para tal efecto, la cual tiene una dimensión de 1 m x 1,0 m y se encuentra ubicada al lado de las rejillas de captación.

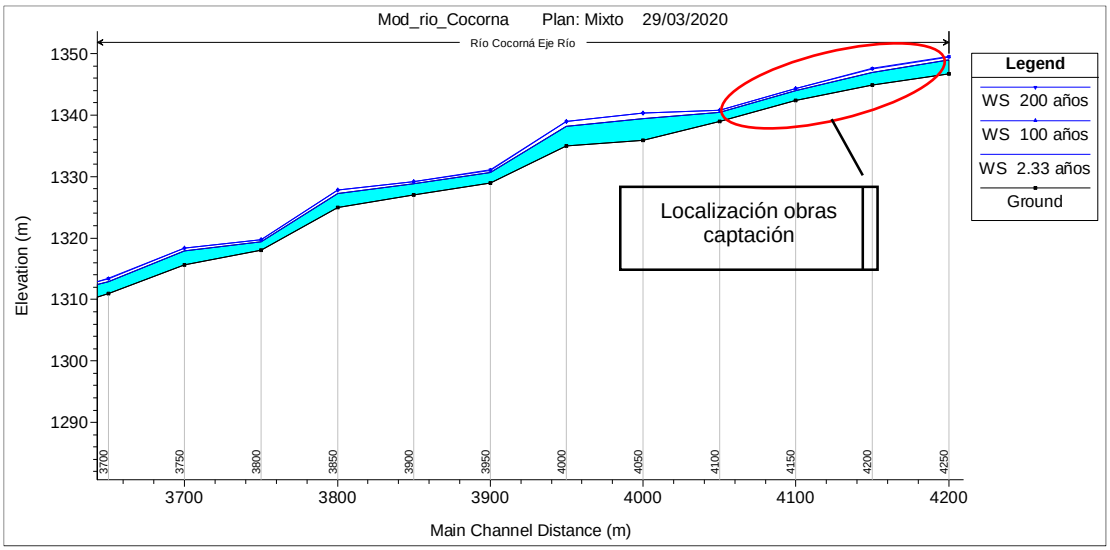


Figura 5-154. Perfil longitudinal del río Cocorná en el sector de captación, para caudales de diferentes períodos de retorno. Escenario sin proyecto

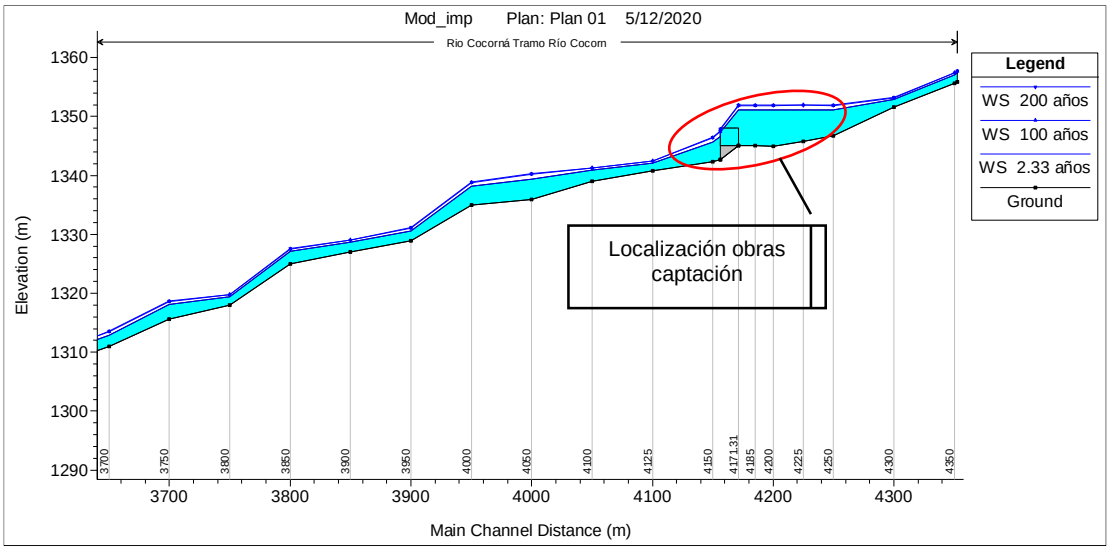


Figura 5-155. Perfil longitudinal del río Cocorná en el sector de captación, para caudales de diferentes períodos de retorno. Escenario con proyecto

De acuerdo a las tablas arrojadas por el software HEC-RAS para la modelación del tramo del río Cocorná bajo la hipótesis de flujo uniforme en régimen mixto, para el escenario sin proyecto, como se presenta en el Anexo 5.1.7.3, se puede analizar para un caudal de período de retorno de 100 años lo siguiente:

- Cada sección transversal fue corrida para los ochos periodos de retorno presentados en la Tabla 5-140.
- Los valores de velocidad máxima y mínima obtenidos con el software en el tramo de estudio son 12,99 m/s y 1,89 m/s respectivamente.
- Los valores del número de Froude que se presentan en el Anexo 5.1.7.3 oscilan entre 0,28 y 3,54 para el tramo en estudio. Pero los números de Froude que predominan son mayores a la unidad (1), esto quiere decir que en la mayor parte del tramo se tiene un flujo supercrítico, es decir, las ondas de una perturbación se propagan hacia aguas abajo, lo que implica que el flujo supercrítico tiene control aguas arriba (Instituto Nacional de Vías, 2009).

Para el escenario con proyecto se presentan en la Figura-5-156, Figura-5-157 y Figura-5-158, las secciones transversales a la altura de la zona de la bocatoma, las demás secciones se presentan en el Anexo 5.1.7.3.

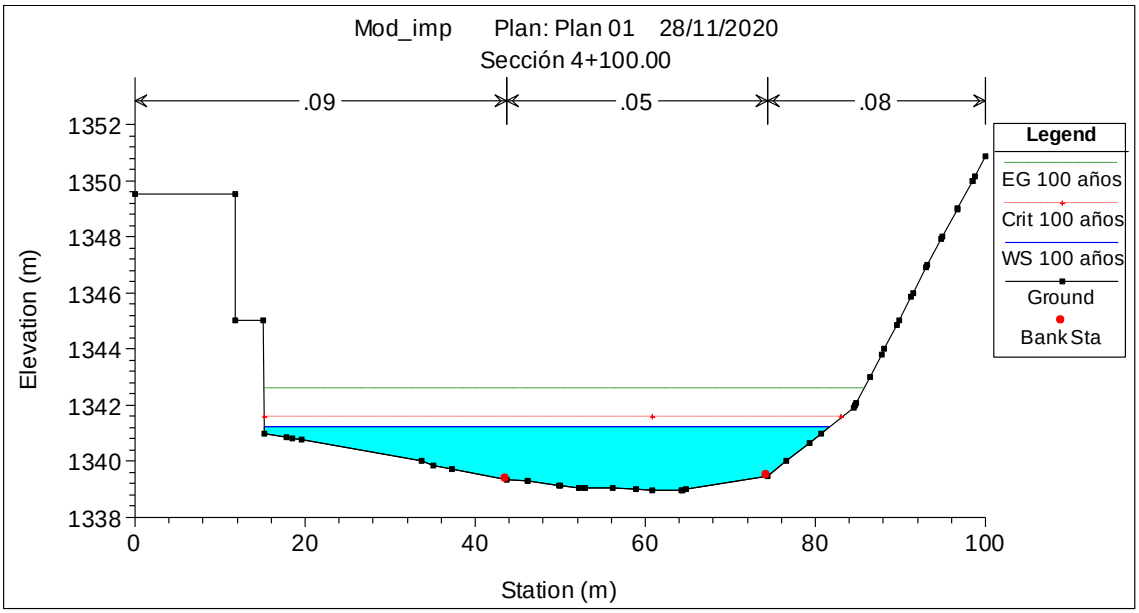


Figura-5-156 Sección K4+100.00 para un periodo de retorno de 100 años, escenario con proyecto.

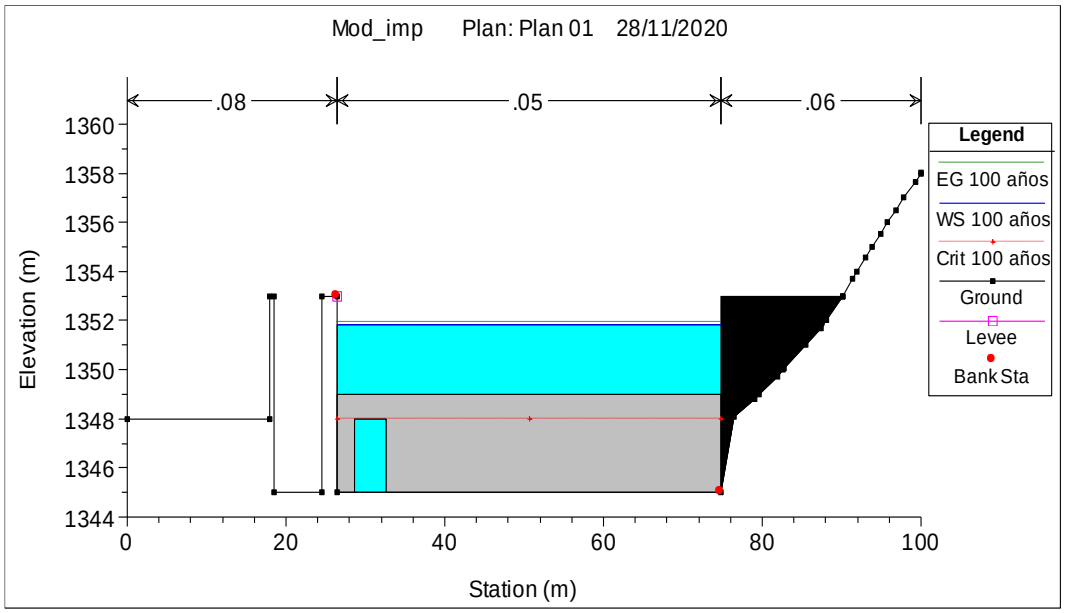


Figura-5-157 Sección K4+171.31 Culv U para un periodo de retorno de 100 años, escenario con proyecto.

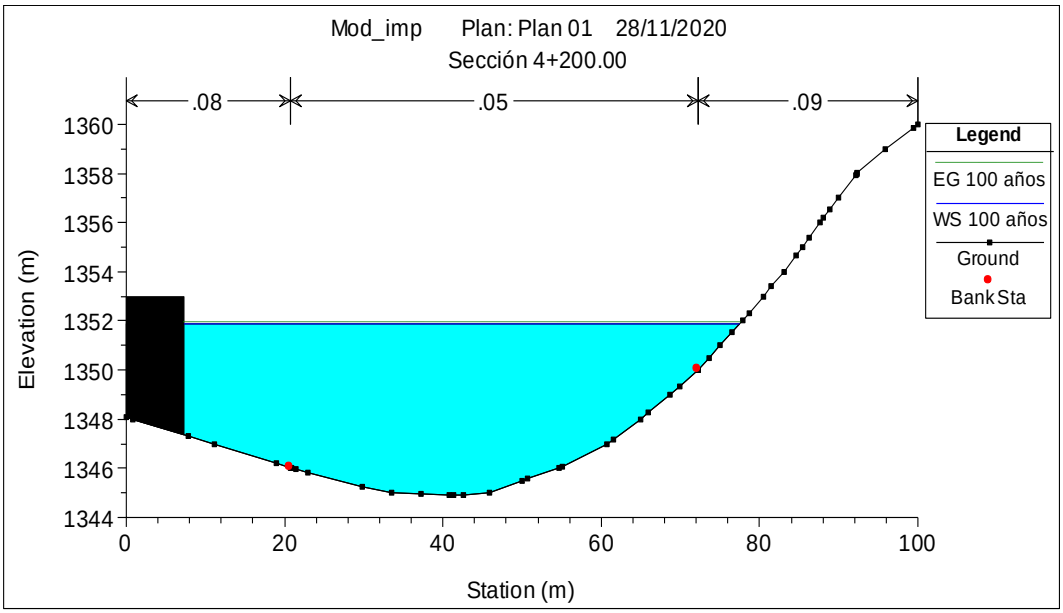


Figura-5-158 Sección K4+200.00 para un periodo de retorno de 100 años, escenario con proyecto

De acuerdo a las tablas arrojadas por el software para la modelación con las obras del proyecto bajo la hipótesis de flujo uniforme en régimen mixto como se presenta en el anexo 5.1.7.3 se puede analizar para un caudal de período de retorno de 100 años lo siguiente:

- Los valores de velocidad máxima y mínima obtenidos con el software en el tramo de estudio son 13,45 m/s y 0,91 m/s respectivamente. Aguas arriba del azud la velocidad disminuye con respecto al escenario sin proyecto, mientras que aguas debajo de éste aumenta.
- Los valores del número de Froude que se presentan en el Anexo 5.1.7.3 oscilan entre 0,12 y 3,54 para el tramo en estudio. Pero los números de Froude que predominan son mayores a la unidad (1), esto quiere decir que en la mayor parte del tramo se tiene un flujo supercrítico, es decir, las ondas de una perturbación se propagan hacia aguas abajo, lo que implica que el flujo supercrítico tiene control aguas arriba (Instituto Nacional de Vías, 2009)

Al comparar la cota de flujo obtenida con el modelo HEC-RAS para las dos condiciones simuladas, condición actual y condición con proyecto, se obtienen las siguientes diferencias en las láminas de agua, ver Tabla 5-141.

Tabla 5-141. Diferencia de cotas entre la condición actual y la condición con proyecto, para un Tr = 100 años

Sección Transversal	Cota de flujo Tr = 100 años		Diferencia (m)
	Condición actual (m)	Condición con proyecto (m)	
0+050.00	1102.61	1102.61	0.00

Sección Transversal	Cota de flujo Tr = 100 años		Diferencia (m)
	Condición actual (m)	Condición con proyecto (m)	
0+100.00	1102.5	1102.5	0.00
0+150.00	1102.81	1102.81	0.00
0+200.00	1103.69	1103.77	0.08
0+250.00	1107.9	1107.97	0.07
0+300.00	1108.64	1108.56	-0.08
0+350.00	1110.44	1110.44	0.00
0+400.00	1111.57	1111.57	0.00
0+450.00	1111.33	1111.33	0.00
0+500.00	1118.14	1118.14	0.00
0+550.00	1120.62	1120.62	0.00
0+600.00	1120.93	1120.92	-0.01
0+650.00	1123.58	1123.59	0.01
0+700.00	1129.02	1129.02	0.00
0+750.00	1128.94	1128.94	0.00
0+800.00	1129.87	1129.87	0.00
0+850.00	1139.45	1139.45	0.00
0+900.00	1140.82	1140.82	0.00
0+950.00	1139.78	1139.77	-0.01
1+000.00	1140.42	1140.43	0.01
1+050.00	1147.71	1147.71	0.00
1+100.00	1147.2	1147.2	0.00
1+150.00	1153.24	1153.24	0.00
1+200.00	1156.36	1156.36	0.00
1+250.00	1161.18	1161.18	0.00
1+300.00	1162.05	1162.05	0.00
1+350.00	1162.52	1162.52	0.00
1+400.00	1162.67	1162.67	0.00
1+450.00	1168.84	1168.84	0.00
1+500.00	1170.34	1170.34	0.00
1+550.00	1171.62	1171.62	0.00
1+600.00	1172.73	1172.73	0.00
1+650.00	1173.64	1173.64	0.00
1+700.00	1177.83	1177.83	0.00
1+750.00	1179.68	1179.68	0.00
1+800.00	1183.34	1183.34	0.00

Sección Transversal	Cota de flujo Tr = 100 años		Diferencia (m)
	Condición actual (m)	Condición con proyecto (m)	
1+850.00	1188.65	1188.65	0.00
1+900.00	1189.91	1189.91	0.00
1+950.00	1190.12	1190.12	0.00
2+000.00	1192.39	1192.39	0.00
2+050.00	1198.32	1198.32	0.00
2+100.00	1201.13	1201.13	0.00
2+150.00	1208.05	1208.05	0.00
2+200.00	1209.98	1209.98	0.00
2+250.00	1210.47	1210.47	0.00
2+300.00	1217.7	1217.69	-0.01
2+350.00	1219.28	1219.3	0.02
2+400.00	1225.57	1225.58	0.01
2+450.00	1226.33	1226.34	0.01
2+500.00	1230.97	1230.93	-0.04
2+550.00	1232.97	1232.97	0.00
2+600.00	1233.57	1233.57	0.00
2+650.00	1237.23	1237.23	0.00
2+700.00	1243.54	1243.55	0.01
2+750.00	1245.81	1245.81	0.00
2+800.00	1249.08	1249.08	0.00
2+850.00	1250.92	1250.92	0.00
2+900.00	1253.09	1253.09	0.00
2+950.00	1259.46	1259.46	0.00
3+000.00	1262.98	1262.98	0.00
3+050.00	1269.6	1269.6	0.00
3+100.00	1270.74	1270.74	0.00
3+150.00	1277.44	1277.44	0.00
3+200.00	1280.46	1280.46	0.00
3+250.00	1279.91	1280	0.09
3+300.00	1282.4	1282.4	0.00
3+350.00	1285.9	1285.9	0.00
3+400.00	1287.88	1287.85	-0.03
3+450.00	1293.5	1293.36	-0.14
3+500.00	1297.55	1297.57	0.02
3+550.00	1303.1	1303.09	-0.01

Sección Transversal	Cota de flujo Tr = 100 años		Diferencia (m)
	Condición actual (m)	Condición con proyecto (m)	
3+600.00	1308.55	1308.64	0.09
3+650.00	1309.78	1309.65	-0.13
3+700.00	1313.47	1313.48	0.01
3+750.00	1318.58	1318.59	0.01
3+800.00	1319.74	1319.72	-0.02
3+850.00	1327.52	1327.52	0.00
3+900.00	1328.99	1328.99	0.00
3+950.00	1331.07	1331.07	0.00
4+000.00	1338.81	1338.81	0.00
4+050.00	1340.13	1340.15	0.02
4+100.00	1340.75	1341.23	0.48
4+125.00		1342.43	-
4+150.00	1344.49	1346.38	1.89
4+156.17	1344.62	1347.44	2.82
4+171.31 Culv		1351.85	-
4+171.41	1345.73	1351.85	6.12
4+185.00	1346.64	1351.87	5.23
4+200.00	1347.78	1351.87	4.09
4+225.00	1347.51	1351.9	4.39
4+250.00	1348.94	1351.87	2.93
4+300.00	1353.17	1353.17	0.00
4+350.00	1357.42	1357.42	0.00
4+352.35	1357.68	1357.68	0.00

De acuerdo a la tabla anterior, se puede concluir que, las secciones donde se presenta cambio significativo en la altura de la lámina de agua por la implementación de las obras del proyecto, se encuentran entre las secciones 4+100.00 y 4+250.00, estas se ubican a la altura de la zona donde se proyectan las obras de captación que incluye la construcción de un azud para elevar los niveles de flujo para captar el caudal de diseño. Sin embargo, se puede observar que en las demás secciones no hay cambios en los niveles de flujo o éstos son casi despreciables.

El pondaje o espejo de agua que se forma debido la estructura del azud hacia aguas arriba tiene una longitud de 80 m aproximadamente y el área de la lámina de agua

que se ve reflejada en los 80 metros es de 6.870 m² para un periodo de retorno de 100 años.

Los resultados de la modelación hidráulica en todo el tramo con caudal reducido, sirven para estimar el tiempo que tarda el caudal del río Cocorná, en viajar desde el sitio de ubicación del azud hasta el canal de descarga, en caso de que se suspenda la operación. Los resultados encontrados indican que para el caudal de 100 años de período de retorno el tiempo de viaje entre los dos puntos de interés, que tienen una separación de 3.702 m, es de 10,3 minutos. También se estimó el tiempo de viaje de la condición más crítica o de caudales de estiaje, que corresponde al mes de agosto, el cual tiene el caudal ambiental mensual más bajo con un valor de 2,2 m^3/s y asumiendo que el proyecto está operando con el caudal mínimo turbinable de 0,53 m^3/s, arrojando un tiempo de viaje de 43,2 minutos para que un caudal de 2,73 m^3/s se desplace entre la captación y la descarga. En la Tabla 5-142 se presentan los tiempos de viaje obtenidos para diferentes caudales.

Tabla 5-142. Tiempos de viaje del caudal del río Cocorná requerido para desplazarse entre el azud y el canal de descarga de la PCH Cocorná III

Periodo de retorno	Caudal (m^3/s)	Velocidad media (m/s)	Distancia (m)	Tiempo de viaje de captación a descarga (minutos)
Qmin.turbinable+Qamd_Ago	2,73	1,43	3.702	43,2
Qdiseño+Qamb_Ago	12,8	2,42	3.702	25,5
2.33 años	289,4	5,44	3.702	11,3
5 años	327,7	5,60	3.702	11,0
10 años	355,0	5,72	3.702	10,8
25 años	385,6	5,83	3.702	10,6
50 años	406,6	5,91	3.702	10,4
100 años	426,4	6,01	3.702	10,3
200 años	445,0	6,07	3.702	10,2
500 años	468,1	6,14	3.702	10,0

5.1.4.9.4.3.4 Modelación hidráulica tramo medio 1

Teniendo en cuenta las consideraciones anteriormente mencionadas (Ver Tabla 5-140) para el tramo de estudio, se procede a correr en el programa HEC-RAS la modelación hidráulica del primer tramo medio denominado “Tramo medio 1”, este tramo está ubicado aproximadamente 700 m aguas abajo de la zona de captación.

Para el tramo medio 1 se levantaron 25 secciones trasversales al río, desde la margen izquierda a la margen derecha con relación al flujo, distanciadas cada 10 metros con anchos cercanos a los 100 metros. Todas las secciones fueron obtenidas por

topobatimetría. A continuación, en la Figura 5-175 se presenta el tramo medio 1 a modelar:

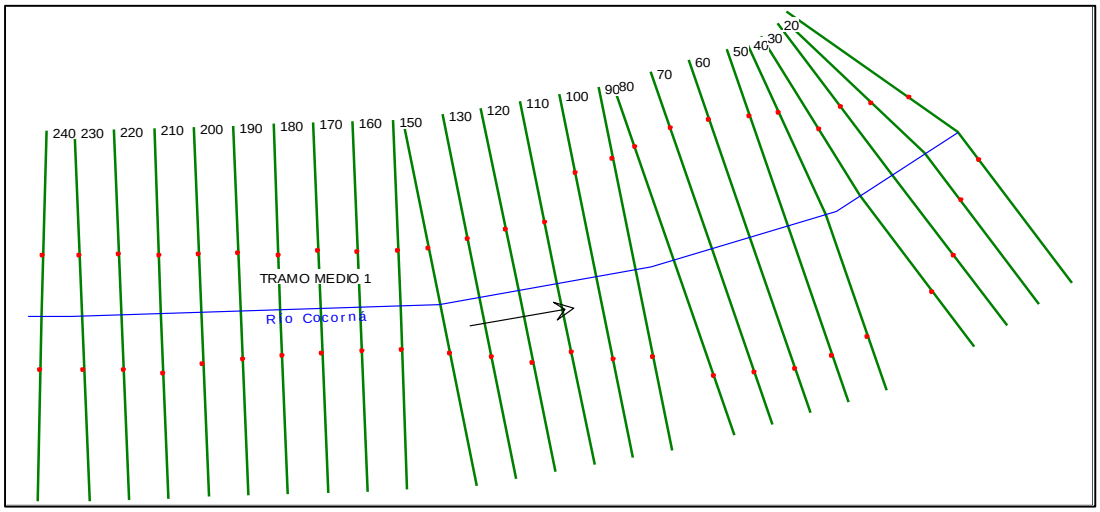


Figura 5-159. Esquema del tramo medio 1 ubicado 700 m aguas abajo de la zona de captación.

Resultados

En la siguiente figura se puede observar el perfil longitudinal del tramo medio 1, en condiciones naturales para un periodo de retorno de 100 años.

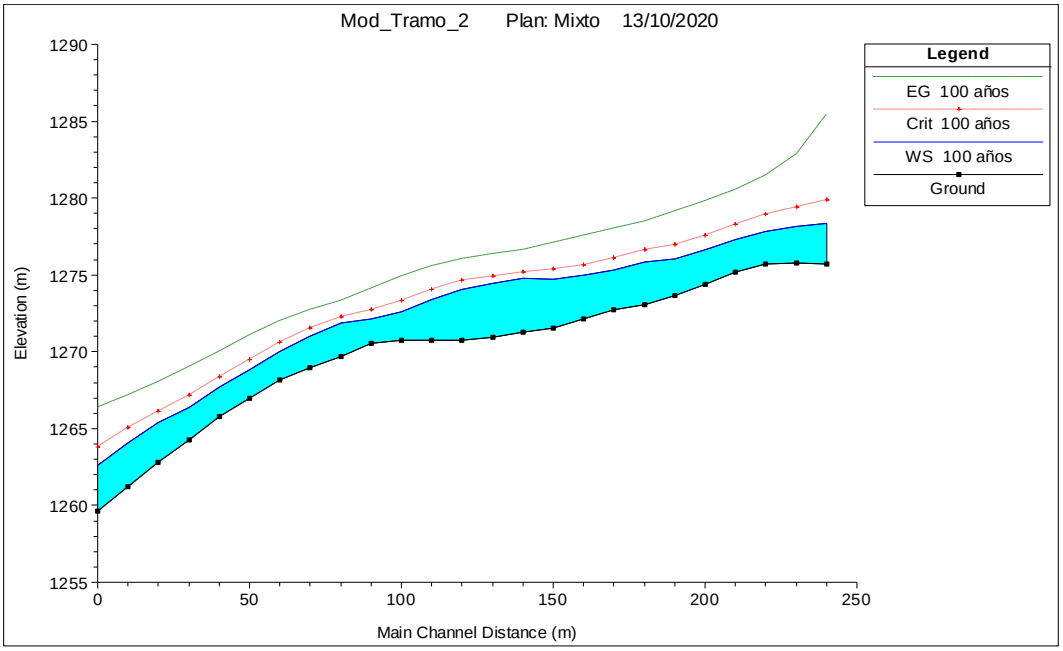


Figura 5-160. Perfil longitudinal del tramo medio 1 para un periodo de retorno de 100 años, escenario sin proyecto

La mancha de inundación, el mapa de velocidades y el mapa de profundidades fue obtenido desde el programa ARC-GIS con la ayuda de la extensión HEC-GeoRas. Ver Figura 5-161, Figura 5-162 y Figura 5-163. De igual forma que para el tramo en captación, en el tramo medio 1, cada sección transversal fue corrida para los ocho periodos de retorno, los valores de velocidad máxima y mínima son 11,79 m/s y 5,37 m/s respectivamente. Los valores de número de Froude que se presentan en el Anexo 5.1.7.3, oscilan entre 1,22 y 3,3, sin embargo, los números de Froude que predominan son mayores a la unidad (1), esto quiere decir que el tramo tiene un flujo supercrítico, las ondas de una perturbación se propagan hacia aguas abajo, lo que implica que el flujo supercrítico tiene control aguas arriba (INVIAS 2009).

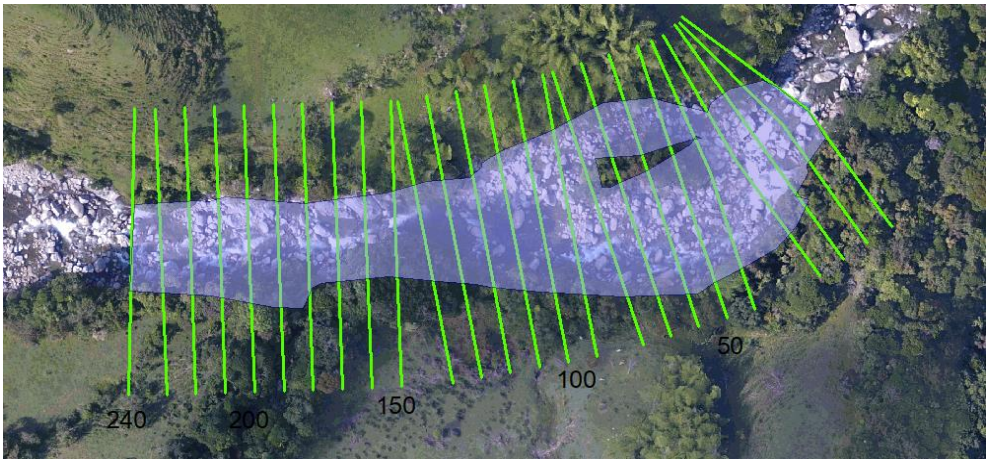


Figura 5-161. Mancha de inundación del tramo medio 1 para un periodo de retorno de 100 años, escenario sin proyecto

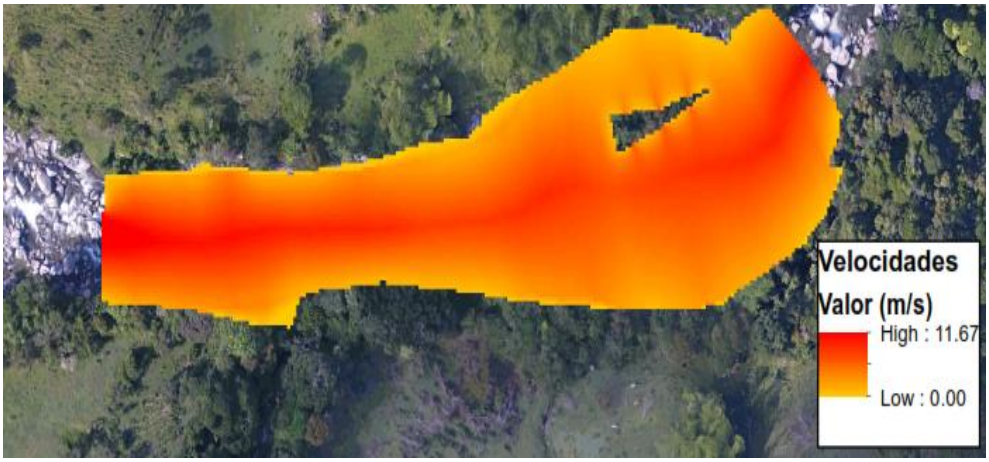


Figura 5-162. Mapa de velocidades del tramo medio 1 para un periodo de retorno de 100 años, escenario sin proyecto

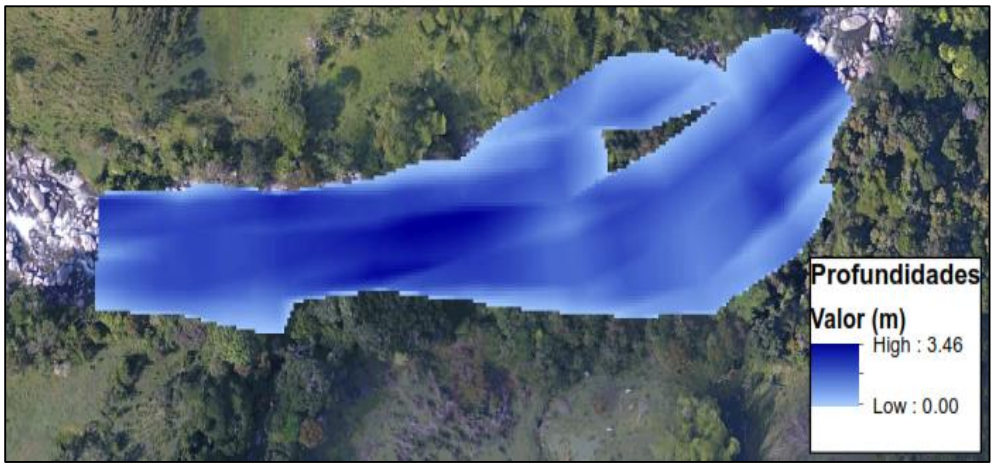


Figura 5-163. Mapa de profundidades del tramo medio 1 para un periodo de retorno de 100 años, escenario sin proyecto

A continuación, se presentan dos secciones transversales donde se puede observar la altura de la lámina de agua, las demás secciones transversales se presentan en el Anexo 5.1.7.3.

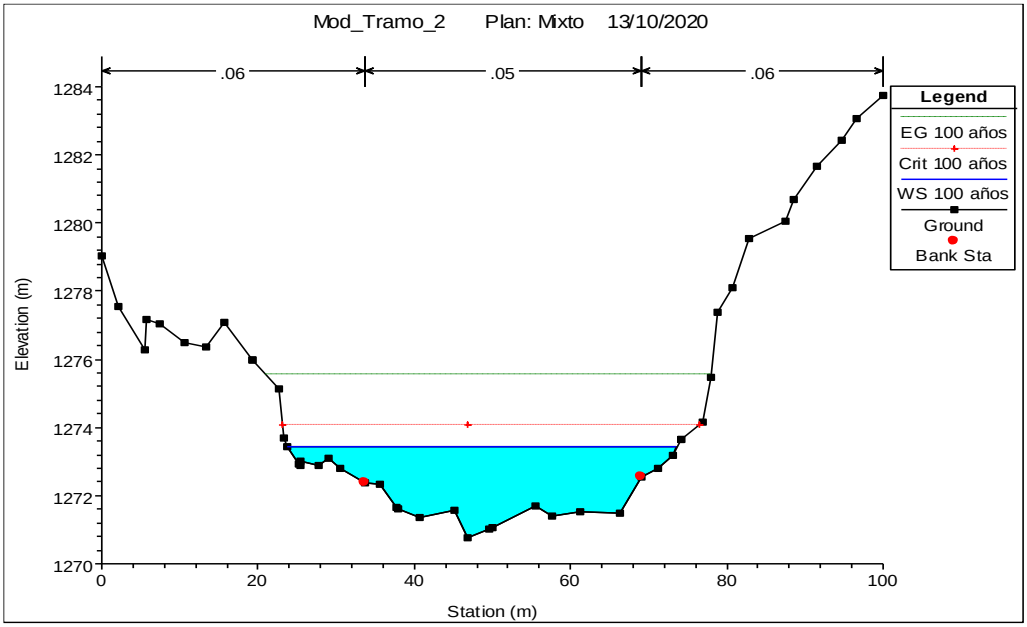


Figura1-5-164. Sección K0+110 para un periodo de retorno de 100 años, escenario sin proyecto

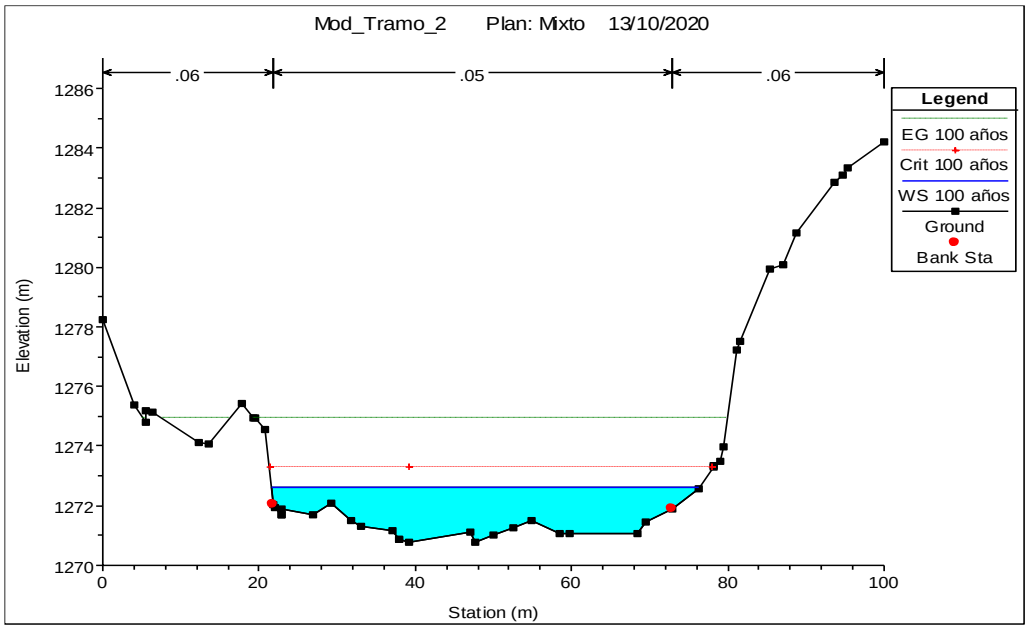


Figura5-165. Sección K0+100 para un periodo de retorno de 100 años, escenario sin proyecto

En la Figura5-166 se observa que la mancha de inundación para un período de retorno de 100 años no afectaría las obras (línea de presión) en el tramo intermedio 1.

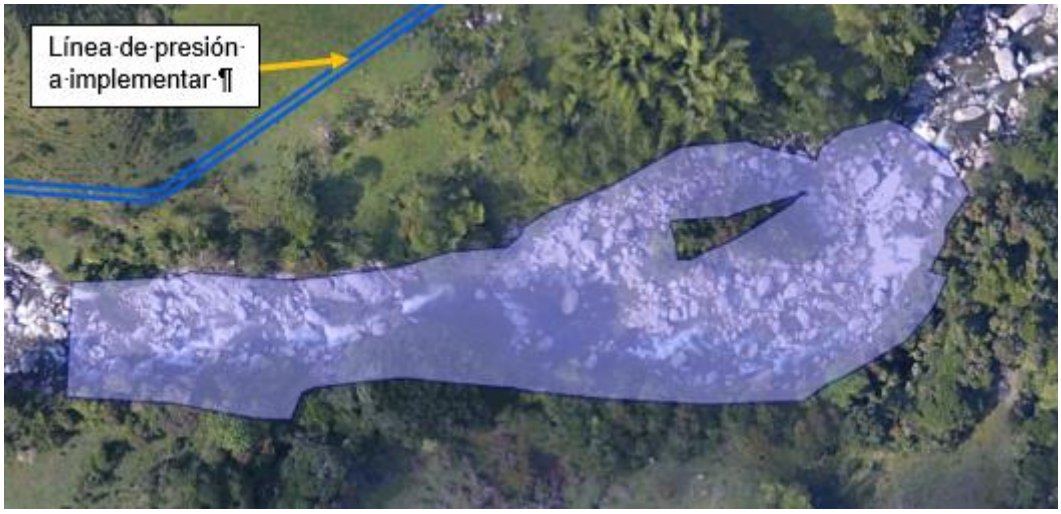


Figura5-166. Mancha de inundación tramo medio 1 con la proyección de las obras. Tr=100 años

5.1.4.9.4.3.5 Modelación hidráulica tramo medio 2

Teniendo en cuenta las consideraciones anteriormente mencionadas (Ver Tabla 5-140) para el tramo de estudio, se procede a correr en el programa HEC-RAS la modelación hidráulica de un tramo medio 2, este tramo está ubicado 1,9 km aguas abajo de la zona de captación y 1,2 km aguas abajo del tramo medio 1.

Para el tramo medio 2 se sacaron 32 secciones trasversales al río, desde la margen izquierda a la margen derecha con relación al flujo, distanciadas cada 10 metros con anchos de 100 metros. Todas las secciones fueron obtenidas por topobatimetría realizada en el 2019. A continuación, en la Figura 5-167 se presenta el tramo medio 2 a modelar:

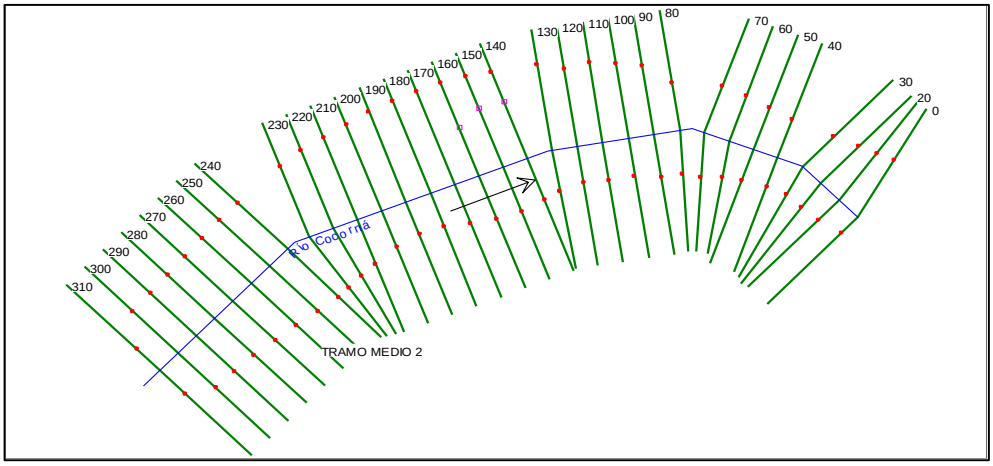


Figura 5-167. Esquema del tramo medio 2 ubicado 1900 m aguas abajo de la zona de captación

Resultados

En la Figura 5-168 se puede observar el perfil longitudinal del tramo medio 2 en condiciones naturales para un periodo de retorno de 100 años, mientras que en la Figura 5-169 a Figura 5-171 se muestra la mancha de inundación, el mapa de velocidad y el mapa de profundidades para este mismo tiempo de retorno.

De acuerdo a las tablas arrojadas por el software para la modelación de este tramo, los valores de velocidad máxima y mínima son 9,17 m/s y 6,29 m/s respectivamente. Los valores del número de Froude oscilan entre 1,31 y 2,05 para el tramo en estudio. Los números de Froude que predominan son mayores a la unidad (1), esto quiere decir que el tramo tiene un flujo supercrítico, con predominio de las fuerzas cinemáticas con respecto a las fuerzas gravitacionales.

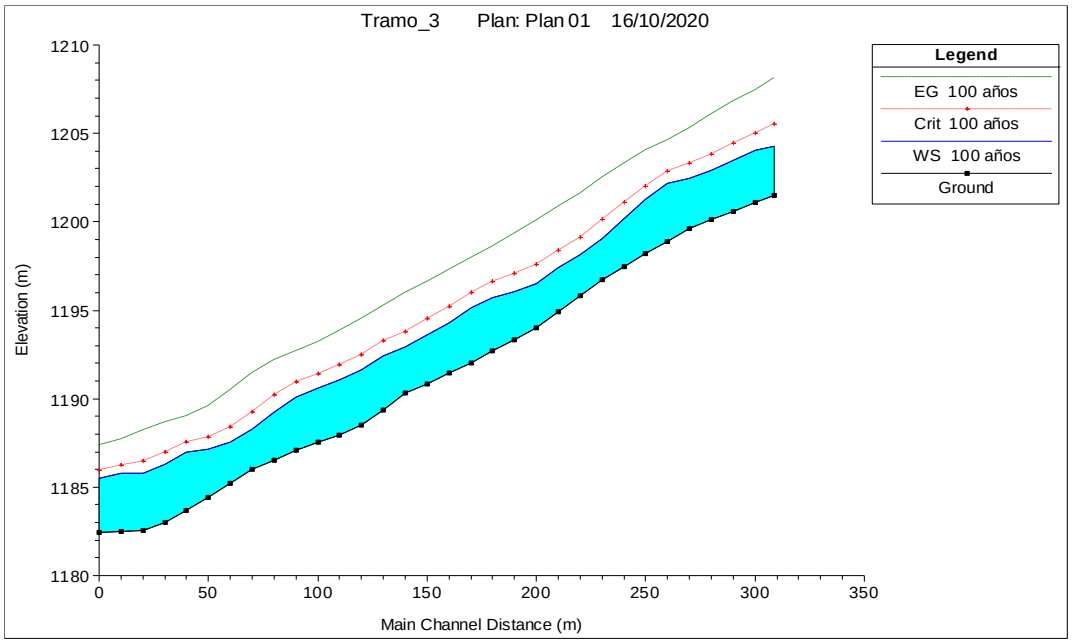


Figura 5-168. Perfil longitudinal del tramo medio 2 para un periodo de retorno de 100 años, escenario sin proyecto

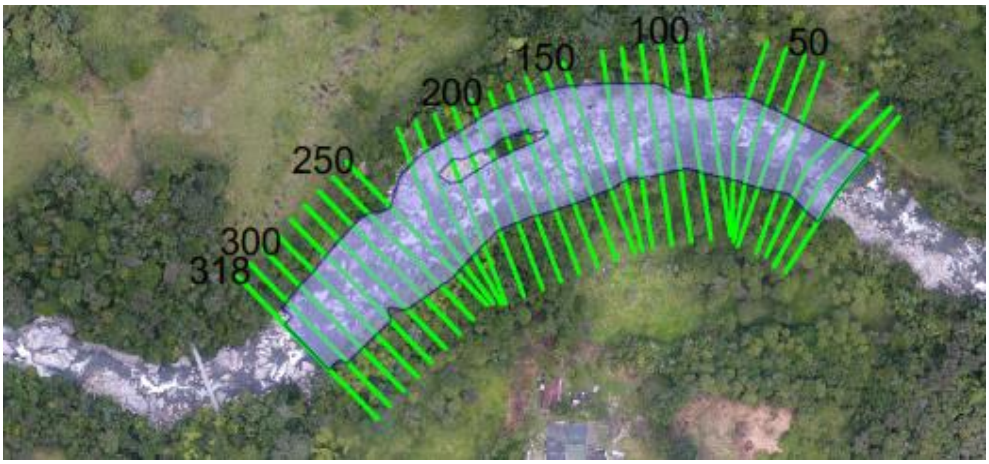


Figura 5-169. Mancha de inundación del tramo medio 2 para un periodo de retorno de 100 años, escenario sin proyecto

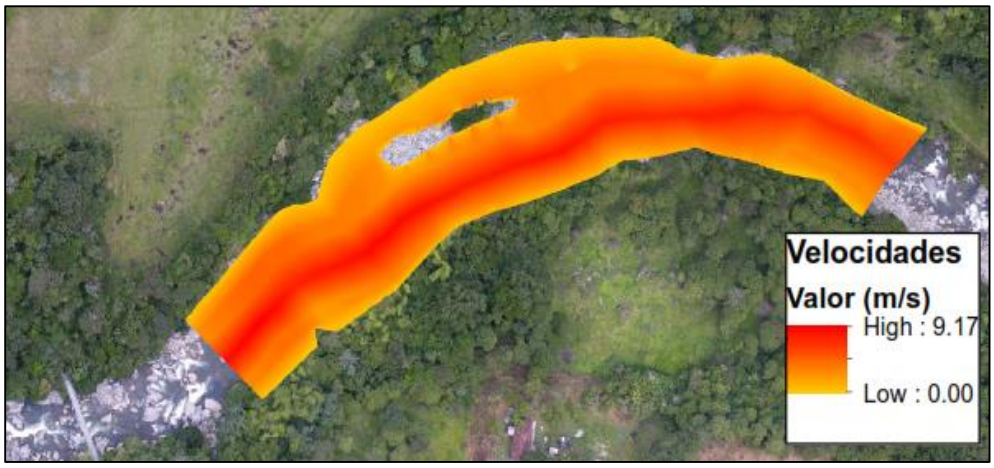


Figura 5-170. Mapa de velocidades del tramo medio 2 para un periodo de retorno de 100 años, escenario sin proyecto

Figura 5-171. Mapa de profundidades del tramo medio 2 para un periodo de retorno de 100 años, escenario sin proyecto

A continuación, se presentan dos secciones transversales (ver Figura1-5-172 y Figura5-173) donde se puede observar la altura de la lámina de agua, las demás secciones transversales se presentan en el Anexo 5.1.7.3

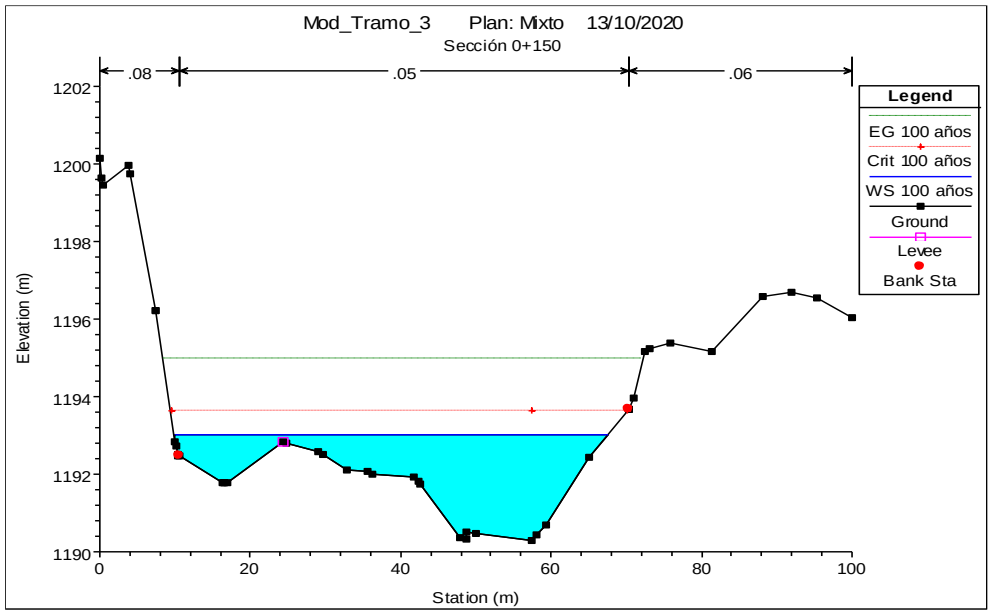


Figura1-5-172. Sección K0+150 para un periodo de retorno de 100 años, escenario sin proyecto

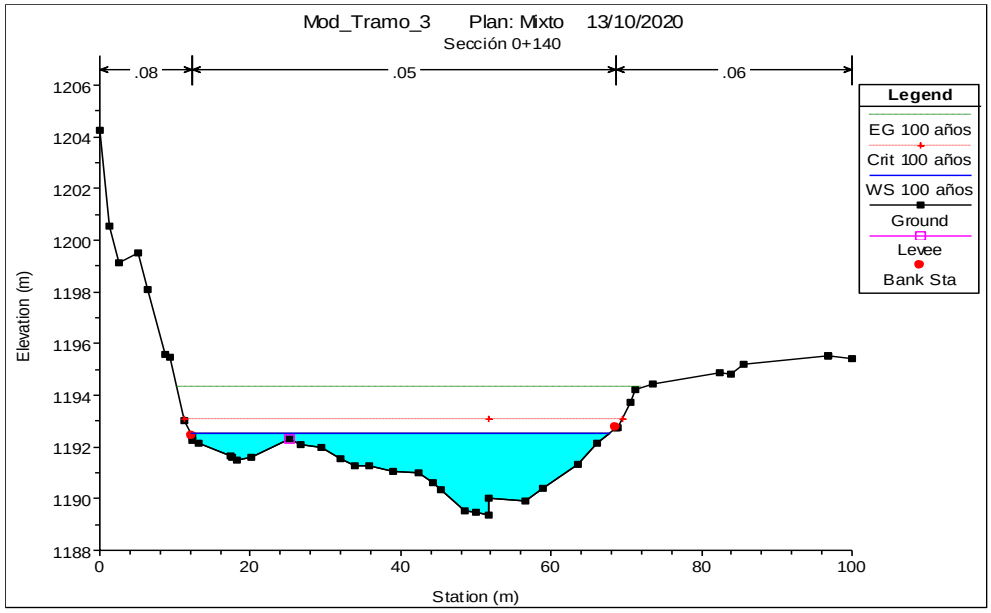


Figura5-173. Sección K0+140 para un periodo de retorno de 100 años, escenario sin proyecto

En la Figura5-174 se evidencia que la mancha de inundación para un periodo de retorno de 100 años no afectaría las obras (línea de presión) en el tramo intermedio 2.

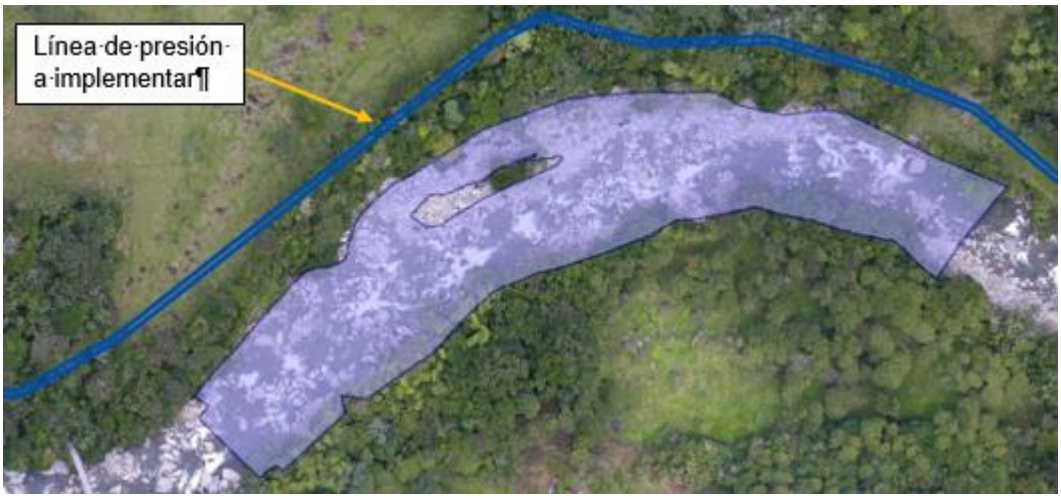


Figura5-174. Mancha de inundación tramo medio 2 con la proyección de las obras. Tr=100 años

5.1.4.9.4.3.6 Modelación hidráulica subtramo de casa de máquinas (sin proyecto)

Para este subtramo se sacaron 27 secciones trasversales de la información topobatimétrica levantada en campo y están representadas desde la margen izquierda a la margen derecha con relación al flujo, distanciadas cada 10 metros. A continuación, en la Figura 5-175 se presenta el subtramo en estudio:

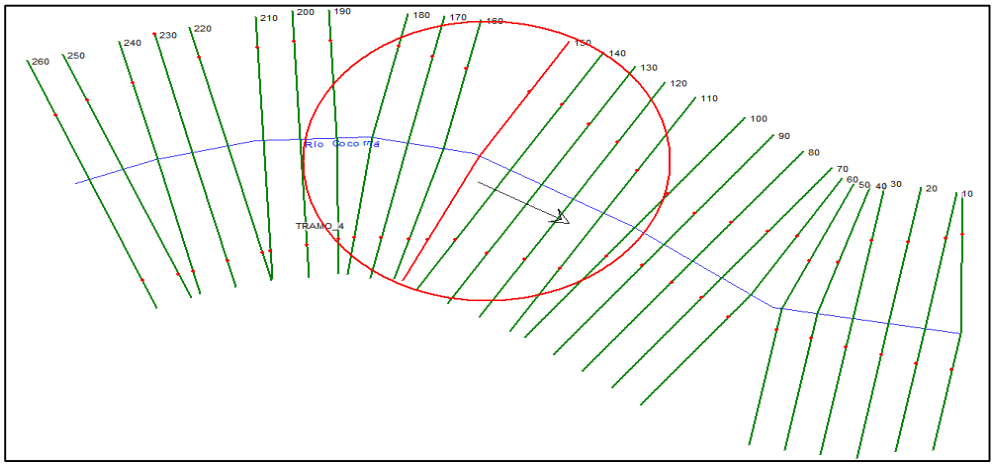


Figura 5-175. Esquema del subtramo de estudio en la zona de casa de máquinas

Resultados

La mancha de inundación, el mapa de profundidades y el mapa de velocidades que fueron obtenidos con ayuda del programa ArcGIS con la extensión HEC-GeoRas, se presentan en la Figura 5-176 a la Figura 5-178. Los valores de velocidad máxima y mínima obtenidos en el subtramo de estudio son 6,80 m/s y 4,17 m/s respectivamente. Los valores del número de Froude oscilan entre 0,34 y 2,64 para el tramo en estudio. Pero los números de Froude que predominan son mayores a la unidad (1), esto quiere decir que en la mayor parte del tramo se tiene un flujo supercrítico, las ondas de una perturbación se propagan hacia aguas abajo, lo que implica que el flujo supercrítico tiene control aguas arriba.

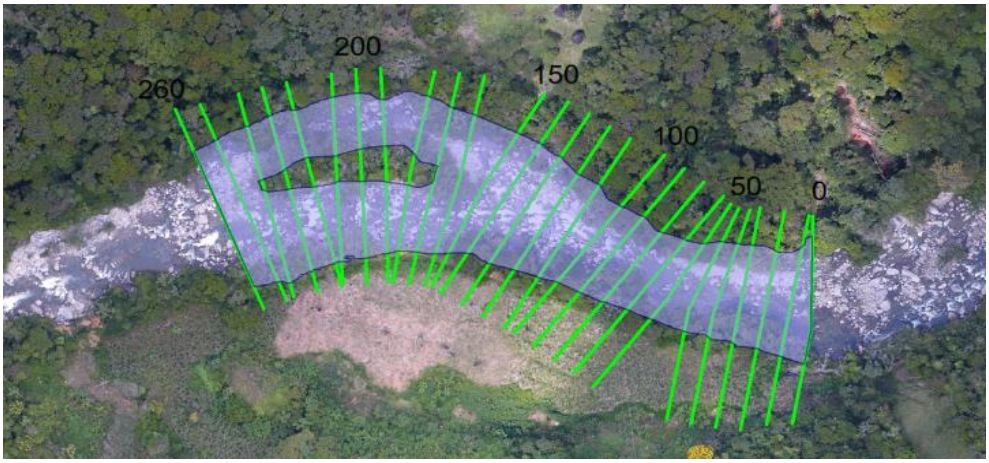


Figura 5-176.Mancha de inundación en la zona de casa de máquinas para un periodo de retorno de 100 años, escenario sin proyecto

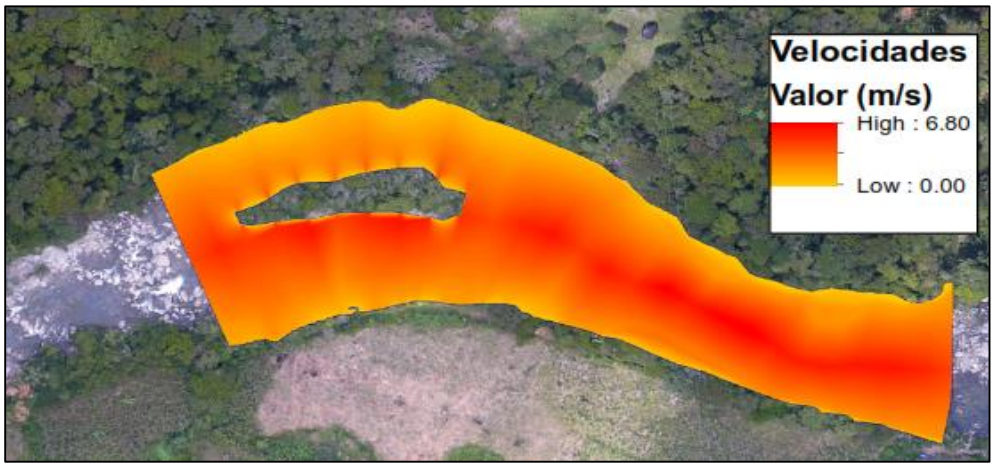


Figura 5-177.Mapa de velocidades en la zona de casa de máquinas para un periodo de retorno de 100 años, escenario sin proyecto

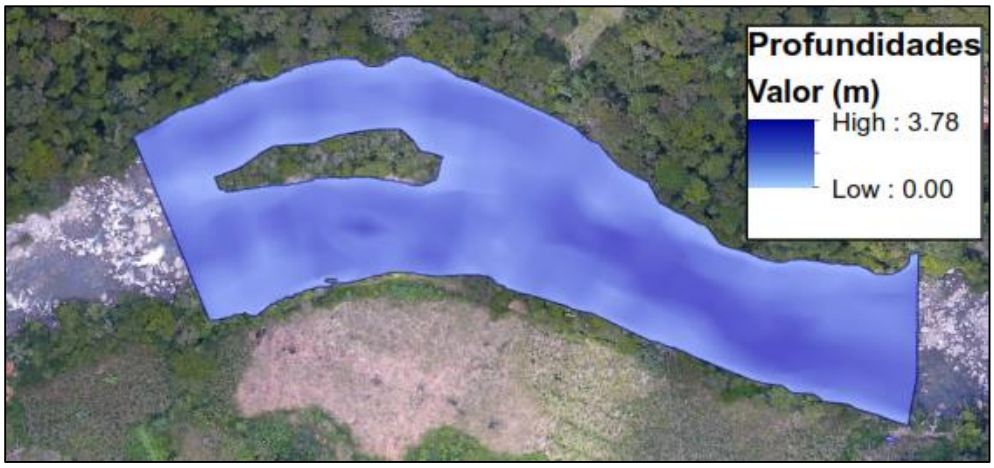


Figura 5-178.Mapa de profundidades en la zona de casa de máquinas para un periodo de retorno de 100 años, escenario sin proyecto

A continuación, se presentan dos secciones transversales (ver Figura 5-179 y Figura 5-180) donde se puede observar la altura de la lámina de agua para el período de retorno de 100 años. Los demás resultados se presentan en el Anexo 5.1.7.3.

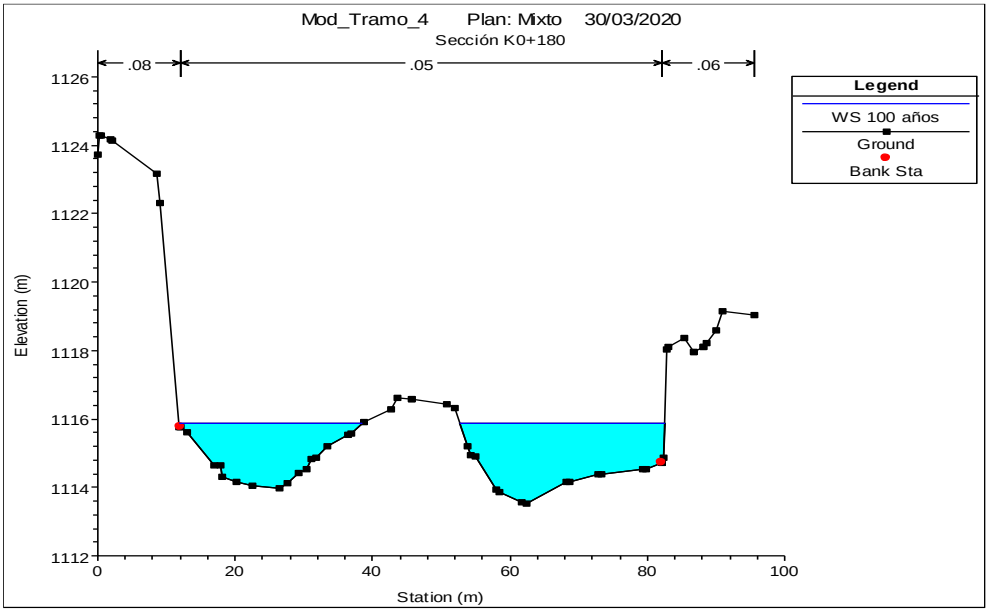


Figura 5-179. Sección K0+180 para un periodo de retorno de 100 años, escenario sin proyecto

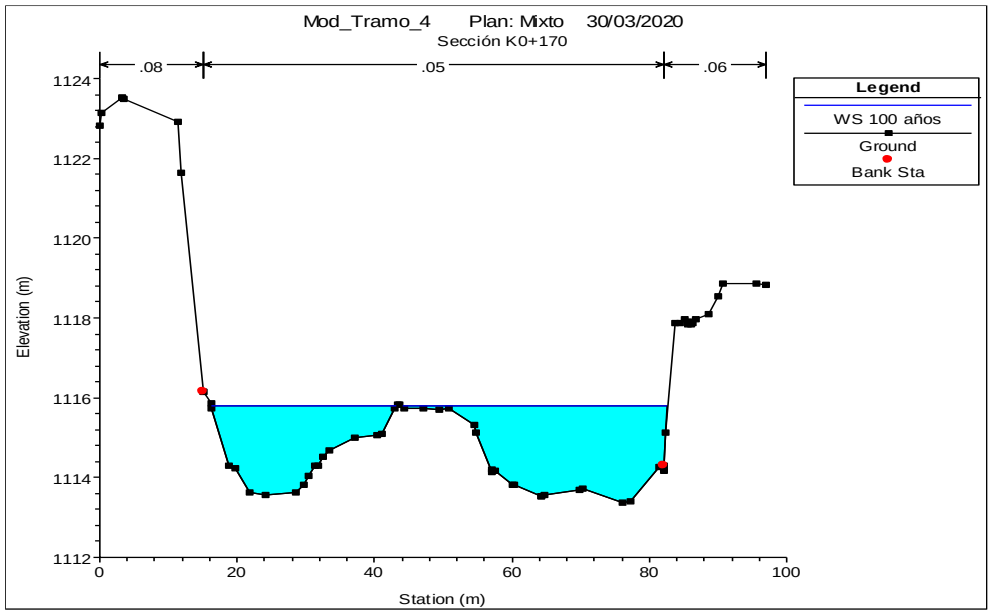


Figura 5-180. Sección K0+170 para un periodo de retorno de 100 años, escenario sin proyecto

5.1.4.9.5 Análisis de las zonas de recreación sobre el río Cocorná (charcos)

En el tramo de estudio del río Cocorná se identificaron 15 sitios como áreas fluviales para el aprovechamiento recreativo (Tabla 5-143) cuyo uso está relacionado a balnearios o charcos, de los cuales 13 se encuentran dentro del tramo con caudal reducido; siendo los charcos María Parda y Las Arenosas los únicos ubicados aguas abajo de la descarga del proyecto, por esta razón carecen de afectación directa por reducción de caudal en el tramo intervenido por la PCH. (Figura 5-181).

Los tramos donde se levantó batimetría y que fueron presentados en el numeral 5.1.4.9.4.3, coinciden con 3 de los sitios identificados como áreas fluviales para el aprovechamiento recreativo, que son los charcos del Diablo (CH15), El Toro (CH4) y el charco sin nombre CH11. A estos tres sitios se les realiza el análisis de sus condiciones hidráulicas por medio de la modelación en HEC-RAS para dos escenarios diferentes: con y sin proyecto.

Las condiciones de flujo consideradas para el análisis fueron los caudales mínimos naturales mensuales (Q95%) y los caudales ambientales resultantes de la reducción de caudal (caudales ambientales mensuales estimados con la metodología de EPM del año 2012), así como los caudales medios con y sin la operación del proyecto (Qr y Qm respectivamente). Este análisis se realiza con el fin de determinar la posible incidencia de la disminución de caudal en el tramo con caudal reducido sobre las áreas fluviales utilizadas para el aprovechamiento recreativo.

Tabla 5-143. Áreas fluviales para aprovechamientos recreativos en el tramo con caudal reducido

Charco	Nombre	Área superficial (m²)	Coordenadas	
			Este (m)	Norte (m)
CH1	Charco Las Arenosas	686	878.347	1.160.492
CH2	Sin nombre	779	874.823	1.160.072
CH3	Sin nombre	334	874.857	1.160.088
CH4	Charco El Toro	1.818	875.370	1.160.165
CH5	Sin nombre	176	875.610	1.160.289
CH6	Sin nombre	522	875.643	1.160.264
CH7	Charco Puente El Pisquinal 1	463	876.128	1.160.067
CH8	Charco Puente El Pisquinal 2	1214	876.190	1.160.061
CH9	Charco Puente El Pisquinal 3	691	876.242	1.160.082
CH10	Charco Puente El Pisquinal 4	254	876.251	1.160.106
CH11	Sin nombre	972	876.502	1.160.167
CH12	Sin nombre	1.000	877.098	1.160.291
CH13	Sin nombre	218	877.023	1.160.223
CH14	Charco María Parda	1.374	879.101	1.160.393
CH15	Charco del Diablo	1.165	874.648	1.160.068

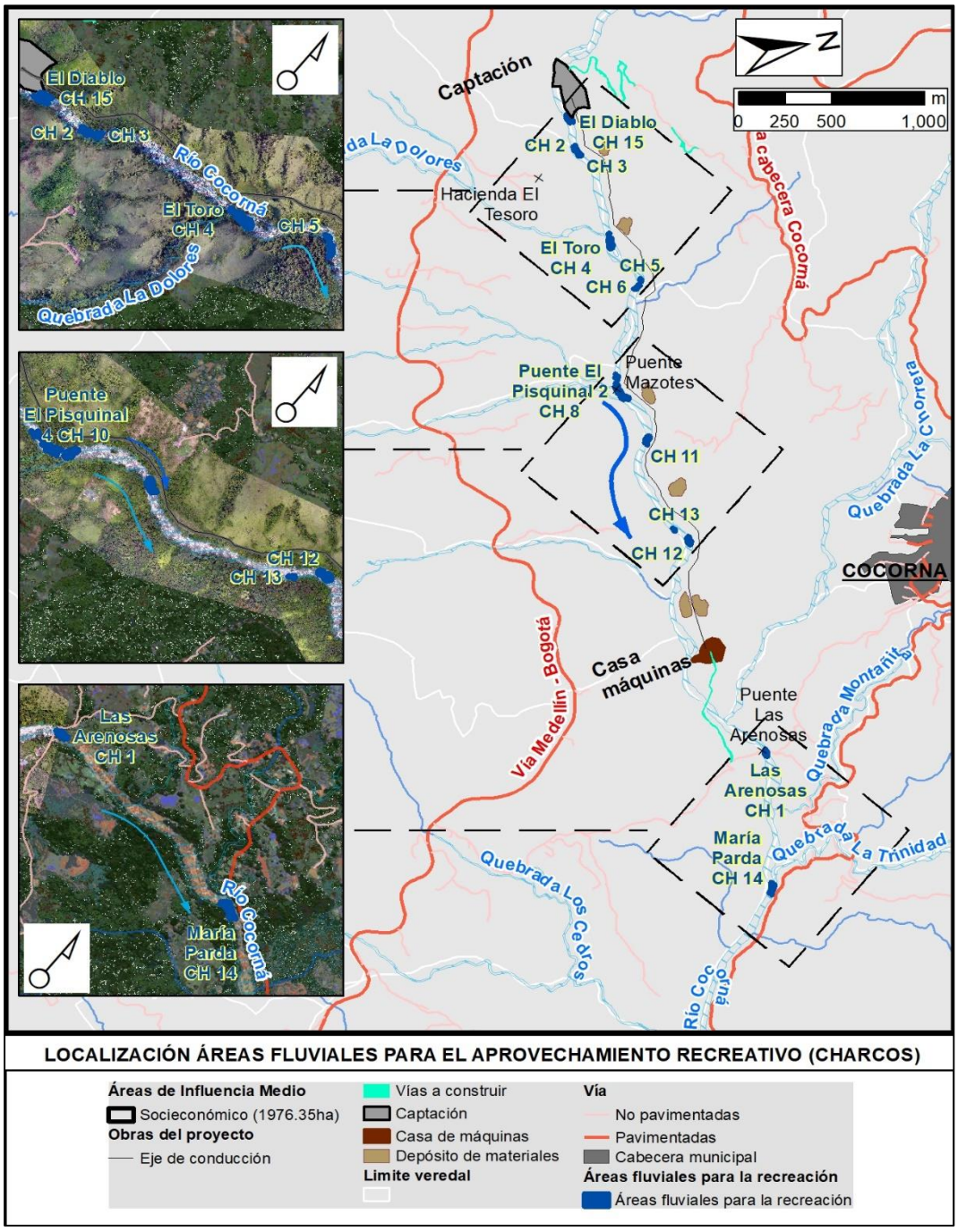


Figura 5-181 Mapa de los charcos ubicados en el tramo con caudal reducido.

5.1.4.9.5.1 Análisis del charco del Diablo (CH15) zona de captación

Ubicado entre la vereda La Placeta y El Tesoro, aproximadamente a unos 200 m aguas abajo de la estructura del azud, se encuentra el charco del Diablo. Las vías de

acceso más cercanas corresponden, en margen izquierda, a la vía que conduce de la cabecera municipal a la escuela de La Placeta y en margen derecha a 400 m se encuentra la vía privada de la hacienda El Tesoro.

En la Figura 5-182 se puede observar que el charco del Diablo está conformado por una ronda hídrica de aproximadamente 10 metros a ambas márgenes del río, aguas arriba se puede ver dos depresiones o cascadas encañonadas por material rocoso, mientras que aguas abajo se ven sedimentos y material rocoso que ha transportado la corriente. Las dimensiones del charco son de alrededor 40 metros de largo y 30 metros ancho.

Figura 5-182.Charco del Diablo

El levantamiento topográfico y batimétrico de la zona se realiza con estación total por vadeo, que se realizó en febrero de 2018 por Praming, en temporada seca. Las secciones transversales se procesan mediante el software HEC-RAS, teniendo en cuenta los caudales que son superados el 95% del tiempo (sin proyecto) y los caudales de garantía ambiental (con proyecto) para todos los meses del año (ver Tabla 5-144), así como los caudales medios con y sin proyecto.

Tabla 5-144. Caudales con proyecto y sin proyecto utilizados para la modelación de los charcos.

Mes	Caudal Medio mensual (m^3/s) Sin Proyecto	Q95% (m^3/s) Sin Proyecto	Caudal Ambiental (m^3/s) Con Proyecto	Caudal remanente (m^3/s) Con Proyecto
Enero	9,4	3,8	2,4	3,0
Febrero	9,6	3,7	2,4	3,1
Marzo	9,6	4,1	2,6	3,2
Abril	12,6	5,4	3,4	4,9
Mayo	15,0	7,2	4,5	6,6
Junio	12,4	5,9	3,7	5,4
Julio	10,3	3,7	2,3	3,8
Agosto	10,0	3,5	2,2	3,5
Septiembre	13,1	4,9	3,1	5,1
Octubre	13,1	6,8	4,3	5,4
Noviembre	12,4	6,9	4,4	5,1
Diciembre	10,6	6,2	3,9	4,5
Promedio	**11,5**	**5,2**	**3,3**	**4,5**

En el Anexo 5.1.7.3 se presentan los resultados de la modelación en HEC-RAS para los caudales mostrados en la tabla anterior. A continuación, se analizarán los registros de los meses de agosto y mayo, los cuales representan temporadas de lluvias bajas a altas, de esta manera se podrá tener el comportamiento del balneario en las temporadas climáticas más extremas y se evaluarán las condiciones sin proyecto como con proyecto.

Una vez corrido el programa HEC-RAS se encontraron las siguientes características del charco del Diablo para el mes de agosto, el cual tiene el caudal ambiental más bajo del año (Ver Tabla 5-145 y Figura 5-183). El charco inicia en la estación 170, luego de una caída o cascada de aproximadamente 4,8 m de altura, está compuesto de dos charcos: el charco principal llamado charco del Diablo, posteriormente sigue una segunda caída de agua y finalmente se encuentra el segundo charco más pequeño, los dos charcos están comprendidos entre las secciones 170 y 70 de Hec-Ras.

Tabla 5-145. Resultados de la modelación hidráulica en el tramo del charco del Diablo para el caudal medio (Qm) y mínimo natural (Q95%) sin operación y medio (Qr) y ambiental (Qamb) en operación, del mes de agosto (mes con caudal ambiental más bajo del año)

Estación	Perfil	Observación	Caudal (m^3/s)	Min. Elev. Canal (m)	Elev. Sup. Agua (m)	Vel. (m/s)	Área Flujo (m^2)	Ancho Sup. Agua (m)	No. Froude	Altura agua (m)
190	Qamb_Ago	Inicio caída	2.2	1329.75	1330.08	1.35	1.64	9.38	1.02	0.33
190	Q95_Ago		3.5	1329.75	1330.16	1.43	2.47	12.29	1.01	0.41
190	Qm_ago		10	1329.75	1330.36	1.67	6.02	21.41	1	0.61
190	Qr_ago		3.5	1329.75	1330.16	1.43	2.47	12.29	1.01	0.41
180	Qamb_Ago		2.2	1327.29	1327.53	5.16	0.43	2.51	3.98	0.24
180	Q95_Ago		3.5	1327.29	1327.61	5.37	0.66	3	3.66	0.32
180	Qm_ago		10	1327.29	1327.9	5.66	1.78	4.72	2.94	0.61
180	Qr_ago		3.5	1327.29	1327.61	5.37	0.66	3	3.66	0.32
170	Qamb_Ago	Inicio charco principal	2.2	1323.35	1324.99	0.28	7.96	6.4	0.08	1.64
170	Q95_Ago		3.5	1323.35	1325.1	0.4	8.66	6.65	0.11	1.75
170	Qm_ago		10	1323.35	1325.5	0.86	11.56	7.81	0.23	2.15
170	Qr_ago		3.5	1323.35	1325.1	0.4	8.66	6.65	0.11	1.75
160	Qamb_Ago		2.2	1324.5	1324.87	1.43	1.54	7.7	1.02	0.37
160	Q95_Ago		3.5	1324.5	1324.95	1.59	2.2	8.51	1	0.45
160	Qm_ago		10	1324.5	1325.21	2.27	4.41	8.61	1.01	0.71
160	Qr_ago		3.5	1324.5	1324.95	1.59	2.2	8.51	1	0.45
150	Qamb_Ago		2.2	1323.4	1324.91	0.41	5.31	8.38	0.17	1.51
150	Q95_Ago		3.5	1323.4	1324.98	0.59	5.97	9.1	0.23	1.58
150	Qm_ago		10	1323.4	1325.18	1.25	7.98	11.01	0.47	1.78
150	Qr_ago		3.5	1323.4	1324.98	0.59	5.97	9.1	0.23	1.58
140	Qamb_Ago		2.2	1321.78	1324.91	0.04	51.34	28.26	0.01	3.13
140	Q95_Ago		3.5	1321.78	1325	0.07	53.67	28.7	0.02	3.22
140	Qm_ago		10	1321.78	1325.24	0.16	60.81	30.38	0.04	3.46
140	Qr_ago		3.5	1321.78	1325	0.07	53.67	28.7	0.02	3.22
130	Qamb_Ago		2.2	1321.33	1324.91	0.04	57.28	30.37	0.01	3.58
130	Q95_Ago		3.5	1321.33	1325	0.06	59.82	31.63	0.01	3.67
130	Qm_ago		10	1321.33	1325.24	0.15	67.89	34.95	0.03	3.91
130	Qr_ago		3.5	1321.33	1325	0.06	59.82	31.63	0.01	3.67
120	Qamb_Ago	Fin charco principal - inicio segunda caída	2.2	1324.41	1324.82	1.27	1.73	11.05	1.03	0.41
120	Q95_Ago		3.5	1324.41	1324.89	1.39	2.53	13.46	1.02	0.48
120	Qm_ago		10	1324.41	1325.09	1.63	6.15	23.57	1.02	0.68
120	Qr_ago		3.5	1324.41	1324.89	1.39	2.53	13.46	1.02	0.48

Estación	Perfil	Observación	Caudal (m^3/s)	Min. Elev. Canal (m)	Elev. Sup. Agua (m)	Vel. (m/s)	Área Flujo (m^2)	Ancho Sup. Agua (m)	No. Froude	Altura agua (m)
110	Qamb_Ago		2.2	1323.32	1323.7	2.42	0.91	6.12	2	0.38
110	Q95_Ago		3.5	1323.32	1323.76	2.7	1.3	7.21	2.03	0.44
110	Qm_ago		10	1323.32	1323.99	3.11	3.21	12.02	1.92	0.67
110	Qr_ago		3.5	1323.32	1323.76	2.7	1.3	7.21	2.03	0.44
100	Qamb_Ago	Inicio charco pequeño	2.2	1320.56	1321.75	0.17	13	16.51	0.06	1.19
100	Q95_Ago		3.5	1320.56	1321.85	0.24	14.69	16.92	0.08	1.29
100	Qm_ago		10	1320.56	1322.16	0.5	20.03	18.16	0.15	1.6
100	Qr_ago		3.5	1320.56	1321.85	0.24	14.69	16.92	0.08	1.29
90	Qamb_Ago		2.2	1321.17	1321.64	1.4	1.57	8.2	1.02	0.47
90	Q95_Ago		3.5	1321.17	1321.72	1.53	2.29	10.04	1.02	0.55
90	Qm_ago		10	1321.17	1321.96	1.86	5.38	15.85	1.02	0.79
90	Qr_ago		3.5	1321.17	1321.72	1.53	2.29	10.04	1.02	0.55
80	Qamb_Ago		2.2	1318.38	1320.76	0.12	18.38	14.65	0.03	2.38
80	Q95_Ago		3.5	1318.38	1320.85	0.18	19.71	15.18	0.05	2.47
80	Qm_ago		10	1318.38	1321.13	0.41	24.52	20.54	0.12	2.75
80	Qr_ago		3.5	1318.38	1320.85	0.18	19.71	15.18	0.05	2.47
70	Qamb_Ago	Fin charco pequeño	2.2	1320.24	1320.66	1.31	1.68	10.23	1.03	0.42
70	Q95_Ago		3.5	1320.24	1320.73	1.46	2.4	11.6	1.02	0.49
70	Qm_ago		10	1320.24	1320.95	1.78	5.63	18.19	1.02	0.71
70	Qr_ago		3.5	1320.24	1320.73	1.46	2.4	11.6	1.02	0.49
60	Qamb_Ago		2.2	1318.83	1319.25	3.42	0.64	2.56	2.18	0.42
60	Q95_Ago		3.5	1318.83	1319.37	3.58	0.98	3.04	2.01	0.54
60	Qm_ago		10	1318.83	1319.81	3.71	2.7	4.8	1.58	0.98
60	Qr_ago		3.5	1318.83	1319.37	3.58	0.98	3.04	2.01	0.54

En la Figura 5-183 y Figura 5-184 se pueden observar los cambios en la altura de la lámina de agua en el perfil longitudinal del río en el tramo del charco del Diablo y en la sección transversal donde el charco inicia, respectivamente.

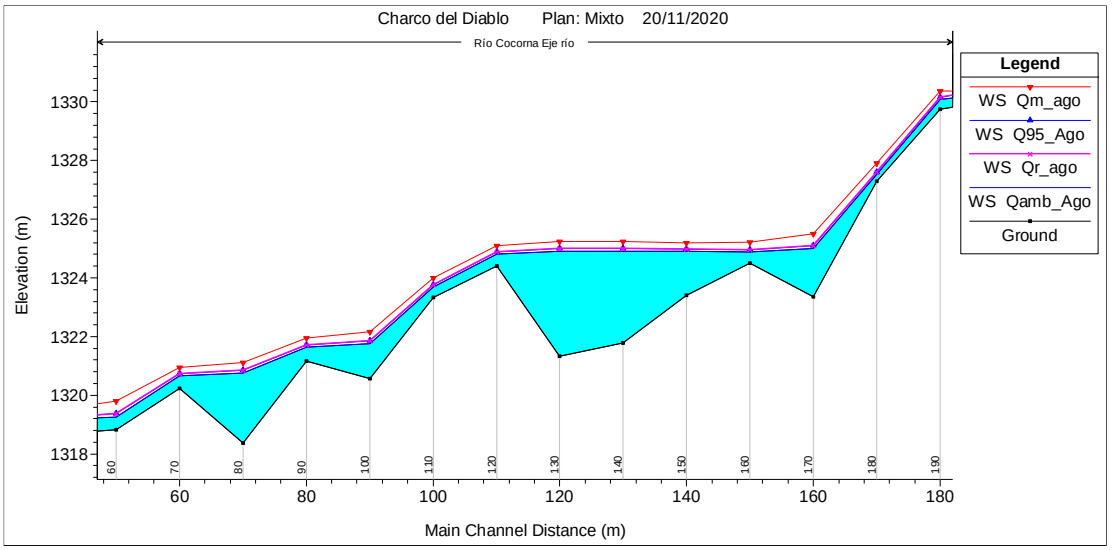


Figura 5-183.Perfil longitudinal del río Cocorná en el tramo de ubicación del charco del Diablo. Mes de agosto

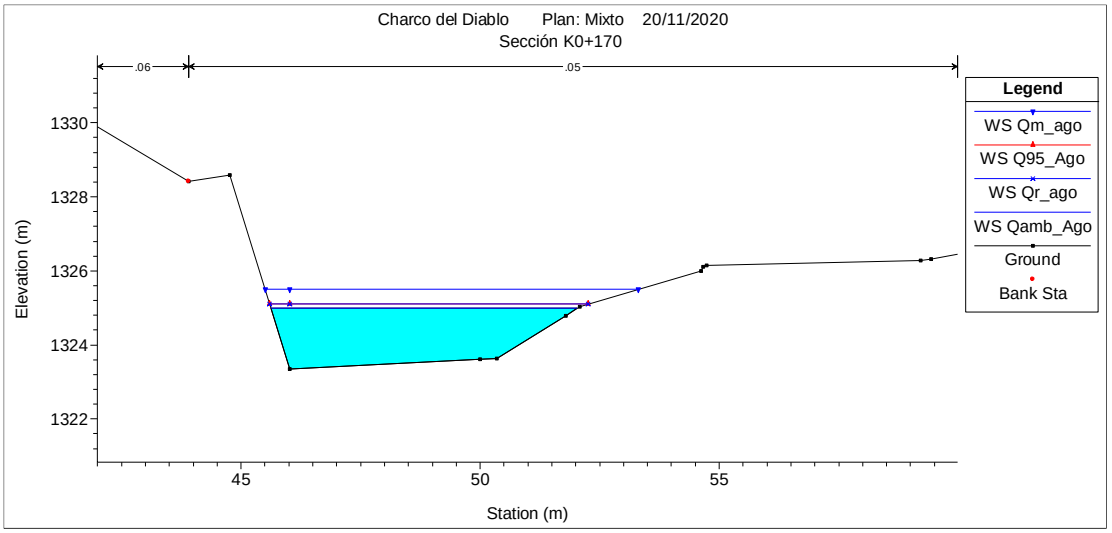


Figura 5-184. Sección transversal 170. Inicio del charco del Diablo. Mes de agosto

Con el fin de evaluar los cambios que se pueden presentar por la operación del proyecto en las características hidráulicas del charco, se determinaron las diferencias en la altura de la lámina de agua, el área de flujo y el ancho de la superficie libre del líquido, en toda la longitud del tramo donde éste se encuentra localizado. Los resultados calculados se presentan en la Tabla 5-146.

En la tabla mencionada se calcularon las diferencias que se presentan entre el caudal mínimo natural del río, es decir el Q95% y el caudal ambiental del proyecto (Qamb), así como entre el caudal medio en condiciones naturales (Qm) y el caudal medio en

operación (Qr). Como se puede observar, las diferencias entre el inicio del primer charco y el final del segundo (secciones 170 a 70), son mayores al comparar los caudales medios sin y con operación del proyecto, con valores que varían entre el 6,1 y el 36,6% en altura; 11,7 y 58,9% en área de flujo y 1,2 y 42,9% para el ancho superficial de lámina de agua.

Para los caudales ambientales (Q95% y Qamb), las diferencias entre ellos para la altura varían entre el 2,4 y 14,6%, para el área de flujo entre el 4,2 y el 31,6% y para el ancho entre el 1,5 y 18,3%.

Es importante mencionar que todas las variables analizadas son menores en el escenario de operación del proyecto, con respecto al escenario sin operación.

Tabla 5-146. Cambios en las características hidráulicas del charco por la operación del proyecto en el mes de agosto

Estación	Perfil	Observación	Caudal (m3/s)	Diferencia de altura (m)	%Diferencia altura	Diferencia área de flujo (m^2)	%Diferencia área de flujo	Diferencia ancho sup. agua (m)	%Diferencia ancho sup. Agua
190	Qamb_Ago	Inicio caída	2.2						
190	Q95_Ago		3.5	-0.08	-19.51	-0.83	-33.60	-2.91	-23.7
190	Qm_ago		10						
190	Qr_ago		3.5	-0.20	-32.79	-3.55	-58.97	-9.12	-42.60
180	Qamb_Ago		2.2						
180	Q95_Ago		3.5	-0.08	-25.00	-0.23	-34.85	-0.49	-16.3
180	Qm_ago		10						
180	Qr_ago		3.5	-0.29	-47.54	-1.12	-62.92	-1.72	-36.44
170	Qamb_Ago	Inicio charco principal	2.2						
170	Q95_Ago		3.5	-0.11	-6.29	-0.7	-8.08	-0.25	-3.8
170	Qm_ago		10						
170	Qr_ago		3.5	-0.40	-18.60	-2.9	-25.09	-1.16	-14.85
160	Qamb_Ago		2.2						
160	Q95_Ago		3.5	-0.08	-17.78	-0.66	-30.00	-0.81	-9.5
160	Qm_ago		10						
160	Qr_ago		3.5	-0.26	-36.62	-2.21	-50.11	-0.1	-1.16
150	Qamb_Ago		2.2						
150	Q95_Ago		3.5	-0.07	-4.43	-0.66	-11.06	-0.72	-7.9
150	Qm_ago		10						
150	Qr_ago		3.5	-0.20	-11.24	-2.01	-25.19	-1.91	-17.35
140	Qamb_Ago		2.2						
140	Q95_Ago		3.5	-0.09	-2.80	-2.33	-4.25	-0.44	-1.5
140	Qm_ago		10						
140	Qr_ago		3.5	-0.24	-6.94	-7.14	-11.74	-1.68	-5.53

Estación	Perfil	Observación	Caudal (m3/s)	Diferencia de altura (m)	%Diferencia altura	Diferencia área de flujo (m^2)	%Diferencia área de flujo	Diferencia ancho sup. agua (m)	%Diferencia ancho sup. Agua
130	Qamb_Ago		2.2						
130	Q95_Ago		3.5	-0.09	-2.45	-2.54	-4.25	-1.26	-4.0
130	Qm_ago		10						
130	Qr_ago		3.5	-0.24	-6.14	-8.07	-11.89	-3.32	-9.50
120	Qamb_Ago	Fin charco principal - inicio segunda caída	2.2						
120	Q95_Ago		3.5	-0.07	-14.58	-0.8	-31.62	-2.41	-17.9
120	Qm_ago		10						
120	Qr_ago		3.5	-0.20	-29.41	-3.62	-58.86	-10.11	-42.89
110	Qamb_Ago		2.2						
110	Q95_Ago		3.5	-0.06	-13.64	-0.39	-30.00	-1.09	-15.1
110	Qm_ago		10						
110	Qr_ago		3.5	-0.23	-34.33	-1.91	-59.50	-4.81	-40.02
100	Qamb_Ago	Inicio charco pequeño	2.2						
100	Q95_Ago		3.5	-0.1	-7.75	-1.69	-11.50	-0.41	-2.4
100	Qm_ago		10						
100	Qr_ago		3.5	-0.31	-19.38	-5.34	-26.66	-1.24	-6.83
90	Qamb_Ago		2.2						
90	Q95_Ago		3.5	-0.08	-14.55	-0.72	-31.44	-1.84	-18.3
90	Qm_ago		10						
90	Qr_ago		3.5	-0.24	-30.38	-3.09	-57.43	-5.81	-36.66
80	Qamb_Ago		2.2						
80	Q95_Ago		3.5	-0.09	-3.64	-1.33	-6.75	-0.53	-3.5
80	Qm_ago		10						
80	Qr_ago		3.5	-0.28	-10.18	-4.81	-19.62	-5.36	-26.10
70	Qamb_Ago	Fin charco pequeño	2.2						
70	Q95_Ago		3.5	-0.07	-14.29	-0.72	-30.00	-1.37	-11.8
70	Qm_ago		10						
70	Qr_ago		3.5	-0.22	-30.99	-3.23	-57.37	-6.59	-36.23
60	Qamb_Ago		2.2						
60	Q95_Ago		3.5	-0.12	-22.22	-0.34	-34.69	-0.48	-15.8
60	Qm_ago		10						
60	Qr_ago		3.5	-0.44	-44.90	-1.72	-63.70	-1.76	-36.67

Para visualizar los resultados de la mancha de inundación y el mapa de profundidades se utiliza el sistema de información geográfica ARC-GIS con la ayuda de la extensión HEC-GeoRAS (ver Figura 5-185 y Figura 5-186). La profundidad máxima del charco

con los caudales medios pasa de 3,90 metros en condiciones naturales a 3,64 metros en operación en el mes de agosto.

Figura 5-185.Mancha de inundación charco del Diablo para los caudales medios en operación (Qr) y en condiciones naturales (Qm)

Figura 5-186.Mapa de profundidades charco del Diablo con el caudal medio del río para el mes de agosto

Figura 5-187. Mapa de profundidades charco del Diablo con el caudal medio del río en operación para el mes de agosto

Una vez analizados los resultados que reflejan las características del charco del Diablo en condiciones medias (sin proyecto), se procede hacer el análisis teniendo en cuenta el caudal ecológico natural (Q95%) y el caudal ambiental mínimo que garantiza el proyecto, y de esta manera tener un estimativo del cambio que se puede presentar en los charcos en las condiciones más extremas, ver Figura 5-188, Figura 5-189 y Figura 5-190.

Como se puede observar en las figuras antes mencionadas, las diferencias en la mancha de inundación no son significativas en la mayor parte del tramo analizado y la profundidad máxima del charco pasa de 3,64 a 3,57 metros cuando el proyecto entre en operación.

Figura 5-188. Mancha de inundación charco del Diablo para el caudal ecológico natural (Q95%) vs el caudal ambiental en operación (Qamb) del mes de agosto

Figura 5-189. Mapa de profundidades charco del Diablo con el caudal ecológico natural del río (Q95%) para el mes de agosto

Figura 5-190. Mapa de profundidades charco del Diablo con el caudal ambiental en operación (Qamb) para el mes de agosto

Se procede nuevamente a correr el programa HEC-RAS donde se encontraron las siguientes características para el mes de mayo, el cual tiene el caudal ambiental más alto del año (Ver Tabla 5-147).

Tabla 5-147. Resultados de la modelación hidráulica en el tramo del charco del Diablo para el caudal medio (Qm) y mínimo natural (Q95%) sin operación y medio (Qr) y ambiental (Qamb) en operación, del mes de mayo (mes con caudal ambiental más alto del año)

Estación	Perfil	Observación	Caudal (m^3/s)	Elev. Min. Canal (m)	Elev. Sup. Agua (m)	Vel. (m/s)	Área Flujo (m^2)	Sup. Ancho Agua (m)	No. Froude	Altura agua (m)
190	Qamb_May	Inicio caída	4.5	1329.75	1330.21	1.45	3.13	14.82	1.00	0.46
190	Q95_May		7.2	1329.75	1330.3	1.53	4.73	19.92	1.00	0.55
190	Qm_may		15	1329.75	1330.45	1.91	7.90	21.75	1.01	0.70
190	Qr_may		6.6	1329.75	1330.28	1.53	4.35	18.85	1.01	0.53
180	Qamb_May		4.5	1327.29	1327.67	5.44	0.83	3.33	3.47	0.38
180	Q95_May		7.2	1327.29	1327.79	5.57	1.30	4.07	3.15	0.50
180	Qm_may		15	1327.29	1328.07	5.75	2.63	5.68	2.70	0.78
180	Qr_may		6.6	1327.29	1327.77	5.54	1.20	3.93	3.19	0.48
170	Qamb_May	Inicio charco principal	4.5	1323.35	1325.17	0.49	9.16	6.86	0.14	1.82
170	Q95_May		7.2	1323.35	1325.35	0.69	10.40	7.36	0.19	2.00
170	Qm_may		15	1323.35	1325.74	1.11	13.49	8.49	0.28	2.39
170	Qr_may		6.6	1323.35	1325.31	0.65	10.13	7.26	0.18	1.96
160	Qamb_May		4.5	1324.5	1325	1.74	2.59	8.53	1.01	0.50
160	Q95_May		7.2	1324.5	1325.11	2.03	3.54	8.57	1.01	0.61
160	Qm_may		15	1324.5	1325.37	2.58	5.82	8.67	1.00	0.87
160	Qr_may		6.6	1324.5	1325.09	1.98	3.33	8.56	1.01	0.59
150	Qamb_May		4.5	1323.4	1325.03	0.70	6.39	9.54	0.27	1.63
150	Q95_May		7.2	1323.4	1325.12	0.99	7.31	10.42	0.38	1.72
150	Qm_may		15	1323.4	1325.25	1.72	8.75	11.66	0.63	1.85
150	Qr_may		6.6	1323.4	1325.1	0.93	7.13	10.25	0.35	1.70
140	Qamb_May		4.5	1321.78	1325.05	0.08	55.13	29.06	0.02	3.27
140	Q95_May		7.2	1321.78	1325.15	0.12	58.31	29.81	0.03	3.37
140	Qm_may		15	1321.78	1325.35	0.23	64.34	31.18	0.05	3.57
140	Qr_may		6.6	1321.78	1325.13	0.11	57.69	29.66	0.03	3.35
130	Qamb_May		4.5	1321.33	1325.05	0.07	61.43	32.37	0.02	3.72
130	Q95_May		7.2	1321.33	1325.15	0.11	65.01	33.94	0.03	3.82
130	Qm_may		15	1321.33	1325.35	0.21	71.92	35.52	0.05	4.02

Estación	Perfil	Observación	Caudal (m^3/s)	Elev. Min. Canal (m)	Elev. Sup. Agua (m)	Vel. (m/s)	Área Flujo (m^2)	Sup. Ancho Agua (m)	No. Froude	Altura agua (m)
130	Qr_may		6.6	1321.33	1325.13	0.10	64.30	33.63	0.02	3.80
120	Qamb_May	Fin charco principal - inicio segunda caída	4.5	1324.41	1324.93	1.43	3.15	15.09	1.00	0.52
120	Q95_May		7.2	1324.41	1325.02	1.56	4.62	19.40	1.02	0.61
120	Qm_may		15	1324.41	1325.19	1.73	8.69	28.93	1.01	0.78
120	Qr_may		6.6	1324.41	1325	1.54	4.28	18.35	1.02	0.59
110	Qamb_May		4.5	1323.32	1323.79	2.87	1.57	7.30	1.98	0.47
110	Q95_May		7.2	1323.32	1323.88	3.20	2.25	7.53	1.87	0.56
110	Qm_may		15	1323.32	1324.09	3.13	4.79	20.79	2.08	0.77
110	Qr_may		6.6	1323.32	1323.87	3.13	2.11	7.48	1.88	0.55
100	Qamb_May	Inicio charco pequeño	4.5	1320.56	1321.92	0.29	15.76	17.17	0.10	1.36
100	Q95_May		7.2	1320.56	1322.05	0.40	18.09	17.72	0.13	1.49
100	Qm_may		15	1320.56	1322.31	0.66	22.84	18.77	0.19	1.75
100	Qr_may		6.6	1320.56	1322.02	0.37	17.63	17.61	0.12	1.46
90	Qamb_May		4.5	1321.17	1321.77	1.60	2.82	11.21	1.02	0.60
90	Q95_May		7.2	1321.17	1321.88	1.73	4.17	13.85	1.01	0.71
90	Qm_may		15	1321.17	1322.08	2.01	7.48	18.79	1.01	0.91
90	Qr_may		6.6	1321.17	1321.85	1.72	3.83	13.24	1.02	0.68
80	Qamb_May		4.5	1318.38	1320.91	0.22	20.58	15.81	0.06	2.53
80	Q95_May		7.2	1318.38	1321.03	0.32	22.61	18.12	0.09	2.65
80	Qm_may		15	1318.38	1321.27	0.55	27.60	23.68	0.16	2.89
80	Qr_may		6.6	1318.38	1321	0.30	22.18	17.53	0.08	2.62
70	Qamb_May	Fin charco pequeño	4.5	1320.24	1320.78	1.51	2.97	12.96	1.01	0.54
70	Q95_May		7.2	1320.24	1320.87	1.66	4.33	15.84	1.02	0.63
70	Qm_may		15	1320.24	1321.06	1.91	7.87	21.65	1.01	0.82
70	Qr_may		6.6	1320.24	1320.85	1.63	4.04	15.27	1.01	0.61
60	Qamb_May		4.5	1318.83	1319.45	3.65	1.23	3.36	1.92	0.62
60	Q95_May		7.2	1318.83	1319.64	3.72	1.94	4.11	1.73	0.81
60	Qm_may		15	1318.83	1320.08	3.61	4.16	5.90	1.37	1.25
60	Qr_may		6.6	1318.83	1319.6	3.70	1.78	3.96	1.76	0.77

En la Figura 5-191 y Figura 5-192 se pueden observar los cambios en la altura de la lámina de agua en el perfil longitudinal del río en el tramo del charco del Diablo y en la sección transversal donde el charco inicia, respectivamente.

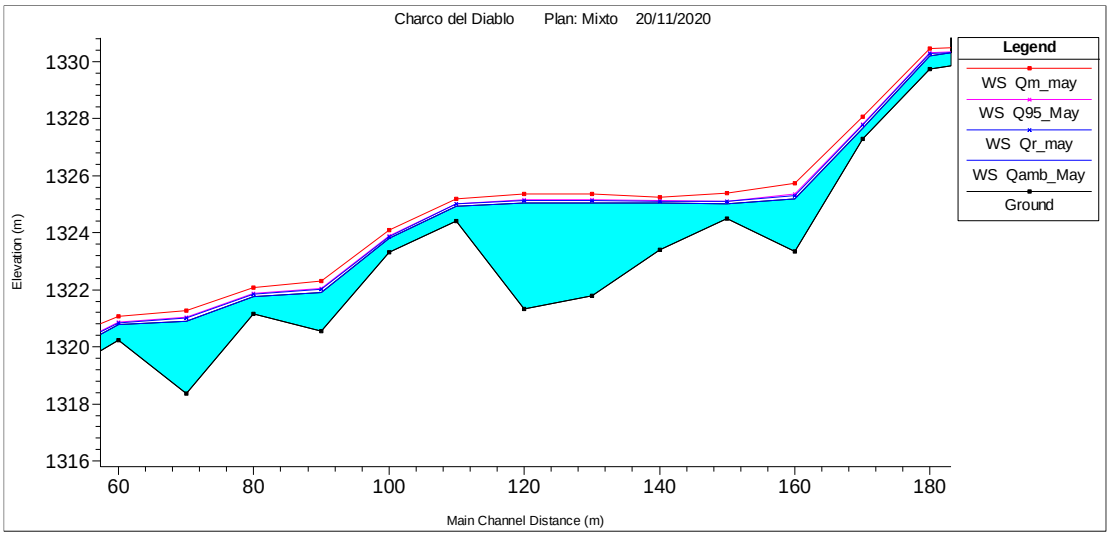


Figura 5-191.Perfil longitudinal del río Cocorná en el tramo de ubicación del charco del Diablo. Mes de mayo

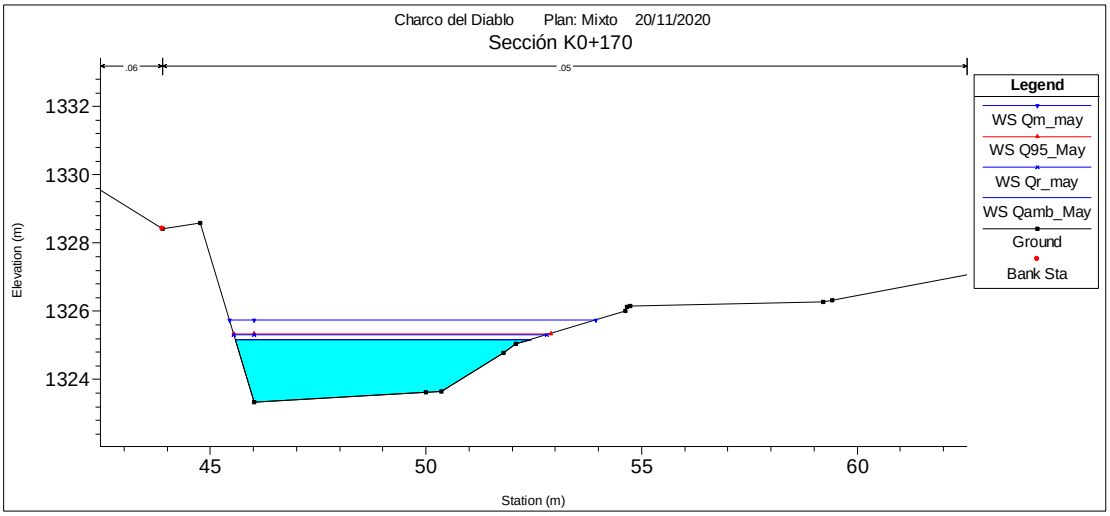


Figura 5-192. Sección transversal 170. Inicio del charco del Diablo. Mes de mayo

Con el fin de evaluar los cambios que se pueden presentar por la operación del proyecto en las características hidráulicas del charco, se determinaron las diferencias en la altura de la lámina de agua, el área de flujo y el ancho de la superficie libre del líquido, en toda la longitud del tramo donde éste se encuentra localizado. Los resultados calculados se presentan en la Tabla 5-148.

Las variaciones que se observaron para el mes de mayo con el caudal medio en condiciones naturales y el caudal medio de operación para las secciones estudiadas varían entre el 5,5 y el 24,4% en altura; 10,3 y 50,7% en área de flujo y 1,3 y 36,6% para el ancho superficial de lámina de agua.

Para los caudales ambientales (Q95% y Qamb), las diferencias entre ellos para la altura varían entre el 2,6 y 14,7%, para el área de flujo entre el 5,4y el 31,8% y para el ancho entre el 0,5 y 22,2%.

Es importante mencionar que todas las variables analizadas son menores en el escenario de operación del proyecto, con respecto al escenario sin operación.

Tabla 5-148. Cambios en las características hidráulicas del charco por la operación del proyecto en el mes de mayo

Estación	Perfil	Observación	Caudal (m3/s)	Diferencia de altura (m)	%Diferencia altura	Diferencia área de flujo (m2)	%Diferencia área de flujo	Diferencia ancho sup. agua (m)	%Diferencia ancho Agua
190	Qamb_May	Inicio caída	4.5						
190	Q95_May		7.2	-0.09	-16.36	-1.6	-33.83	-5.1	-25.60
190	Qm_may		15						
190	Qr_may		6.6	-0.17	-24.29	-3.55	-44.94	-2.9	-13.33
180	Qamb_May		4.5						
180	Q95_May		7.2	-0.12	-24.00	-0.47	-36.15	-0.74	-18.18
180	Qm_may		15						
180	Qr_may		6.6	-0.30	-38.46	-1.43	-54.37	-1.75	-30.81
170	Qamb_May	Inicio charco principal	4.5						
170	Q95_May		7.2	-0.18	-9.00	-1.24	-11.92	-0.5	-6.79
170	Qm_may		15						
170	Qr_may		6.6	-0.43	-17.99	-3.36	-24.91	-1.23	-14.49
160	Qamb_May		4.5						
160	Q95_May		7.2	-0.11	-18.03	-0.95	-26.84	-0.04	-0.47
160	Qm_may		15						
160	Qr_may		6.6	-0.28	-32.18	-2.49	-42.78	-0.11	-1.27
150	Qamb_May		4.5						
150	Q95_May		7.2	-0.09	-5.23	-0.92	-12.59	-0.88	-8.45
150	Qm_may		15						
150	Qr_may		6.6	-0.15	-8.11	-1.62	-18.51	-1.41	-12.09
140	Qamb_May		4.5						

Estación	Perfil	Observación	Caudal (m3/s)	Diferencia de altura (m)	%Diferencia altura	Diferencia área de flujo (m2)	%Diferencia área de flujo	Diferencia ancho sup. agua (m)	%Diferencia ancho sup. Agua
140	Q95_May		7.2	-0.1	-2.97	-3.18	-5.45	-0.75	-2.52
140	Qm_may		15						
140	Qr_may		6.6	-0.22	-6.16	-6.65	-10.34	-1.52	-4.87
130	Qamb_May		4.5						
130	Q95_May		7.2	-0.1	-2.62	-3.58	-5.51	-1.57	-4.63
130	Qm_may		15						
130	Qr_may		6.6	-0.22	-5.47	-7.62	-10.60	-1.89	-5.32
120	Qamb_May	Fin charco principal - inicio segunda caída	4.5						
120	Q95_May		7.2	-0.09	-14.75	-1.47	-31.82	-4.31	-22.22
120	Qm_may		15						
120	Qr_may		6.6	-0.19	-24.36	-4.41	-50.75	-10.58	-36.57
110	Qamb_May		4.5						
110	Q95_May		7.2	-0.09	-16.07	-0.68	-30.22	-0.23	-3.05
110	Qm_may		15						
110	Qr_may		6.6	-0.22	-28.57	-2.68	-55.95	-13.31	-64.02
100	Qamb_May	Inicio charco pequeño	4.5						
100	Q95_May		7.2	-0.13	-8.72	-2.33	-12.88	-0.55	-3.10
100	Qm_may		15						
100	Qr_may		6.6	-0.29	-16.57	-5.21	-22.81	-1.16	-6.18
90	Qamb_May		4.5						
90	Q95_May		7.2	-0.11	-15.49	-1.35	-32.37	-2.64	-19.06
90	Qm_may		15						
90	Qr_may		6.6	-0.23	-25.27	-3.65	-48.80	-5.55	-29.54
80	Qamb_May		4.5						
80	Q95_May		7.2	-0.12	-4.53	-2.03	-8.98	-2.31	-12.75
80	Qm_may		15						
80	Qr_may		6.6	-0.27	-9.34	-5.42	-19.64	-6.15	-25.97
70	Qamb_May	Fin charco pequeño	4.5						
70	Q95_May		7.2	-0.09	-14.29	-1.36	-31.41	-2.88	-18.18
70	Qm_may		15						
70	Qr_may		6.6	-0.21	-25.61	-3.83	-48.67	-6.38	-29.47
60	Qamb_May		4.5						

Estación	Perfil	Observación	Caudal (m3/s)	Diferencia de altura (m)	%Diferencia altura	Diferencia área de flujo (m2)	%Diferencia área de flujo	Diferencia ancho sup. agua (m)	%Diferencia ancho sup. Agua
60	Q95_May		7.2	-0.19	-23.46	-0.71	-36.60	-0.75	-18.25
60	Qm_may		15						
60	Qr_may		6.6	-0.48	-38.40	-2.38	-57.21	-1.94	-32.88

Para visualizar los resultados de la mancha de inundación y el mapa de profundidades se utiliza el sistema de información geográfica ARC-GIS con la ayuda de la extensión HEC-GeoRAS (ver Figura 5-193, Figura 5-194 y Figura 5-195). La profundidad máxima del charco con los caudales medios pasa de 4,00 metros en condiciones naturales a 3,78 metros en operación en el mes de mayo.

Figura 5-193.Mancha de inundación charco del Diablo para los caudales medios en operación (Qr) y en condiciones naturales (Qm)

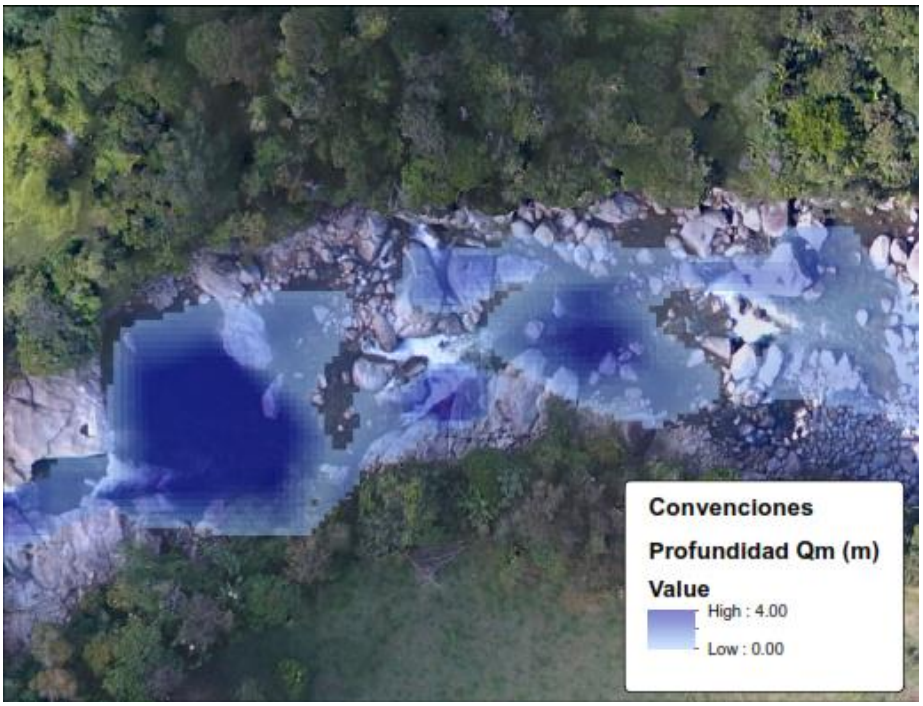


Figura 5-194.Mapa de profundidades charco del Diablo con el caudal medio del río para el mes de mayo

Figura 5-195. Mapa de profundidades charco del Diablo con el caudal medio del río en operación para el mes de mayo

Una vez analizados los resultados que reflejan las características del charco del Diablo en condiciones medias (con y sin proyecto), se procede hacer el análisis teniendo en cuenta el caudal ecológico natural (Q95%) y el caudal ambiental mínimo que garantiza el proyecto, y de esta manera tener un estimativo del cambio que se puede presentar en los charcos en las condiciones más extremas, ver Figura 5-196, Figura 5-197 y Figura 5-198

Como se puede observar en las figuras antes mencionadas, las diferencias en la mancha de inundación no son significativas en la mayor parte del tramo analizado y la profundidad máxima del charco pasa de 3,80 a 3,69 metros cuando el proyecto entre en operación para el mes de mayo.

Figura 5-196. Mancha de inundación charco del Diablo para el caudal ecológico natural (Q95%) vs el caudal ambiental en operación (Qamb) del mes de mayo

Figura 5-197. Mapa de profundidades charco del Diablo con el caudal ecológico natural del río (Q95%) para el mes de mayo

Figura 5-198. Mapa de profundidades charco del Diablo con el caudal ambiental en operación (Qamb) para el mes de mayo

5.1.4.9.5.2 Análisis del charco El Toro (CH4) tramo intermedio 1

Ubicado entre la vereda La Placeta y El Tesoro, alrededor de la abscisa K0+800 de la línea de presión, se encuentra el charco El Toro, la vía de acceso más cercana en margen izquierda, se encuentra a 850 metros desde la vía terciaria La Placeta y en margen derecha a 500 m de la vía privada de la hacienda El Tesoro, estás longitudes son dadas en línea recta. En la Figura 5-182 se puede observar el charco, sus dimensiones son alrededor de 80 metros de largo y 25 metros de ancho.

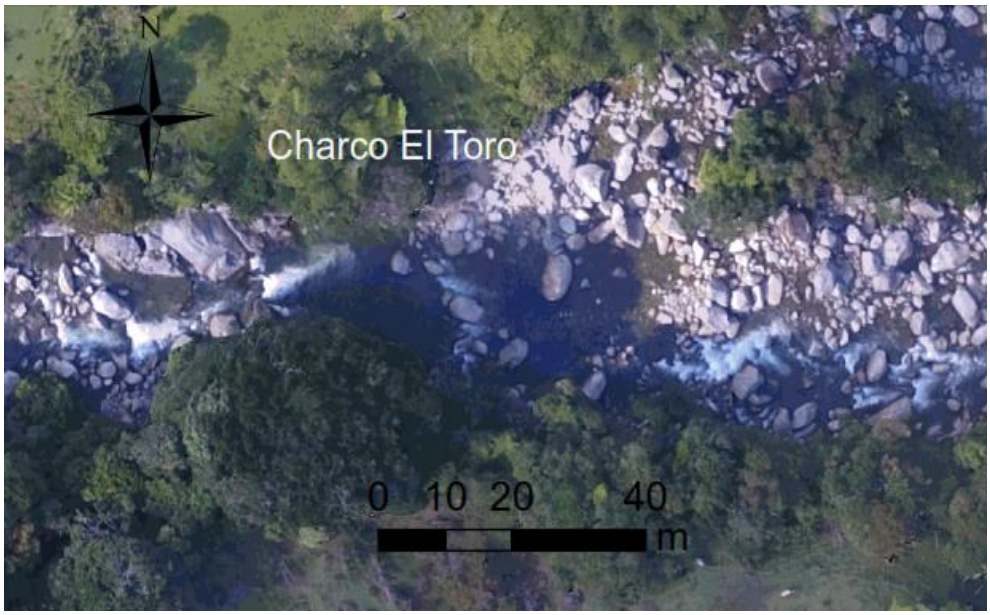


Figura 5-199.Charco El Toro

En el Anexo 5.1.7.3 se presentan los resultados de la modelación en HEC-RAS para los caudales mostrados en la Tabla 5-144. A continuación, se analizarán los resultados de los meses de agosto y mayo, los cuales representan temporadas de lluvias bajas a altas, de esta manera se podrá tener el comportamiento del balneario en las temporadas climáticas más extremas y se evaluarán las condiciones sin proyecto como con proyecto.

Una vez corrido el programa HEC-RAS se encontraron las siguientes características para el mes de agosto, el cual tiene el caudal ambiental más bajo del año, del charco que se ubica entre las secciones 150 a 100 de HEC-RAS (Ver Tabla 5-149 y Figura 5-200). El charco inicia en la estación 150, luego de una caída donde empieza a ganar profundidad y en la estación 100 se genera otra caída para dar fin al charco.

Tabla 5-149. Resultados de la modelación hidráulica en el tramo del charco El Toro para el caudal medio (Qm) y mínimo natural (Q95%) sin operación y medio (Qr) y ambiental (Qamb) en operación, del mes de agosto (mes con caudal ambiental más bajo del año)

Estación	Perfil	Observación	Caudal (m^3/s)	Elev. Min. Canal (m)	Elev. Sup. Agua (m)	Vel. (m/s)	Área Flujo (m^2)	Ancho Sup. Agua (m)	No. Froude	Altura agua (m)
170	Qamb_Ago	Inicio caída	2.2	1272.73	1272.97	1.15	1.91	14.44	1.01	0.24
170	Q95_Ago		3.5	1272.73	1273.02	1.29	2.71	16.46	1.02	0.29
170	Qm_Ago		10	1272.73	1273.19	1.63	6.13	23.27	1.02	0.46
170	Qr_Ago		3.5	1272.73	1273.02	1.29	2.71	16.46	1.02	0.29
160	Qamb_Ago		2.2	1272.11	1272.36	1.44	1.54	10.03	1.17	0.25
160	Q95_Ago		3.5	1272.11	1272.42	1.67	2.12	11.66	1.24	0.31
160	Qm_Ago		10	1272.11	1272.60	2.20	4.60	15.12	1.26	0.49
160	Qr_Ago		3.5	1272.11	1272.42	1.67	2.12	11.66	1.24	0.31
150	Qamb_Ago	Inicio charco El Toro	2.2	1271.53	1271.99	0.85	2.60	12.23	0.58	0.46
150	Q95_Ago		3.5	1271.53	1272.08	0.94	3.72	14.20	0.59	0.55
150	Qm_Ago		10	1271.53	1272.30	1.40	7.12	15.72	0.67	0.77
150	Qr_Ago		3.5	1271.53	1272.08	0.94	3.72	14.20	0.59	0.55
140	Qamb_Ago		2.2	1271.29	1271.68	1.49	1.48	6.77	1.02	0.39
140	Q95_Ago		3.5	1271.29	1271.78	1.57	2.23	8.91	1.00	0.49
140	Qm_Ago		10	1271.29	1272.12	1.56	6.43	14.56	0.75	0.83
140	Qr_Ago		3.5	1271.29	1271.78	1.57	2.23	8.91	1.00	0.49
130	Qamb_Ago		2.2	1270.95	1271.52	0.96	2.30	7.35	0.55	0.57
130	Q95_Ago		3.5	1270.95	1271.64	1.06	3.31	8.75	0.55	0.69
130	Qm_Ago		10	1270.95	1271.98	1.43	6.99	13.71	0.64	1.03
130	Qr_Ago		3.5	1270.95	1271.64	1.06	3.31	8.75	0.55	0.69
120	Qamb_Ago		2.2	1270.74	1271.45	0.75	2.93	8.09	0.40	0.71
120	Q95_Ago		3.5	1270.74	1271.57	0.87	4.01	9.46	0.43	0.83
120	Qm_Ago		10	1270.74	1271.84	1.42	7.03	15.15	0.67	1.10
120	Qr_Ago		3.5	1270.74	1271.57	0.87	4.01	9.46	0.43	0.83
110	Qamb_Ago		2.2	1270.77	1271.31	1.17	1.89	6.63	0.70	0.54
110	Q95_Ago		3.5	1270.77	1271.39	1.46	2.41	8.14	0.84	0.62
110	Qm_Ago		10	1270.77	1271.62	1.51	6.82	27.77	0.94	0.85
110	Qr_Ago		3.5	1270.77	1271.39	1.46	2.41	8.14	0.84	0.62
100	Qamb_Ago	Fin del charco El Toro	2.2	1270.77	1271.11	0.79	2.80	24.51	0.74	0.34
100	Q95_Ago		3.5	1270.77	1271.15	0.95	3.68	25.39	0.80	0.38
100	Qm_Ago		10	1270.77	1271.27	1.44	6.95	30.37	0.96	0.50

Estación	Perfil	Observación	Caudal (m^3/s)	Elev. Min. Canal (m)	Elev. Sup. Agua (m)	Vel. (m/s)	Área Flujo (m^2)	Ancho Sup. Agua (m)	No. Froude	Altura agua (m)
100	Qr_Ago		3.5	1270.77	1271.15	0.95	3.68	25.39	0.80	0.38
90	Qamb_Ago		2.2	1270.54	1270.71	0.97	2.26	24.30	1.02	0.17
90	Q95_Ago		3.5	1270.54	1270.75	1.08	3.23	27.73	1.01	0.21
90	Qm_Ago		10	1270.54	1270.87	1.40	7.17	37.00	1.01	0.33
90	Qr_Ago		3.5	1270.54	1270.75	1.08	3.23	27.73	1.01	0.21

En la Figura 5-200 y Figura 5-201 se pueden observar los cambios en la altura de la lámina de agua en el perfil longitudinal del río en el tramo del charco El Toro y en la sección transversal donde el charco inicia, respectivamente.

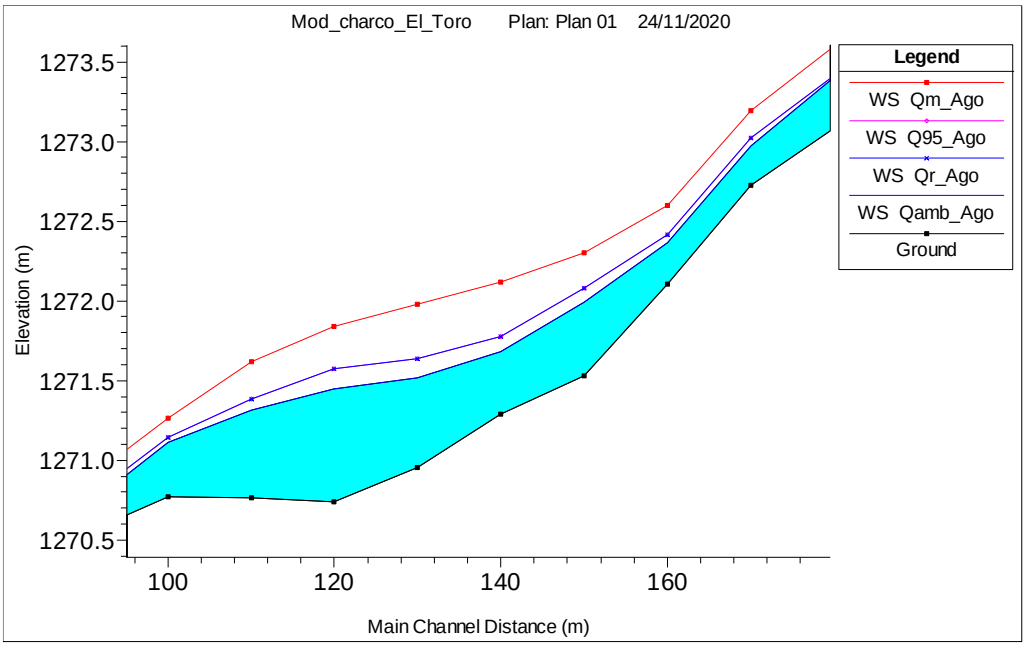


Figura 5-200.Perfil longitudinal del río Cocorná en el tramo de ubicación del charco El Toro. Mes de agosto

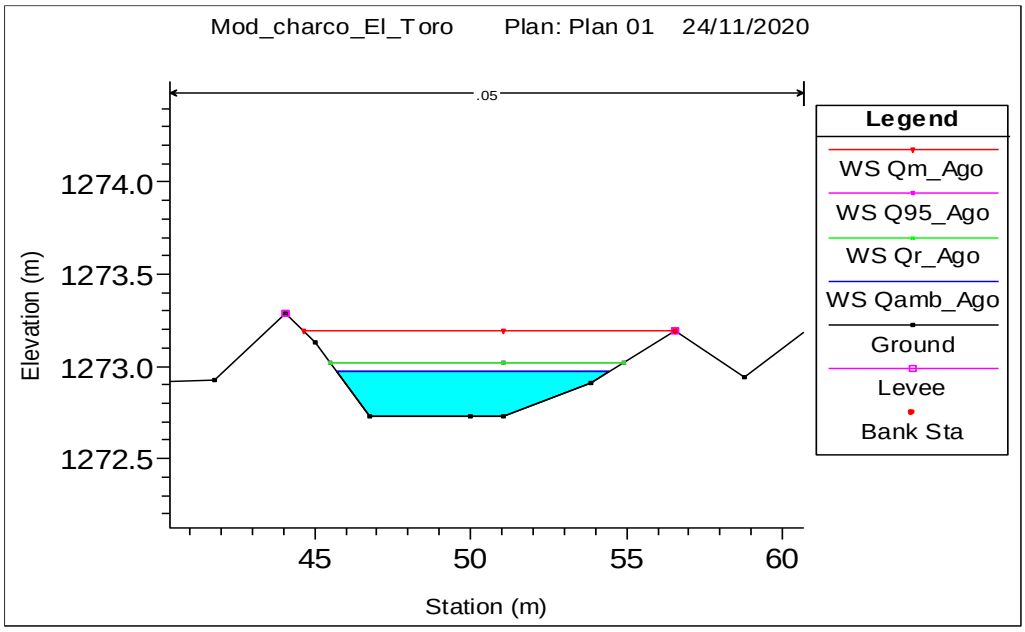


Figura 5-201. Sección transversal 170. Inicio del charco El Toro. Mes de agosto

Con el fin de evaluar los cambios que se pueden presentar por la operación del proyecto en las características hidráulicas del charco, se determinaron las diferencias en la altura de la lámina de agua, el área de flujo y el ancho de la superficie libre del líquido, en toda la longitud del tramo donde éste se encuentra localizado. Los resultados calculados se presentan en la Tabla 5-150.

Las variaciones que se observaron para el mes de agosto con el caudal medio en condiciones naturales y el caudal medio de operación para las secciones estudiadas varían entre el 24,0 y el 40,9% en altura; 42,9 y 65,3% en área de flujo y 9,6 y 70,6% para el ancho superficial de lámina de agua.

Para los caudales ambientales (Q95% y Qamb), las diferencias entre ellos para la altura varían entre el 10,5 y 20,4%, para el área de flujo entre el 21,5 y 36,6% y para el ancho entre el 3,5 y 24,0%.

Es importante mencionar que todas las variables analizadas son menores en el escenario de operación del proyecto, con respecto al escenario sin operación.

Tabla 5-150. Cambios en las características hidráulicas del charco por la operación del proyecto en el mes de agosto

Estación	Perfil	Observación	Caudal (m3/s)	Diferencia de altura (m)	%Diferencia altura	Diferencia área de flujo (m²)	%Diferencia área de flujo	Diferencia ancho sup. agua (m)	%Diferencia ancho sup. Agua
170	Qamb_Ago	Inicio caída	2.2						
170	Q95_Ago		3.5	-0.05	-17.24	-0.80	-29.52	-2.02	-12.3
170	Qm_ago		10						
170	Qr_ago		3.5	-0.17	-36.96	-3.42	-55.79	-6.81	-29.27
160	Qamb_Ago		2.2						
160	Q95_Ago		3.5	-0.06	-19.35	-0.58	-27.36	-1.63	-14.0
160	Qm_ago		10						
160	Qr_ago		3.5	-0.18	-36.73	-2.48	-53.91	-3.46	-22.88
150	Qamb_Ago	Inicio charco El Toro	2.2						
150	Q95_Ago		3.5	-0.09	-16.36	-1.12	-30.11	-1.97	-13.9
150	Qm_ago		10						
150	Qr_ago		3.5	-0.22	-28.57	-3.40	-47.75	-1.52	-9.67
140	Qamb_Ago		2.2						
140	Q95_Ago		3.5	-0.10	-20.41	-0.75	-33.63	-2.14	-24.0
140	Qm_ago		10						
140	Qr_ago		3.5	-0.34	-40.96	-4.20	-65.32	-5.65	-38.80
130	Qamb_Ago		2.2						
130	Q95_Ago		3.5	-0.12	-17.39	-1.01	-30.51	-1.40	-16.0
130	Qm_ago		10						
130	Qr_ago		3.5	-0.34	-33.01	-3.68	-52.65	-4.96	-36.18
120	Qamb_Ago		2.2						
120	Q95_Ago		3.5	-0.12	-14.46	-1.08	-26.93	-1.37	-14.5
120	Qm_ago		10						
120	Qr_ago		3.5	-0.27	-24.55	-3.02	-42.96	-5.69	-37.56
110	Qamb_Ago		2.2						
110	Q95_Ago		3.5	-0.08	-12.90	-0.52	-21.58	-1.51	-18.6
110	Qm_ago		10						
110	Qr_ago		3.5	-0.23	-27.06	-4.41	-64.66	-19.63	-70.69
100	Qamb_Ago		2.2						

Estación	Perfil	Observación	Caudal (m3/s)	Diferencia de altura (m)	%Diferencia altura	Diferencia área de flujo (m^2)	%Diferencia área de flujo	Diferencia ancho sup. agua (m)	%Diferencia ancho sup. Agua
100	Q95_Ago	Fin del charco El Toro	3.5	-0.04	-10.53	-0.88	-23.91	-0.88	-3.5
100	Qm_ago		10						
100	Qr_ago		3.5	-0.12	-24.00	-3.27	-47.05	-4.98	-16.40
90	Qamb_Ago		2.2						
90	Q95_Ago		3.5	-0.04	-19.05	-0.97	-30.03	-3.43	-12.4
90	Qm_ago		10						
90	Qr_ago		3.5	-0.12	-36.36	-3.94	-54.95	-9.27	-25.05

Para visualizar los resultados de la mancha de inundación y el mapa de profundidades se utiliza el sistema de información geográfica ARC-GIS con la ayuda de la extensión HEC-GeoRAS (ver Figura 5-202, Figura 5-203 y Figura 5-204). La profundidad máxima del charco con los caudales medios pasa de 1,11 metros en condiciones naturales a 0,83 metros en operación en el mes de agosto.

Figura 5-202.Mancha de inundación charco El Toro para los caudales medios en operación (Qr) y en condiciones naturales (Qm)

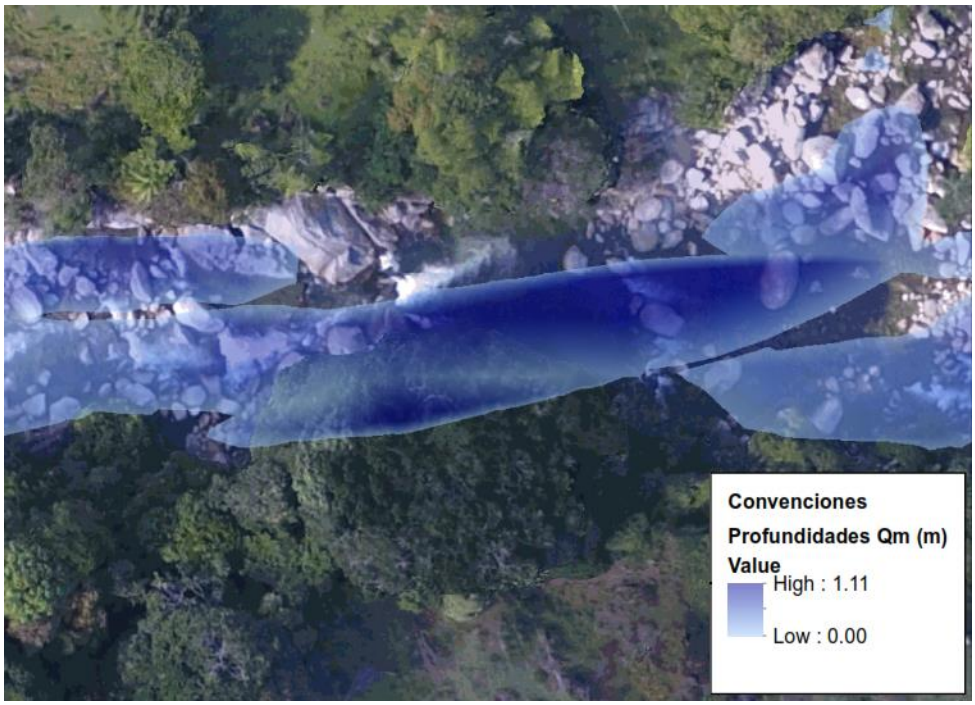


Figura 5-203.Mapa de profundidades charco El Toro con el caudal medio del río para el mes de agosto

Figura 5-204. Mapa de profundidades charco El Toro con el caudal medio del río en operación para el mes de agosto

Una vez analizados los resultados que reflejan las características del charco El Toro en condiciones medias (sin proyecto), se procede hacer el análisis teniendo en cuenta el caudal ecológico natural (Q95%) y el caudal ambiental mínimo que garantiza el proyecto, y de esta manera tener un estimativo del cambio que se puede presentar en los charcos en las condiciones más extremas, ver Figura 5-205, Figura 5-206 y Figura 5-207.

Como se puede observar en las figuras antes mencionadas, las diferencias en la mancha de inundación no son significativas en la mayor parte del tramo analizado y la profundidad máxima del charco pasa de 0,83 a 0,71 metros cuando el proyecto entre en operación.

Figura 5-205. Mancha de inundación charco El Toro para el caudal ecológico natural (Q95%) vs el caudal ambiental en operación (Qamb) del mes de agosto

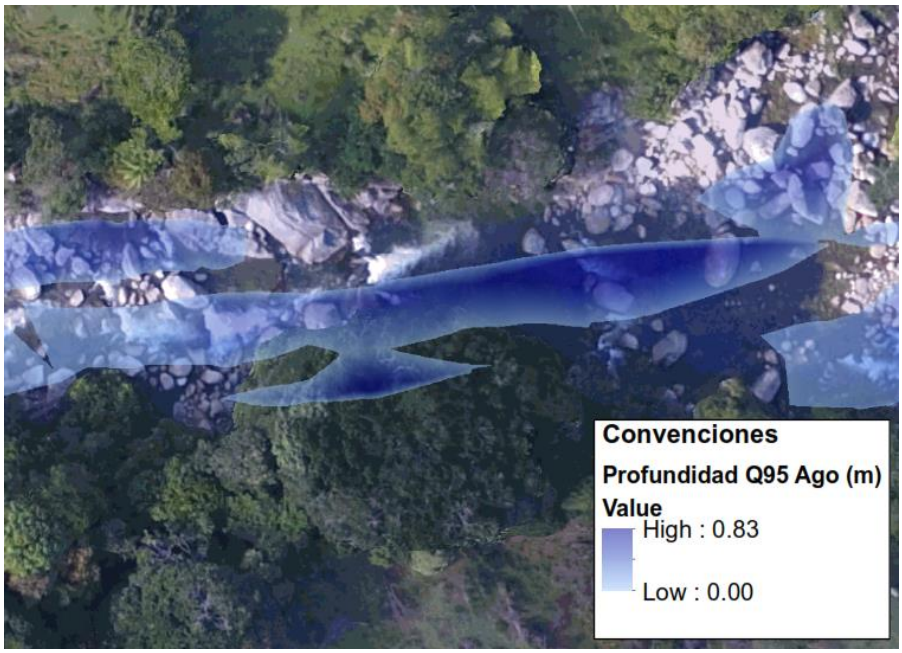


Figura 5-206. Mapa de profundidades charco El Toro con el caudal ecológico natural del río (Q95%) para el mes de agosto

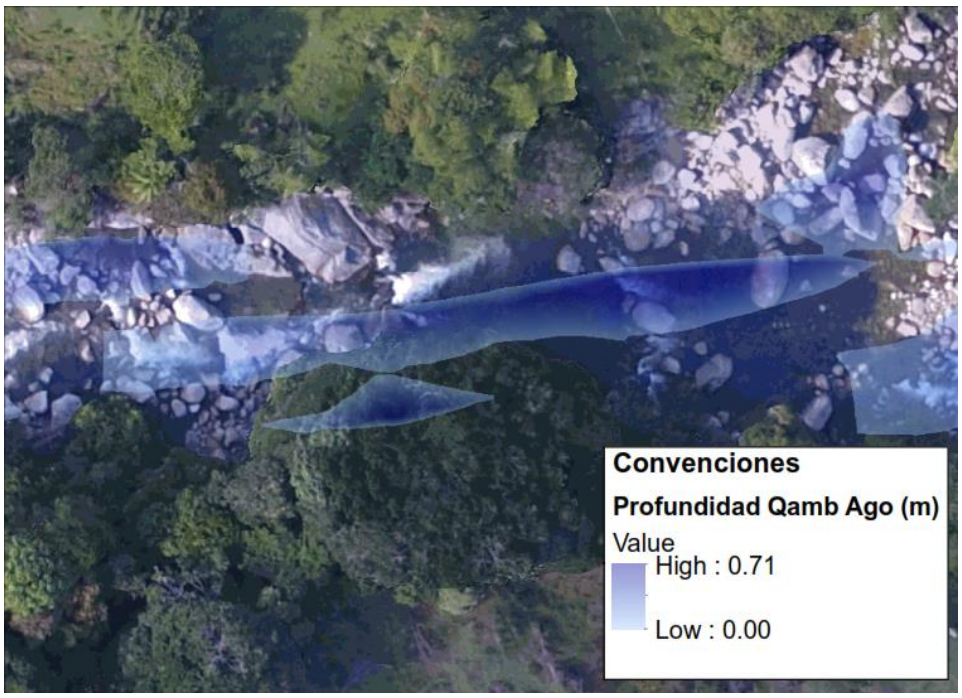


Figura 5-207. Mapa de profundidades charco El Toro con el caudal ambiental en operación (Qamb) para el mes de agosto

Se procede nuevamente a correr el programa HEC-RAS donde se encontraron las siguientes características para el mes de mayo, el cual tiene el caudal ambiental más alto del año, (Ver Tabla 5-151,Figura 5-208).

Tabla 5-151. Resultados de la modelación hidráulica en el tramo del charco El Toro para el caudal medio (Qm) y mínimo natural (Q95%) sin operación y medio (Qr) y ambiental (Qamb) en operación, del mes de mayo (mes con caudal ambiental más alto del año)

Estación	Perfil	Observación	Caudal (m^3/s)	Elev. Min. Canal (m)	Elev. Sup. Agua (m)	Vel. (m/s)	Flujo Área (m^2)	Ancho Sup. Agua (m)	No. Froude	Altura agua (m)
170	Qamb_May	Inicio caída	4.5	1272.73	1273.09	1.61	2.8	10.43	0.99	0.36
170	Q95_May		7.2	1272.73	1273.2	1.6	4.5	16.18	0.97	0.47
170	Qm_May		15	1272.73	1273.29	1.77	8.48	24.88	0.97	0.56
170	Qr_May		6.6	1272.73	1273.18	1.76	3.75	11.69	0.99	0.45
160	Qamb_May		4.5	1272.11	1272.43	2.06	2.2	11.87	1.52	0.32
160	Q95_May		7.2	1272.11	1272.5	2.31	3.15	13.71	1.53	0.39
160	Qm_May		15	1272.11	1272.69	2.52	6.06	15.72	1.28	0.58
160	Qr_May		6.6	1272.11	1272.48	2.35	2.83	13.13	1.6	0.37
150	Qamb_May	Inicio charco El Toro	4.5	1271.53	1272.12	1.03	4.35	14.56	0.6	0.59
150	Q95_May		7.2	1271.53	1272.22	1.23	5.84	15.19	0.63	0.69
150	Qm_May		15	1271.53	1272.44	1.61	9.32	16.39	0.68	0.91
150	Qr_May		6.6	1271.53	1272.2	1.19	5.54	15.07	0.63	0.67
140	Qamb_May		4.5	1271.29	1271.85	1.54	2.93	10.46	0.93	0.56
140	Q95_May		7.2	1271.29	1272	1.52	4.74	13.67	0.82	0.71
140	Qm_May		15	1271.29	1272.26	1.76	8.53	15.14	0.75	0.97
140	Qr_May		6.6	1271.29	1271.97	1.52	4.34	13.02	0.84	0.68
130	Qamb_May		4.5	1270.95	1271.72	1.12	4.01	9.61	0.55	0.77
130	Q95_May		7.2	1270.95	1271.85	1.34	5.37	11.21	0.62	0.9
130	Qm_May		15	1270.95	1272.12	1.69	8.94	14.29	0.67	1.17
130	Qr_May		6.6	1270.95	1271.82	1.3	5.08	10.79	0.6	0.87
120	Qamb_May		4.5	1270.74	1271.65	0.95	4.75	10.3	0.45	0.91
120	Q95_May		7.2	1270.74	1271.75	1.23	5.85	11.43	0.55	1.01
120	Qm_May		15	1270.74	1271.96	1.62	9.24	20.96	0.78	1.22
120	Qr_May		6.6	1270.74	1271.73	1.17	5.64	11.23	0.53	0.99
110	Qamb_May		4.5	1270.77	1271.46	1.44	3.16	13.33	0.91	0.69
110	Q95_May		7.2	1270.77	1271.57	1.36	5.4	26.32	0.93	0.8
110	Qm_May		15	1270.77	1271.69	1.73	8.94	29.21	0.97	0.92
110	Qr_May		6.6	1270.77	1271.55	1.32	5.1	25.83	0.93	0.78

Estación	Perfil	Observación	Caudal (m^3/s)	Min. Elev. Canal (m)	Elev. Sup. Agua (m)	Vel. (m/s)	Área Flujo (m^2)	Ancho Sup. Agua (m)	No. Froude	Altura agua (m)
100	Qamb_May	Fin del charco El Toro	4.5	1270.77	1271.17	1.06	4.26	26.11	0.84	0.4
100	Q95_May		7.2	1270.77	1271.22	1.26	5.71	28.52	0.9	0.45
100	Qm_May		15	1270.77	1271.33	1.66	9.01	33.17	1.02	0.56
100	Qr_May		6.6	1270.77	1271.21	1.22	5.39	28	0.89	0.44
90	Qamb_May		4.5	1270.54	1270.77	1.15	3.9	29.58	1.01	0.23
90	Q95_May		7.2	1270.54	1270.82	1.29	5.58	33.71	1.01	0.28
90	Qm_May		15	1270.54	1270.93	1.57	9.58	41.36	1.04	0.39
90	Qr_May		6.6	1270.54	1270.81	1.26	5.24	32.9	1.01	0.27

En la Figura 5-208 y la Figura 5-209 se pueden observar los cambios en la altura de la lámina de agua en el perfil longitudinal del río en el tramo del charco El Toro y en la sección transversal donde el charco inicia, respectivamente.

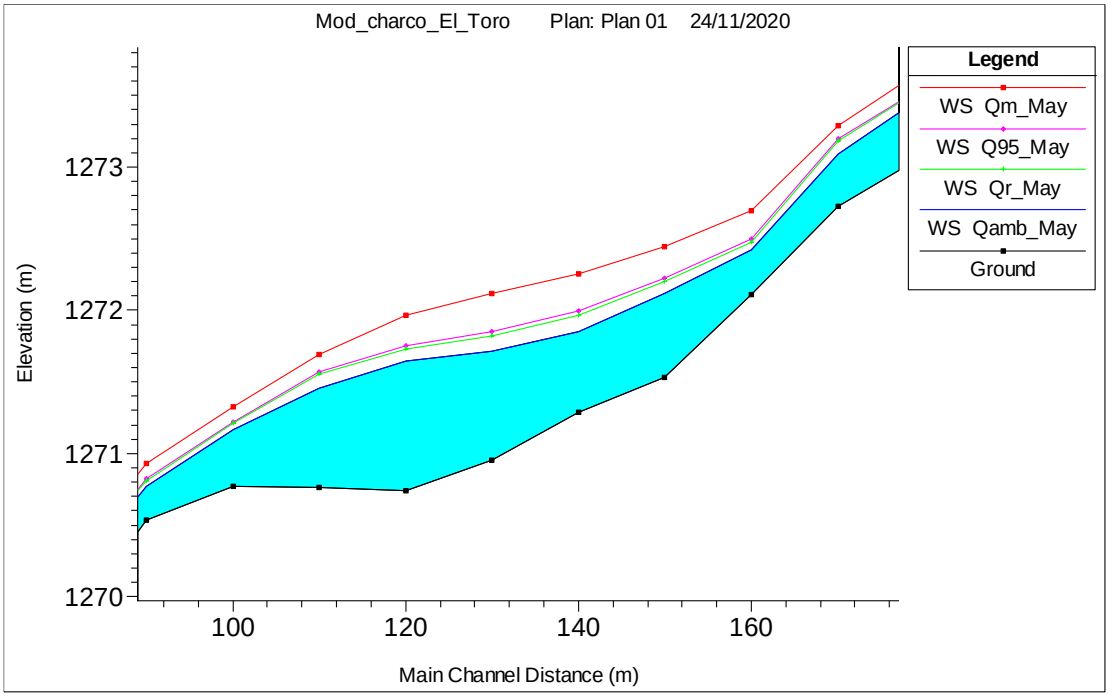


Figura 5-208.Perfil longitudinal del río Cocorná en el tramo de ubicación del charco El Toro. Mes de mayo

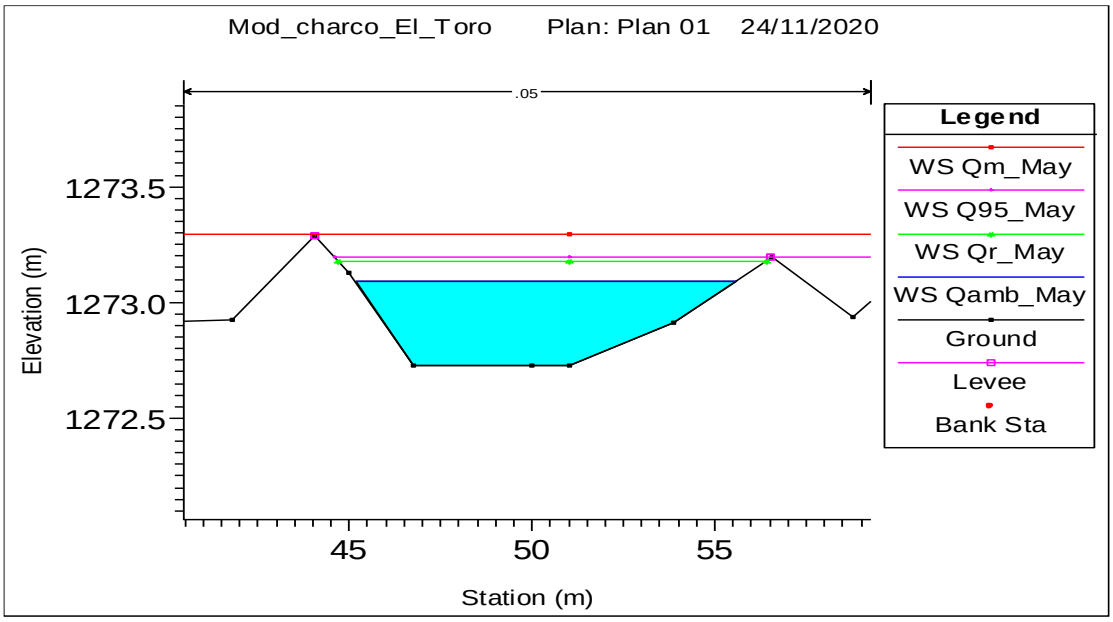


Figura 5-209. Sección transversal 170. Inicio del charco El Toro. Mes de mayo

Con el fin de evaluar los cambios que se pueden presentar por la operación del proyecto en las características hidráulicas del charco, se determinaron las diferencias en la altura de la lámina de agua, el área de flujo y el ancho de la superficie libre del líquido, en toda la longitud del tramo donde éste se encuentra localizado. Los resultados calculados se presentan en la Tabla 5-152.

Las variaciones que se observaron para el mes de mayo con el caudal medio en condiciones naturales y el caudal medio de operación para las secciones estudiadas varían entre el 15,2 y el 29,9% en altura; 38,9 y 49,1% en área de flujo y 8,0 y 46,4% para el ancho superficial de lámina de agua.

Para los caudales ambientales (Q95% y Qamb), las diferencias entre ellos para la altura varían entre el 9,9 y 21,1%, para el área de flujo entre el 18,8 y el 41,4% y para el ancho entre el 4,1 y 49,3%.

Es importante mencionar que todas las variables analizadas son menores en el escenario de operación del proyecto, con respecto al escenario sin operación.

Tabla 5-152. Cambios en las características hidráulicas del charco El Toro por la operación del proyecto en el mes de mayo

Estación	Perfil	Observación	Caudal (m3/s)	Diferencia de altura (m)	%Diferencia altura	Diferencia área de flujo (m²)	%Diferencia área de flujo	Diferencia ancho sup. agua (m)	%Diferencia ancho sup. Agua
170	Qamb_May	Caída	4.5						
170	Q95_May		7.2	-0.11	-23.40	-1.70	-37.78	-5.75	-35.54
170	Qm_May		15						
170	Qr_May		6.6	-0.11	-19.64	-4.73	-55.78	-13.19	-53.01
160	Qamb_May		4.5						
160	Q95_May		7.2	-0.07	-17.95	-0.95	-30.16	-1.84	-13.42
160	Qm_May		15						
160	Qr_May		6.6	-0.21	-36.21	-3.23	-53.30	-2.59	-16.48
150	Qamb_May	Inicio charco El Toro	4.5						
150	Q95_May		7.2	-0.10	-14.49	-1.49	-25.51	-0.63	-4.15
150	Qm_May		15						
150	Qr_May		6.6	-0.24	-26.37	-3.78	-40.56	-1.32	-8.05
140	Qamb_May		4.5						
140	Q95_May		7.2	-0.15	-21.13	-1.81	-38.19	-3.21	-23.48
140	Qm_May		15						
140	Qr_May		6.6	-0.29	-29.90	-4.19	-49.12	-2.12	-14.00
130	Qamb_May		4.5						
130	Q95_May		7.2	-0.13	-14.44	-1.36	-25.33	-1.60	-14.27
130	Qm_May		15						
130	Qr_May		6.6	-0.30	-25.64	-3.86	-43.18	-3.50	-24.49
120	Qamb_May		4.5						
120	Q95_May		7.2	-0.10	-9.90	-1.10	-18.80	-1.13	-9.89
120	Qm_May		15						
120	Qr_May		6.6	-0.23	-18.85	-3.60	-38.96	-9.73	-46.42
110	Qamb_May		4.5						
110	Q95_May		7.2	-0.11	-13.75	-2.24	-41.48	-12.99	-49.35
110	Qm_May		15						
110	Qr_May		6.6	-0.14	-15.22	-3.84	-42.95	-3.38	-11.57
100	Qamb_May	Fin del charco El Toro	4.5						
100	Q95_May		7.2	-0.05	-11.11	-1.45	-25.39	-2.41	-8.45

Estación	Perfil	Observación	Caudal (m3/s)	Diferencia de altura (m)	%Diferencia altura	Diferencia área de flujo (m^2)	%Diferencia área de flujo	Diferencia ancho sup. agua (m)	%Diferencia ancho sup. Agua
100	Qm_May		15						
100	Qr_May		6.6	-0.12	-21.43	-3.62	-40.18	-5.17	-15.59
90	Qamb_May		4.5						
90	Q95_May		7.2	-0.05	-17.86	-1.68	-30.11	-4.13	-12.25
90	Qm_May		15						
90	Qr_May		6.6	-0.12	-30.77	-4.34	-45.30	-8.46	-20.45

Para visualizar los resultados de la mancha de inundación y el mapa de profundidades se utiliza el sistema de información geográfica ARC-GIS con la ayuda de la extensión HEC-GeoRAS (ver la Figura 5-210, Figura 5-211 y Figura 5-212). La profundidad máxima del charco con los caudales medios pasa de 1,23 metros en condiciones naturales a 0,99 metros en operación en el mes de mayo.

Figura 5-210.Mancha de inundación charco El Toro para los caudales medios en operación (Qr) y en condiciones naturales (Qm)

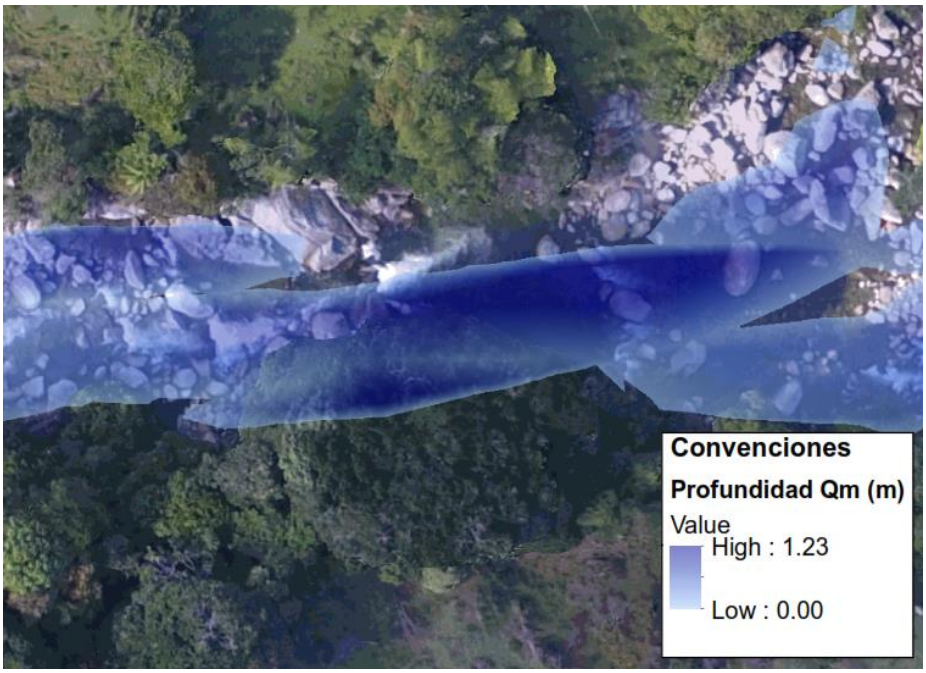


Figura 5-211.Mapa de profundidades El Toro con el caudal medio del río para el mes de mayo

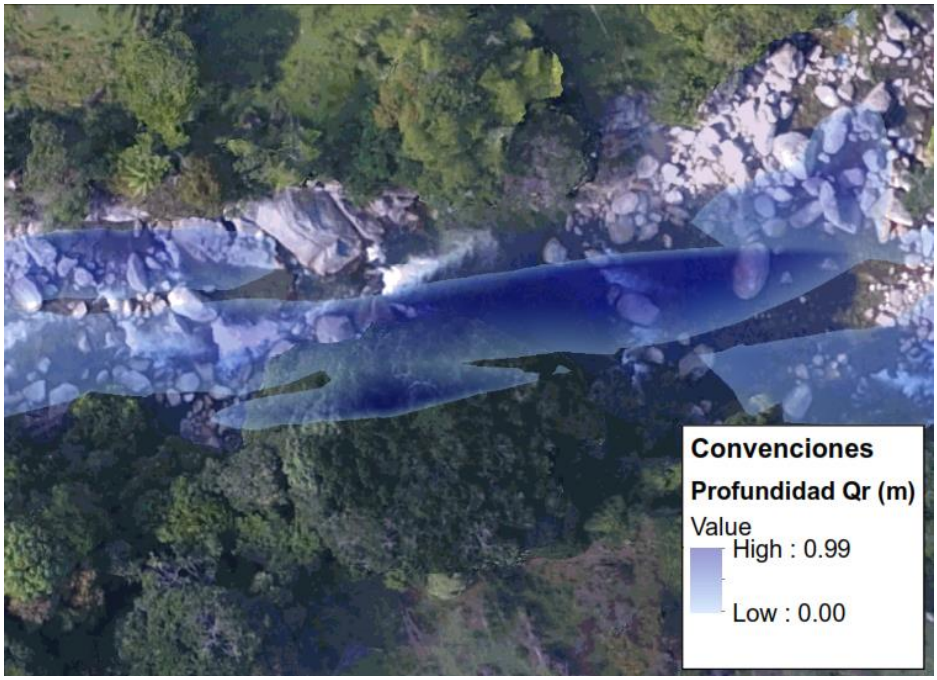


Figura 5-212. Mapa de profundidades charco El Toro con el caudal medio del río en operación para el mes de mayo

Una vez analizados los resultados que reflejan las características del charco El Toro en condiciones medias (con y sin proyecto), se procede hacer el análisis teniendo en

cuenta el caudal ecológico natural (Q95%) y el caudal ambiental mínimo (Qamb) que garantiza el proyecto, y de esta manera tener un estimativo del cambio que se puede presentar en los charcos en las condiciones más extremas, ver Figura 5-213, Figura 5-214 y Figura 5-215.

Como se puede observar en las figuras antes mencionadas, las diferencias en la mancha de inundación no son significativas en la mayor parte del tramo analizado y la profundidad máxima del charco pasa de 1,01 a 0,91 metros cuando el proyecto entre en operación para el mes de mayo.

Figura 5-213. Mancha de inundación charco El Toro para el caudal ecológico natural (Q95%) vs el caudal ambiental en operación (Qamb) del mes de mayo

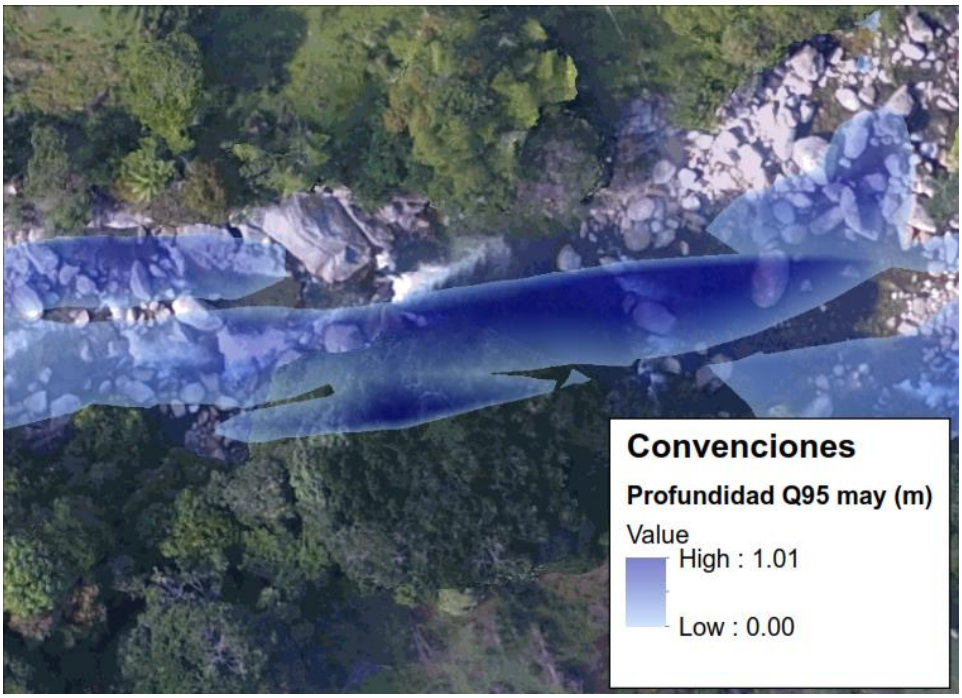


Figura 5-214. Mapa de profundidades charco El Toro con el caudal ecológico natural del río (Q95%) para el mes de mayo

Figura 5-215. Mapa de profundidades charco El Toro con el caudal ambiental en operación (Qamb) para el mes de mayo

5.1.4.9.5.3 Análisis del charco sin nombre (CH11) tramo intermedio 2

Ubicado a 340 metros aguas abajo del puente Mazotes, entre la vereda Las Mercedes y la vereda Mazotes y alrededor de la abscisa K2+000 de la línea de presión, se encuentra el charco sin nombre conocido (CH11). El acceso por margen izquierda es caminando desde la finca La Playa una longitud aproximada de 200 metros, mientras que por margen derecha hay que tomar el camino real que conduce al puente Mazotes, continuar hasta la finca La Playa y posteriormente bajar al charco denominado para este estudio CH11.

En la Figura 5-216 se puede observar el charco con una ronda hídrica importante, de más de 40 metros a ambas márgenes del río. Tanto aguas arriba como aguas debajo de éste se puede observar material rocoso, Las dimensiones del charco son alrededor de 30 metros de largo y 15 metros ancho.

Figura 5-216.Charco Sin Nombre (CH11)

En el Anexo 5.1.7.3 se presentan los resultados de la modelación en HEC-RAS para los caudales mostrados en la Tabla 5-144. A continuación, se analizarán los registros de los meses de agosto y mayo, los cuales representan temporadas de lluvias bajas a altas, de esta manera se podrá tener el comportamiento del balneario en las temporadas climáticas más extremas y se evaluarán las condiciones sin proyecto como con proyecto.

Una vez corrido el programa HEC-RAS se encontraron las siguientes características para el mes de agosto, el cual tiene el caudal ambiental más bajo del año, del charco

que se ubica entre las secciones 40 a 0 de HEC-RAS (Ver Tabla 5-153). El charco inicia en la estación 40 donde se ve el cambio de pendiente para su formación y que tiene una longitud aproximada de 35metros.

Tabla 5-153. Resultados de la modelación hidráulica en el tramo del charco sin nombre CH11 para el caudal medio (Qm) y mínimo natural (Q95%) sin operación y medio (Qr) y ambiental (Qamb) en operación, del mes de agosto (mes con caudal ambiental más bajo del año)

Estación	Perfil	Observación	Caudal (m^3/s)	Elev. Min. Canal (m)	Sup. Elev. Agua (m)	Vel. (m/s)	Área Flujo (m^2)	Sup. Ancho Agua (m)	No. Froude	Altura agua (m)
50	Qamb_Ago		2.2	1183.7	1184.09	1.88	1.17	5.34	1.28	0.39
50	Q95_Ago		3.5	1183.7	1184.17	2.15	1.63	6.16	1.33	0.47
50	Qm_Ago		10	1183.7	1184.43	2.78	3.59	8.62	1.38	0.73
50	Qr_Ago		3.5	1183.7	1184.17	2.15	1.63	6.16	1.33	0.47
40	Qamb_Ago	Inicio charco	2.2	1183	1183.43	1.9	1.16	4.94	1.25	0.43
40	Q95_Ago		3.5	1183	1183.52	2.11	1.66	5.89	1.27	0.52
40	Qm_Ago		10	1183	1183.79	2.8	3.57	8.6	1.38	0.79
40	Qr_Ago		3.5	1183	1183.52	2.11	1.66	5.89	1.27	0.52
30	Qamb_Ago		2.2	1182.54	1183.25	0.82	2.67	7.54	0.44	0.71
30	Q95_Ago		3.5	1182.54	1183.37	0.97	3.6	8.85	0.49	0.83
30	Qm_Ago		10	1182.54	1183.7	1.33	7.53	18.23	0.66	1.16
30	Qr_Ago		3.5	1182.54	1183.37	0.97	3.6	8.85	0.49	0.83
20	Qamb_Ago		2.2	1182.49	1183.18	0.85	2.59	8.07	0.48	0.69
20	Q95_Ago		3.5	1182.49	1183.27	1.02	3.45	9.56	0.54	0.78
20	Qm_Ago		10	1182.49	1183.55	1.29	7.74	19.75	0.65	1.06
20	Qr_Ago		3.5	1182.49	1183.27	1.02	3.45	9.56	0.54	0.78
10	Qamb_Ago		2.2	1182.43	1183.06	0.9	2.44	10.29	0.59	0.63
10	Q95_Ago		3.5	1182.43	1183.14	1.04	3.37	12.66	0.64	0.71
10	Qm_Ago		10	1182.43	1183.37	1.36	7.35	22.06	0.75	0.94
10	Qr_Ago		3.5	1182.43	1183.14	1.04	3.37	12.66	0.64	0.71
0	Qamb_Ago	Fin del Charco	2.2	1182.39	1182.9	0.96	2.28	12.14	0.71	0.51
0	Q95_Ago		3.5	1182.39	1182.98	1.06	3.3	15.21	0.73	0.59
0	Qm_Ago		10	1182.39	1183.18	1.42	7.08	21.48	0.78	0.79
0	Qr_Ago		3.5	1182.39	1182.98	1.06	3.3	15.21	0.73	0.59

En la Figura 5-217 y Figura 5-218 se pueden observar los cambios en la altura de la lámina de agua en el perfil longitudinal del río en el tramo del charco CH11 y en la sección transversal donde el charco inicia, respectivamente.

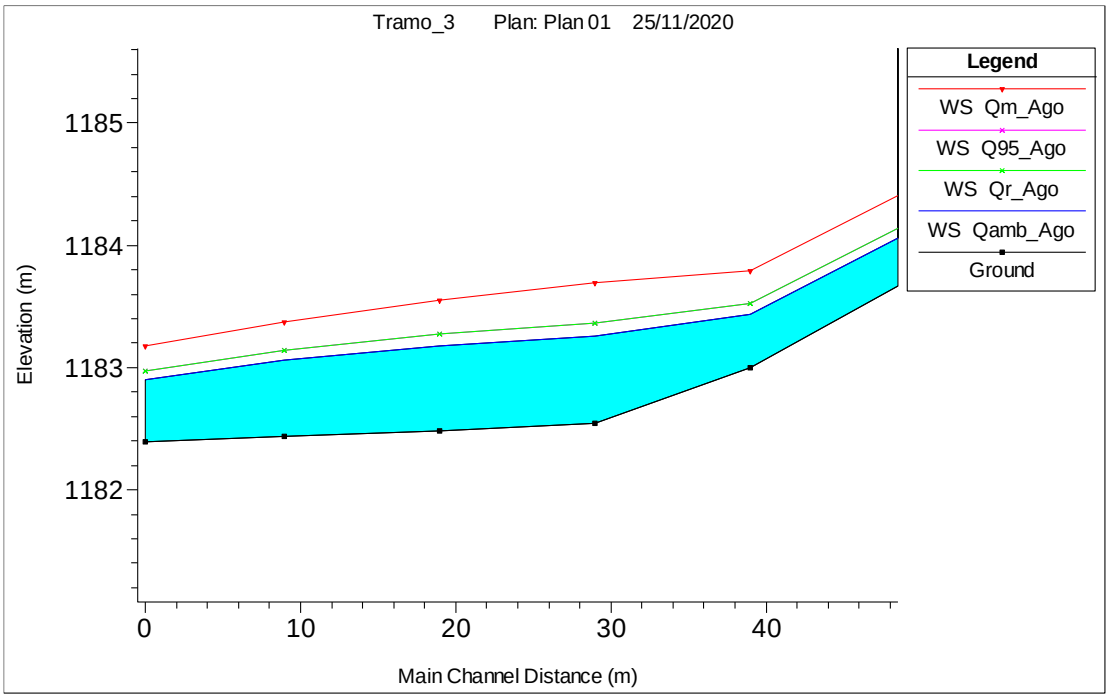


Figura 5-217.Perfil longitudinal del río Cocorná en el tramo de ubicación del charco CH11. Mes de agosto

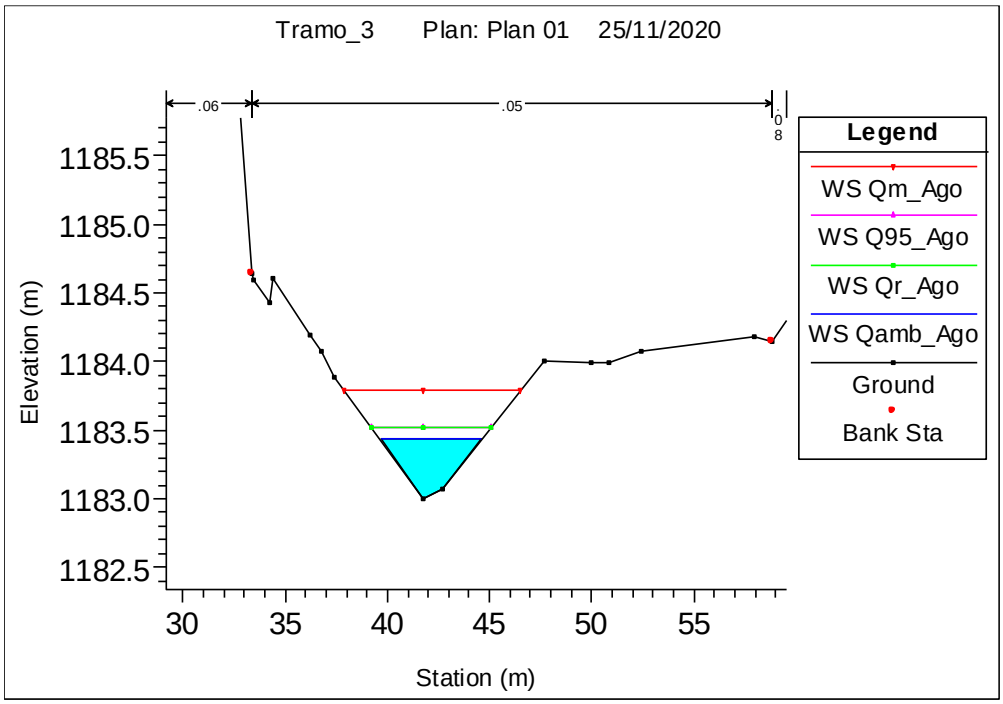


Figura 5-218. Sección transversal 170. Inicio del charco CH11. Mes de agosto

Con el fin de evaluar los cambios que se pueden presentar por la operación del proyecto en las características hidráulicas del charco, se determinaron las diferencias en la altura de la lámina de agua, el área de flujo y el ancho de la superficie libre del líquido, en toda la longitud del tramo donde éste se encuentra localizado. Los resultados calculados se presentan en la Tabla 5-154.

Las variaciones que se observaron para el mes de agosto con el caudal medio en condiciones naturales y el caudal medio de operación para las secciones estudiadas varían entre el 24,4 y el 34,1% en altura; 52,1 y 55,4% en área de flujo y 29,1 y 51,1% para el ancho superficial de lámina de agua.

Para los caudales ambientales (Q95 y Qamb), las diferencias entre ellos para la altura varían entre el 11,2 y 17,3%, para el área de flujo entre el 24,9 y 30,9% y para el ancho entre el 14,8 y 20,1%.

Es importante mencionar que todas las variables analizadas son menores en el escenario de operación del proyecto, con respecto al escenario sin operación.

Tabla 5-154. Cambios en las características hidráulicas del charco CH11 por la operación del proyecto en el mes de agosto

Estación	Perfil	Observación	Caudal (m3/s)	Diferencia de altura (m)	%Diferencia altura	Diferencia área de flujo (m^2)	%Diferencia área de flujo	Diferencia ancho sup. agua (m)	%Diferencia ancho sup. Agua
50	Qamb_Ago		2.2						
50	Q95_Ago		3.5	-0.08	-17.02	-0.46	-28.22	-0.82	-13.31
50	Qm_Ago		10						
50	Qr_Ago		3.5	-0.26	-35.62	-1.96	-54.60	-2.46	-28.54
40	Qamb_Ago	Inicio charco	2.2						
40	Q95_Ago		3.5	-0.09	-17.31	-0.50	-30.12	-0.95	-16.13
40	Qm_Ago		10						
40	Qr_Ago		3.5	-0.27	-34.18	-1.91	-53.50	-2.71	-31.51
30	Qamb_Ago		2.2						
30	Q95_Ago		3.5	-0.12	-14.46	-0.93	-25.83	-1.31	-14.80
30	Qm_Ago		10						
30	Qr_Ago		3.5	-0.33	-28.45	-3.93	-52.19	-9.38	-51.45
20	Qamb_Ago		2.2						
20	Q95_Ago		3.5	-0.09	-11.54	-0.86	-24.93	-1.49	-15.59
20	Qm_Ago		10						
20	Qr_Ago		3.5	-0.28	-26.42	-4.29	-55.43	-10.19	-51.59
10	Qamb_Ago		2.2						
10	Q95_Ago		3.5	-0.08	-11.27	-0.93	-27.60	-2.37	-18.72
10	Qm_Ago		10						
10	Qr_Ago		3.5	-0.23	-24.47	-3.98	-54.15	-9.40	-42.61
0	Qamb_Ago	Fin del Charco	2.2						
0	Q95_Ago		3.5	-0.08	-13.56	-1.02	-30.91	-3.07	-20.18
0	Qm_Ago		10						
0	Qr_Ago		3.5	-0.20	-25.32	-3.78	-53.39	-6.27	-29.19

Para visualizar los resultados de la mancha de inundación y el mapa de profundidades se utiliza el sistema de información geográfica ARC-GIS con la ayuda de la extensión HEC-GeoRAS (ver Figura 5-219, Figura 5-220 y Figura 5-221). La profundidad máxima del charco con los caudales medios pasa de 1,13 metros en condiciones naturales a 0,84 metros en operación en el mes de agosto.

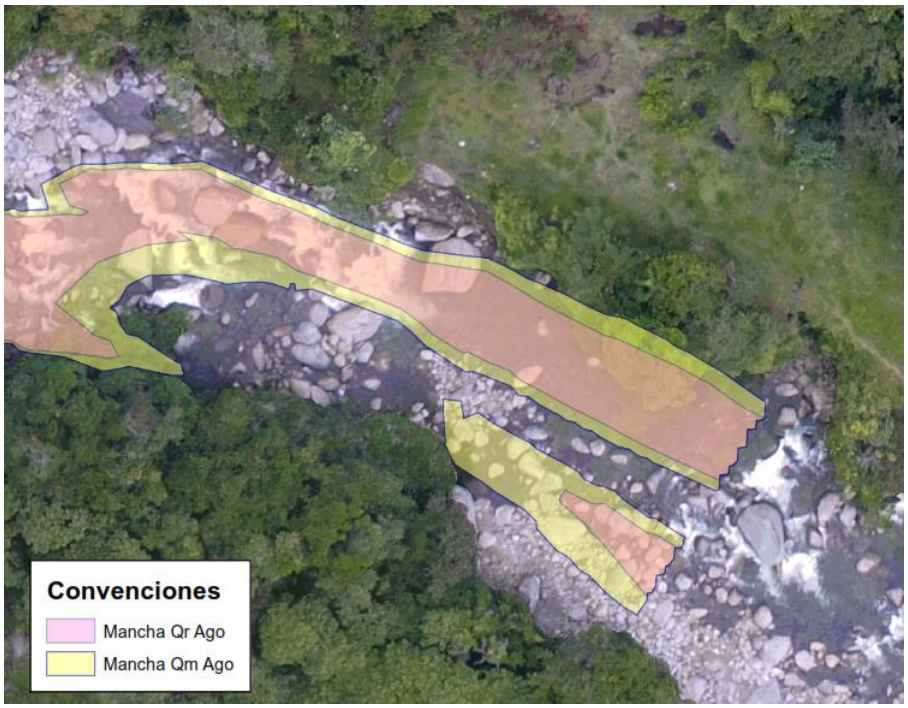


Figura 5-219.Mancha de inundación charco CH11 para los caudales medios en operación (Qr) y en condiciones naturales (Qm)

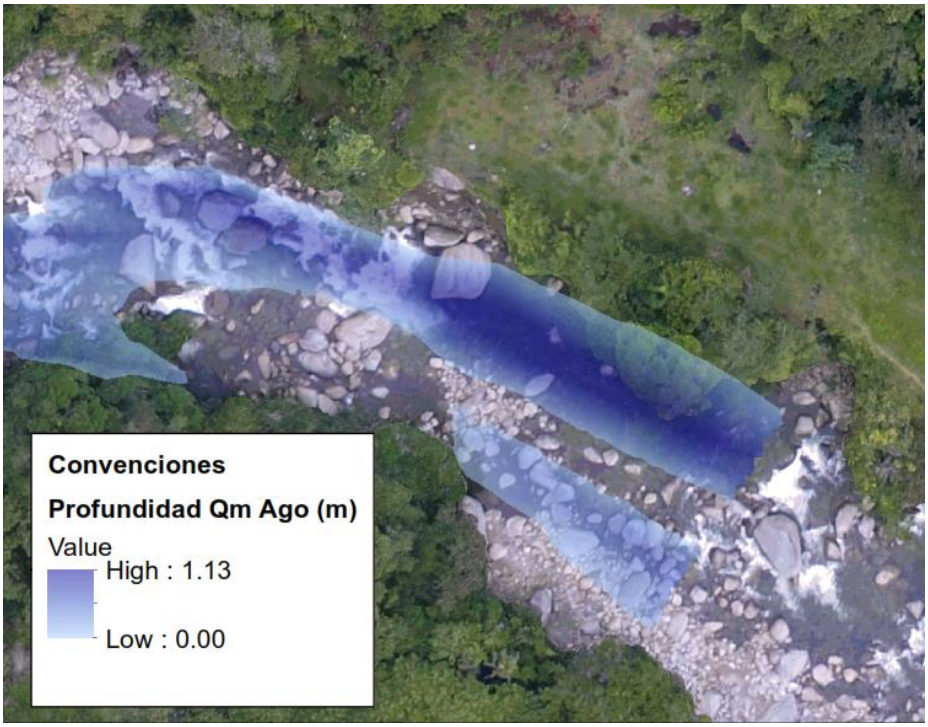


Figura 5-220.Mapa de profundidades charco CH11 con el caudal medio del río para el mes de agosto

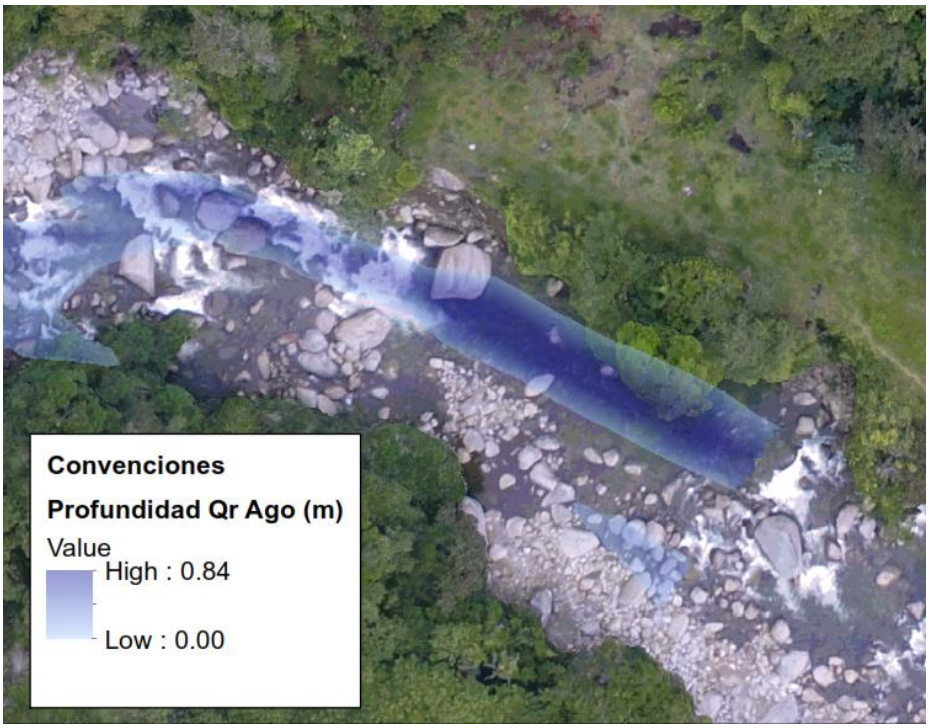


Figura 5-221. Mapa de profundidades charco CH11 con el caudal medio del río en operación para el mes de agosto

Una vez analizados los resultados que reflejan las características del charco CH11 en condiciones medias (sin proyecto), se procede hacer el análisis teniendo en cuenta el caudal ecológico natural (Q95%) y el caudal ambiental mínimo que garantiza el proyecto, y de esta manera tener un estimativo del cambio que se puede presentar en los charcos en las condiciones más extremas, ver Figura 5-222, Figura 5-223 y Figura 5-224

Como se puede observar en las figuras antes mencionadas, las diferencias en la mancha de inundación no son significativas en la mayor parte del tramo analizado y la profundidad máxima del charco pasa de 0,84 a 0,74 metros cuando el proyecto entre en operación.

Figura 5-222. Mancha de inundación charco CH11 para el caudal ecológico natural (Q95%) vs el caudal ambiental en operación (Qamb) del mes de agosto

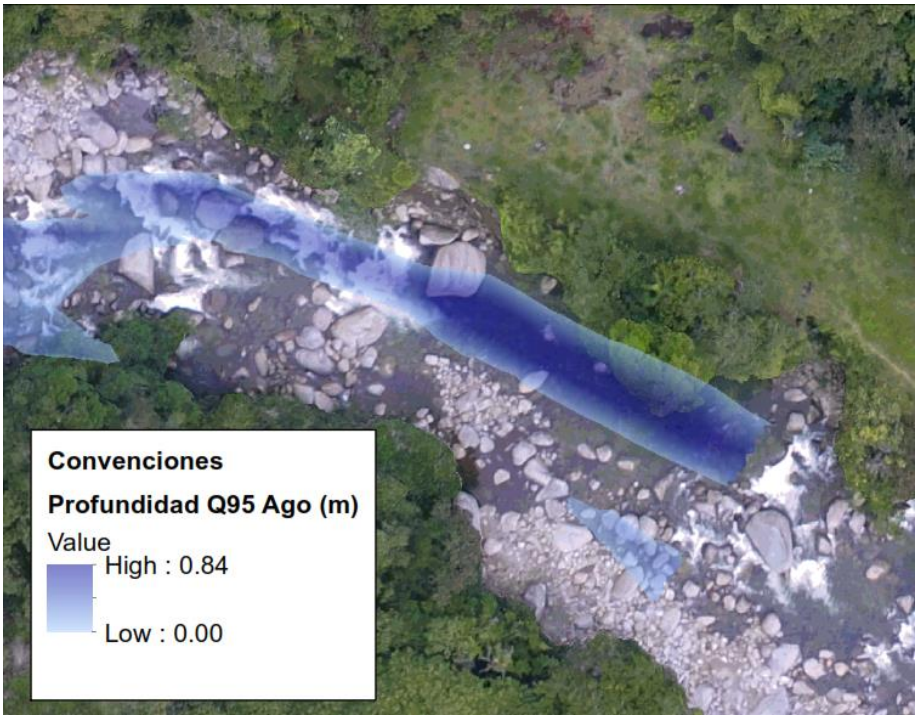


Figura 5-223. Mapa de profundidades charco CH11 con el caudal ecológico natural del río (Q95%) para el mes de agosto

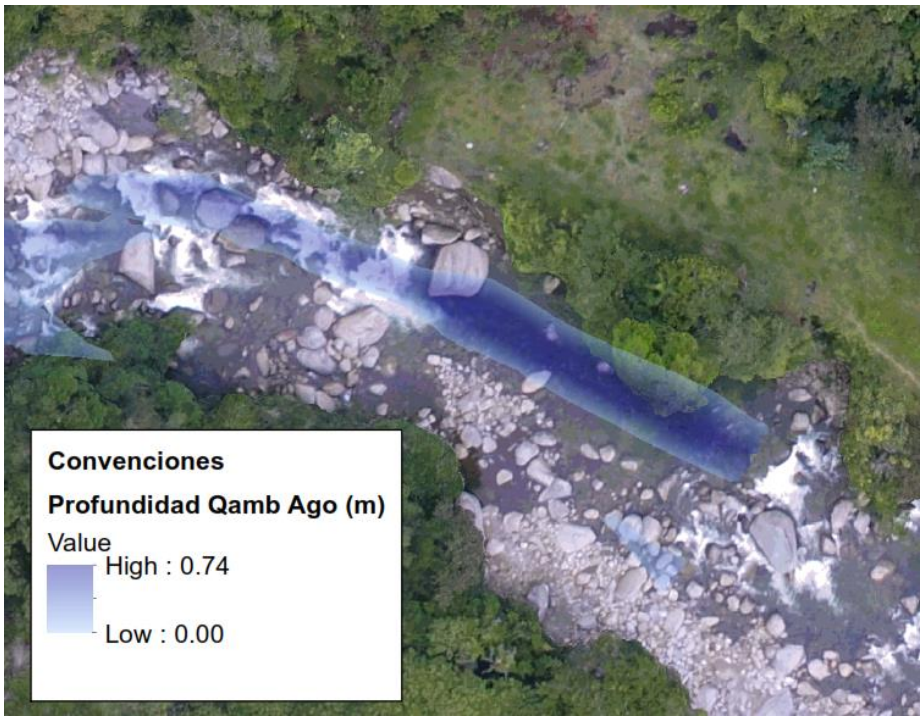


Figura 5-224. Mapa de profundidades charco El Toro con el caudal ambiental en operación (Qamb) para el mes de agosto

Se procede nuevamente a correr el programa HEC-RAS donde se encontraron las siguientes características para el mes de mayo, el cual tiene el caudal ambiental más alto del año, (Ver Tabla 5-155,Figura 5-225 y Figura 5-226).

Tabla 5-155. Resultados de la modelación hidráulica en el tramo del charco CH11 para el caudal medio (Qm) y mínimo natural (Q95%) sin operación y medio (Qr) y ambiental (Qamb) en operación, del mes de mayo (mes con caudal ambiental más alto del año)

Estación	Perfil	Observación	Caudal (m^3/s)	Elev. Min. Canal (m)	Sup. Elev. Agua (m)	Vel. (m/s)	Flujo Área (m^2)	Sup. Ancho Agua (m)	No. Froude	agua Altura (m)
50	Qamb_May		4.5	1183.70	1184.22	2.34	1.93	6.63	1.38	0.52
50	Q95_May		7.2	1183.70	1184.33	2.59	2.78	7.74	1.38	0.63
50	Qm_May		15	1183.70	1184.60	2.75	5.46	13.57	1.38	0.90
50	Qr_May		6.6	1183.70	1184.31	2.54	2.60	7.53	1.38	0.61
40	Qamb_May	Inicio charco	4.5	1183.00	1183.58	2.22	2.03	6.50	1.27	0.58
40	Q95_May		7.2	1183.00	1183.70	2.54	2.84	7.67	1.33	0.70
40	Qm_May		15	1183.00	1184.01	2.63	5.71	14.03	1.31	1.01
40	Qr_May		6.6	1183.00	1183.68	2.47	2.67	7.44	1.32	0.68
30	Qamb_May		4.5	1182.54	1183.45	1.03	4.35	9.99	0.50	0.91

Estación	Perfil	Observación	Caudal (m^3/s)	Elev. Min. Canal (m)	Sup. Elev. Agua (m)	Vel. (m/s)	Flujo Área (m^2)	Sup. Ancho Agua (m)	No. Froude	agua Altura (m)
30	Q95_May		7.2	1182.54	1183.58	1.23	5.85	11.96	0.56	1.04
30	Qm_May		15	1182.54	1183.83	1.43	10.51	24.71	0.69	1.29
30	Qr_May		6.6	1182.54	1183.56	1.18	5.58	11.65	0.55	1.02
20	Qamb_May		4.5	1182.49	1183.34	1.08	4.17	12.11	0.59	0.85
20	Q95_May		7.2	1182.49	1183.47	1.16	6.19	17.85	0.63	0.98
20	Qm_May		15	1182.49	1183.66	1.54	9.88	22.97	0.71	1.17
20	Qr_May		6.6	1182.49	1183.45	1.14	5.80	17.27	0.63	0.96
10	Qamb_May		4.5	1182.43	1183.19	1.11	4.05	14.51	0.67	0.76
10	Q95_May		7.2	1182.43	1183.29	1.26	5.71	18.70	0.73	0.86
10	Qm_May		15	1182.43	1183.48	1.54	9.77	24.64	0.77	1.05
10	Qr_May		6.6	1182.43	1183.27	1.23	5.36	17.89	0.72	0.84
0	Qamb_May	Fin del Charco	4.5	1182.39	1183.02	1.12	4.01	17.04	0.74	0.63
0	Q95_May		7.2	1182.39	1183.11	1.28	5.63	19.79	0.76	0.72
0	Qm_May		15	1182.39	1183.28	1.60	9.44	23.98	0.81	0.89
0	Qr_May		6.6	1182.39	1183.09	1.24	5.31	19.39	0.76	0.70

En la Figura 5-208 y la Figura 5-209 se pueden observar los cambios en la altura de la lámina de agua en el perfil longitudinal del río en el tramo del charco CH11 y en la sección transversal donde el charco inicia, respectivamente.

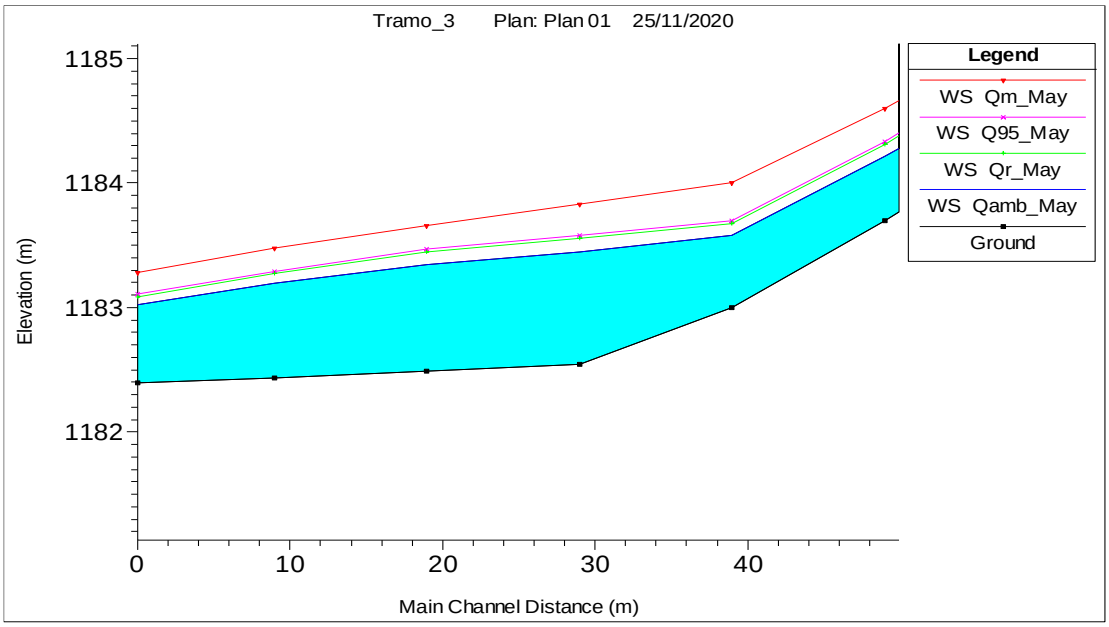


Figura 5-225.Perfil longitudinal del río Cocorná en el tramo de ubicación del charco CH11. Mes de mayo

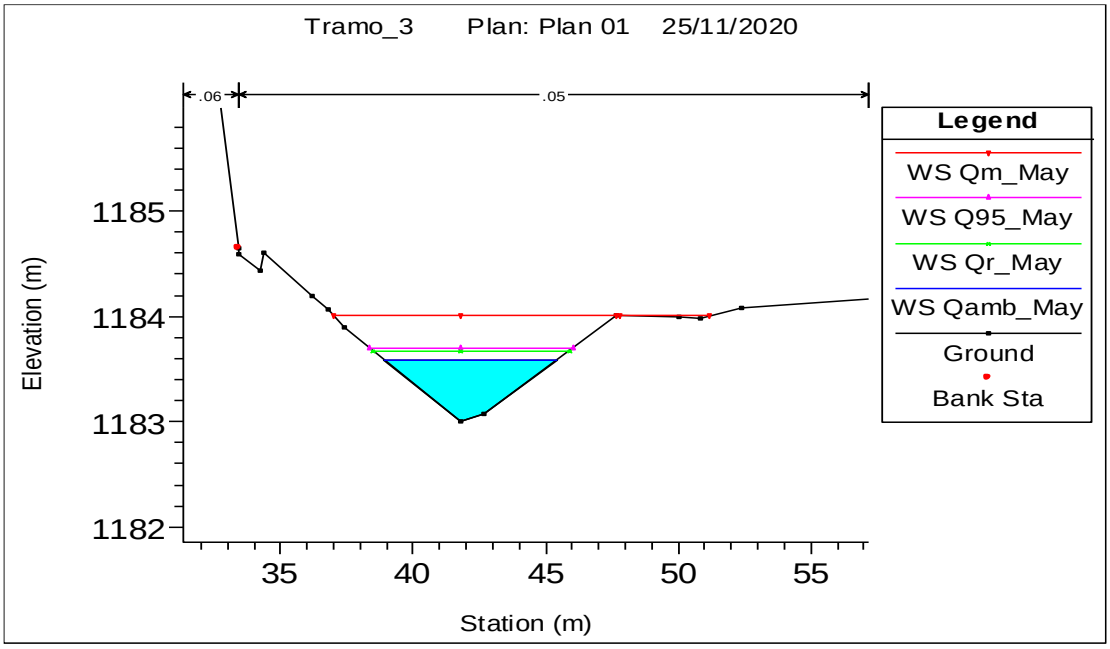


Figura 5-226. Sección transversal 170. Inicio del charco CH11. Mes de mayo

Con el fin de evaluar los cambios que se pueden presentar por la operación del proyecto en las características hidráulicas del charco, se determinaron las diferencias en la altura de la lámina de agua, el área de flujo y el ancho de la superficie libre del

líquido, en toda la longitud del tramo donde éste se encuentra localizado. Los resultados calculados se presentan en la Tabla 5-156.

Las variaciones que se observaron para el mes de mayo con el caudal medio en condiciones naturales y el caudal medio de operación para las secciones estudiadas varían entre el 17,9 y el 32,6% en altura; 41,3 y 53,2% en área de flujo y 19,1 y 52,8% para el ancho superficial de lámina de agua.

Para los caudales ambientales (Q95% y Qamb), las diferencias para la altura varían entre el 11,6 y 17,1%, para el área de flujo entre el 25,6 y el 32,6% y para el ancho entre el 13,9 y 32,1%.

Es importante mencionar que todas las variables analizadas son menores en el escenario de operación del proyecto, con respecto al escenario sin operación.

Tabla 5-156. Cambios en las características hidráulicas del charco por la operación del proyecto en el mes de mayo

Estación	Perfil	Observación	Caudal (m3/s)	Diferencia de altura (m)	%Diferencia altura	Diferencia área de flujo (m^2)	%Diferencia área de flujo	Diferencia sup. ancho agua (m)	%Diferencia sup. ancho Agua
50	Qamb_May		4.5						
50	Q95_May		7.2	-0.11	-17.46	-0.85	-30.58	-1.11	-14.34
50	Qm_May		15						
50	Qr_May		6.6	-0.29	-32.22	-2.86	-52.38	-6.04	-44.51
40	Qamb_May	Inicio charco	4.5						
40	Q95_May		7.2	-0.12	-17.14	-0.81	-28.52	-1.17	-15.25
40	Qm_May		15						
40	Qr_May		6.6	-0.33	-32.67	-3.04	-53.24	-6.59	-46.97
30	Qamb_May		4.5						
30	Q95_May		7.2	-0.13	-12.50	-1.50	-25.64	-1.97	-16.47
30	Qm_May		15						
30	Qr_May		6.6	-0.27	-20.93	-4.93	-46.91	-13.06	-52.85
20	Qamb_May		4.5						
20	Q95_May		7.2	-0.13	-13.27	-2.02	-32.63	-5.74	-32.16
20	Qm_May		15						
20	Qr_May		6.6	-0.21	-17.95	-4.08	-41.30	-5.70	-24.81
10	Qamb_May		4.5						
10	Q95_May		7.2	-0.10	-11.63	-1.66	-29.07	-4.19	-22.41
10	Qm_May		15						

Estación	Perfil	Observación	Caudal (m3/s)	Diferencia de altura (m)	%Diferencia altura	Diferencia área de flujo (m^2)	%Diferencia área de flujo	Diferencia sup. ancho agua (m)	%Diferencia sup. ancho Agua
10	Qr_May		6.6	-0.21	-20.00	-4.41	-45.14	-6.75	-27.39
0	Qamb_May	Fin del Charco	4.5						
0	Q95_May		7.2	-0.09	-12.50	-1.62	-28.77	-2.75	-13.90
0	Qm_May		15						
0	Qr_May		6.6	-0.19	-21.35	-4.13	-43.75	-4.59	-19.14

Para visualizar los resultados de la mancha de inundación y el mapa de profundidades se utiliza el sistema de información geográfica ARC-GIS con la ayuda de la extensión HEC-GeoRAS (ver la Figura 5-227, Figura 5-228 y Figura 5-229). La profundidad máxima del charco con los caudales medios pasa de 1,31 metros en condiciones naturales a 1,00 metros en operación en el mes de mayo.

Figura 5-227.Mancha de inundación charco CH11 para los caudales medios en operación (Qr) y en condiciones naturales (Qm)

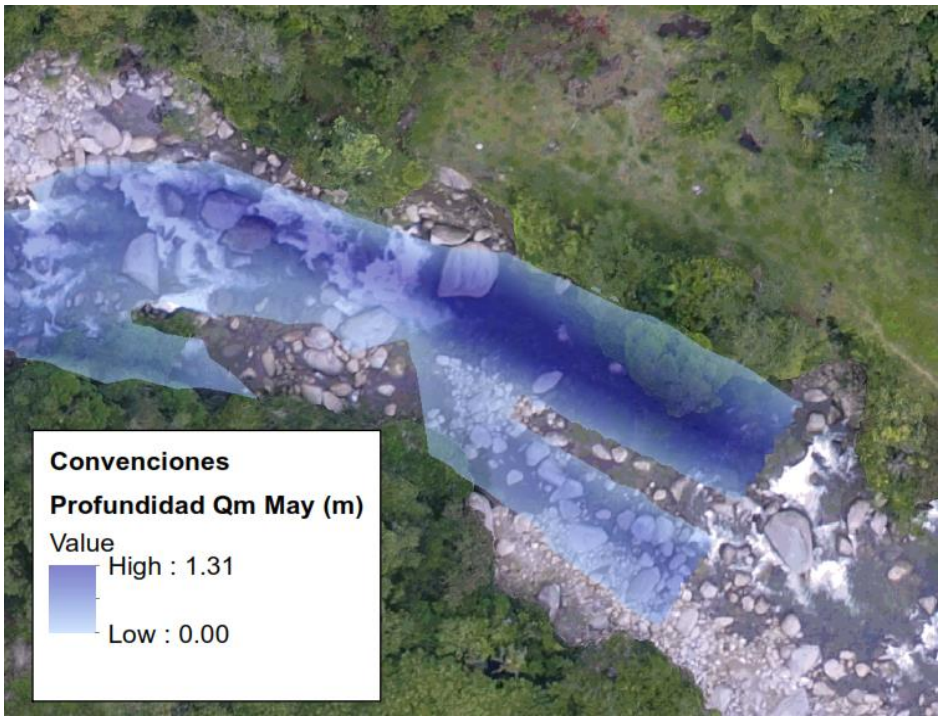


Figura 5-228.Mapa de profundidades charco CH11 con el caudal medio del río para el mes de mayo

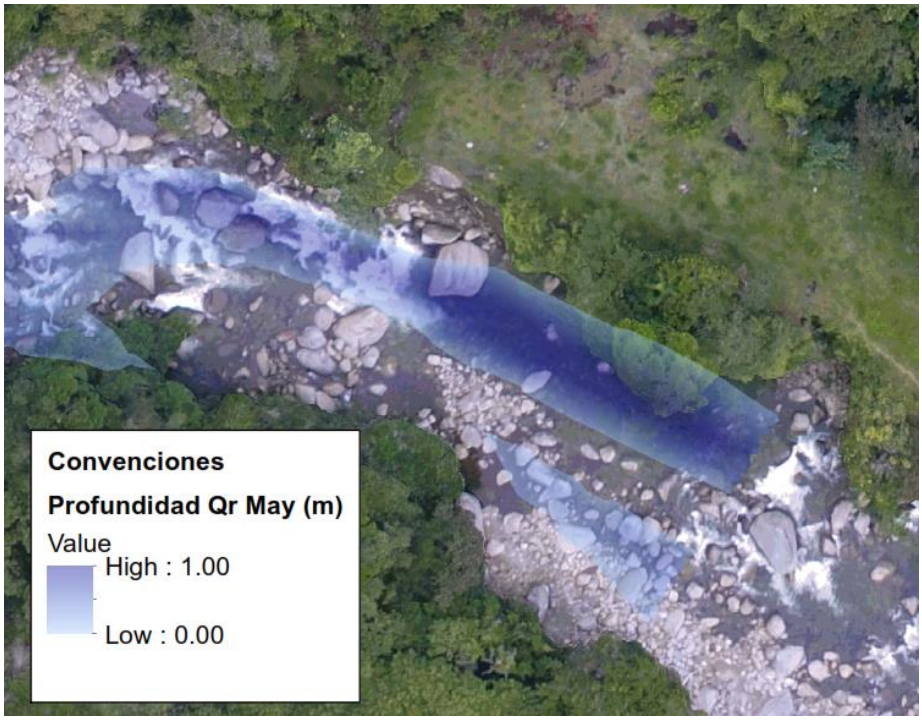


Figura 5-229. Mapa de profundidades charco CH11 con el caudal medio del río en operación para el mes de mayo

Una vez analizados los resultados que reflejan las características del charco CH11 en condiciones medias (sin proyecto), se procede hacer el análisis teniendo en cuenta el caudal ecológico natural (Q95%) y el caudal ambiental mínimo que garantiza el proyecto, y de esta manera tener un estimativo del cambio que se puede presentar en los charcos en las condiciones más extremas, ver Figura 5-213, Figura 5-214 y Figura 5-215

Como se puede observar en las figuras antes mencionadas, las diferencias en la mancha de inundación no son significativas en la mayor parte del tramo analizado y la profundidad máxima del charco pasa de 1,03 a 0,91 metros cuando el proyecto entre en operación para el mes de mayo.

Figura 5-230. Mancha de inundación charco CH11 para el caudal ecológico natural (Q95%) vs el caudal ambiental en operación (Qamb) del mes de mayo

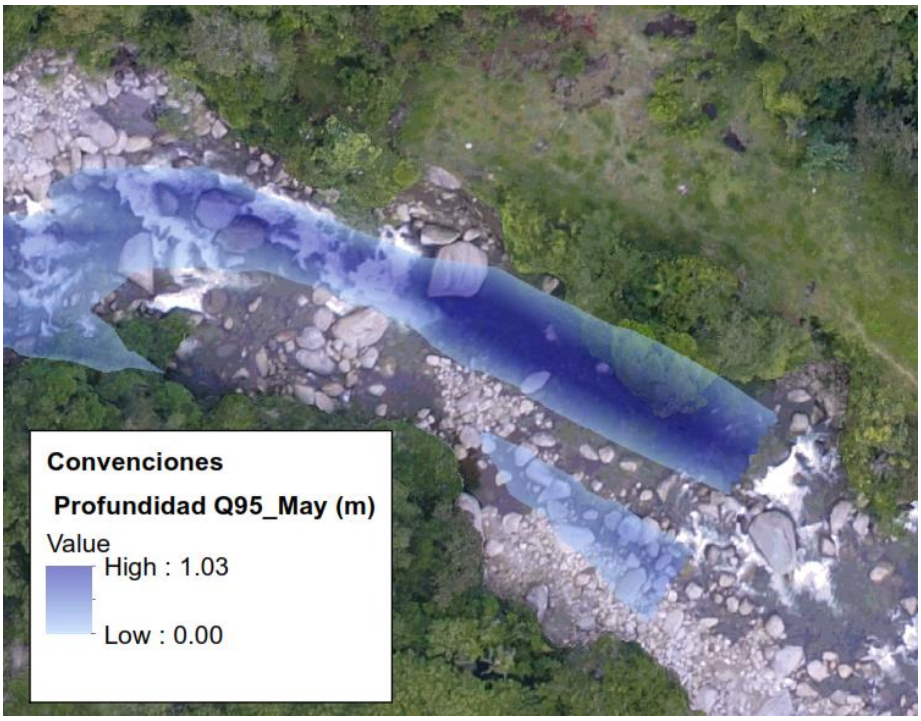


Figura 5-231. Mapa de profundidades charco CH11 con el caudal ecológico natural del río (Q95%) para el mes de mayo

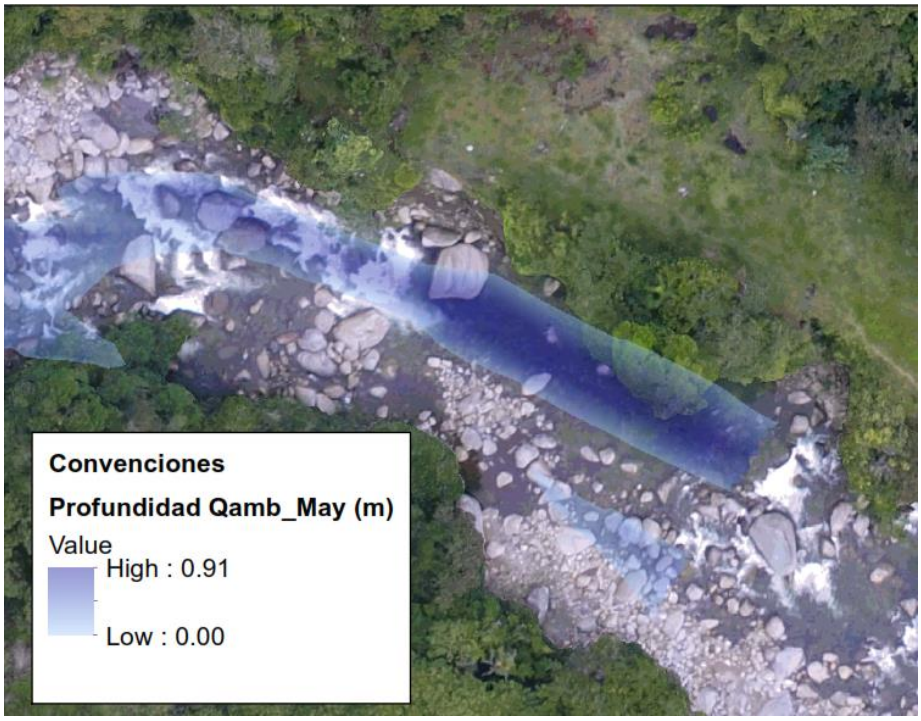


Figura 5-232. Mapa de profundidades charco CH11 con el caudal ambiental en operación (Qamb) para el mes de mayo

5.1.4.9.6 Transporte de sedimentos

Las cuencas hidrográficas como unidad básica de análisis de los procesos hidrológicos, son el área de estudio idónea para el análisis de los fenómenos de erosión, transporte y depositación de sedimentos (ver Figura 5-233). El agua influye en la humedad del suelo y es el principal agente erosivo. Diferentes factores intervienen en el proceso de erosión, tales como: la vegetación (amarra el sustrato, amortigua el impacto de las gotas de agua), las características fisicoquímicas del suelo, los aspectos geotécnicos y litológicos del suelo, la precipitación, la escorrentía, la topografía y los usos del suelo (Posada, 1994).

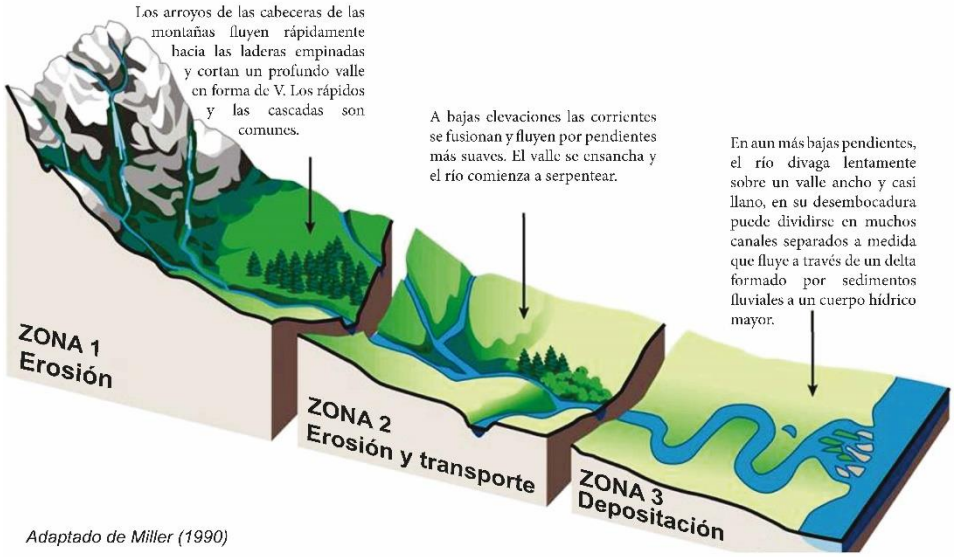


Figura 5-233. Erosión, transporte y depositación de sedimentos en cuencas de montaña

Fuente: Adaptado y traducido de Miller (1990)

Es importante tener la claridad que el transporte de los sedimentos es un componente natural de la geomorfología fluvial y no es generalmente un problema en sí mismo. Los sedimentos juegan un papel importante en el mantenimiento del ambiente fluvial, así como en los sistemas de canales, planicies de inundación, humedales, estuarios y en el ciclo de nutrientes. Adicionalmente, el equilibrio entre agradación y degradación ocurre a lo largo de los cauces naturales no intervenidos (UNESCO, 2010). Las dificultades que pueden presentar los sedimentos, al igual que en los demás procesos de la biosfera, ocurren cuando alteraciones debidas a actividades antrópicas o climatológicas extremas rompen el equilibrio. Entre las afectaciones típicas producidas por la actividad antrópica se encuentran: inadecuados usos del suelo, pérdida de cobertura vegetal, presencia de suelos desnudos, malas prácticas mineras, entre otros, las cuales aumentan el suministro de sedimentos al sistema fluvial.

La Cuenca del Río Cocorná se caracteriza por ser un área hidrográfica con altos niveles de precipitación. Adicionalmente, en la zona de influencia del proyecto predominan las laderas escarpadas o de alta pendiente. Estos dos factores combinados propician que se produzca la erosión del suelo, que es atenuada por coberturas existentes y por la presencia de algunas unidades de suelo con poca erodabilidad. Con el objetivo de estudiar y poder estimar la pérdida de suelo y el transporte de sedimentos en la cuenca, se aplica el Modelo de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Revisada (RUSLE, por sus siglas en inglés), el cual predice la pérdida de suelo promedio anual (t/ha/año) de una superficie de análisis. Este modelo fue presentado por Renard, Foster, Weesies, & McCool (1997), y es una adaptación del modelo USLE de Wischmeier & Smith (1978):

$$A = R * K * L * S * C * P$$

En el modelo, A corresponde a la pérdida de suelo expresada en toneladas/hectárea/año, R es el factor asociado a la lluvia y la escorrentía, K es el factor de erodabilidad del suelo, L es la longitud de la pendiente, S es la inclinación de la pendiente (frecuentemente agrupados como LS), C responde al tipo de cobertura y P corresponde a las prácticas de manejo. En esta ecuación, la pérdida de suelo es obtenida como una multiplicación directa de diferentes factores y no es una suma ponderada. La aplicación del modelo RUSLE a escala de cuenca se desarrolla con herramientas de información geográfica (SIG), en la cual se realiza un álgebra de mapas con los factores (R, K, LS, C, P) como entradas. Para poder aplicar el modelo se utiliza la información geológica, geomorfológica, cartográfica, climatológica, edafológica y de coberturas, obtenida tanto con información primaria como secundaria levantada durante el Estudio de Impacto Ambiental.

El factor R corresponde a la erosividad de las lluvias, el cálculo de éste requiere como insumos datos de intensidad de la lluvia en una resolución detallada (15 minutos), la cual es escasa en el territorio colombiano y en especial en una cuenca con una baja instrumentación como la Cuenca del Río Cocorná. No obstante, algunos trabajos como el de Mesa & Pérez (2002) brindaron aportes significativos al ofrecer modelos para estimar la erosividad en función de la precipitación promedio anual o multianual utilizando datos de alta resolución de seis estaciones en el departamento de Antioquia. En un trabajo más reciente, Ríos (2018) utilizando datos en una alta resolución de forma similar al trabajo de Mesa & Pérez (2002), pero para un mayor número de estaciones, encontró la siguiente relación:

$$R = 4{,}9378 * P - 4999{,}7$$

Donde: R es la erosividad (MJ-mm/ha-h-año) y P es la precipitación media multianual (mm/año).

Aplicando la ecuación anterior y utilizando el ráster de precipitación media multianual obtenemos que la erosividad para el área de la cuenca tributaria a la zona de captación varía entre 8.863 y 16.393 MJ-mm/ha-h-año con un valor medio de 11.626

MJ-mm/ha-h-año, donde los mayores valores se tienen aguas arriba de la zona de captación del proyecto (ver Figura 5-234).

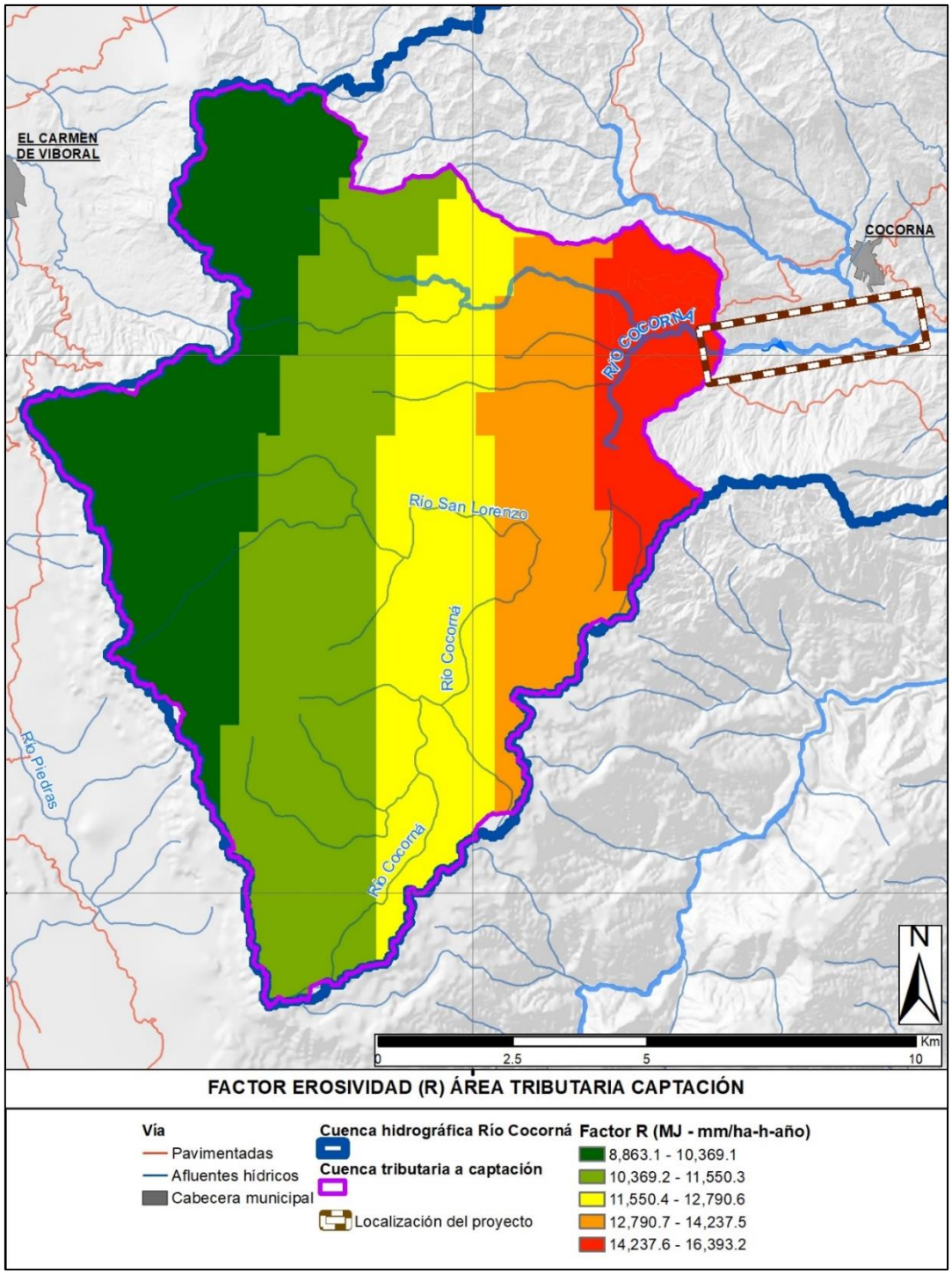


Figura 5-234. Capa de erosividad (R) en el área tributaria a la captación del proyecto

El factor erodabilidad del suelo (K) es la tasa de perdida de suelo por unidad del índice de erosión de la lluvia y varía de acuerdo a las propiedades intrínsecas de cada tipo de suelo, las cuales hacen que éstos sean más o menos erodables en un escenario bajo las mismas condiciones climáticas, de coberturas vegetales y morfometría de las laderas. El factor K es además un parámetro agrupado que representa un valor anual integrado de la reacción del perfil del suelo al proceso de desprendimiento y transporte del suelo por las gotas de lluvia y el flujo superficial (Ríos, 2018).

Para llevar a cabo la construcción de la capa de erodabilidad (K) se utilizó la metodología propuesta por Sharpley & Williams (1990) en el modelo EPIC (Erosion/Productivity Impacto Calculator). La erodabilidad para la capa superior del suelo según el modelo está dada por:

$$K_{USLE} = f_{sand} * f_{clsi} * f_{org} * f_{hisa}$$

Donde f_{sand} es el factor de erodabilidad de suelos asociado con el contenido de arenas gruesas, f_{clsi} es el factor asociado a la relación arcilla-limos, f_{org} da cuenta del contenido de carbono orgánico y f_{hisa} es un el factor de erodabilidad de los suelos con contenido de arenas muy altos. Cada uno de los anteriores factores a su vez es estimado como:

$$f_{sand} = [0{,}2 + 0{,}3\exp(-0{,}0256SAN(1 - \frac{SIL}{100}))]$$

$$f_{clsi} = \left(\frac{SIL}{CLA + SIL}\right)^{0.3}$$

$$f_{orgc} = (1 - \frac{0{,}25C}{C + \exp(3.72 - 2.95C)})$$

$$f_{hisand} = (1 - \frac{0{,}7\ SN1}{SN1 + \exp(-5{,}51 + 22.9SN1)})$$

$$SN1 = \frac{1 - SAN}{100}$$

Donde SAN, SIL, CLA y C son los contenidos en porcentaje (%) de arena (Φ de 0,050 mm a 2 mm), limo (Φ de 0,002 mm a 0,050 mm), arcilla (Φ < 0,002 mm) y carbono orgánico presentes en el suelo. Al estimar cada uno de los factores descritos, se procede a calcular la erodabilidad (K_{USLE}) que variar entre 0,1 y 0,5 en unidades inglesas (ton-acre-h / 100 acre-ft-ton-in) (Ríos, 2018).

Para proceder a estimar cada uno de los factores con los cuales se puede aplicar la ecuación para estimar la erodabilidad del suelo (K_{USLE}), se utiliza el Estudio general de suelos y zonificación de tierras para el departamento de Antioquia (IGAC, 2007a). Se obtiene entonces que la erodabilidad para el área de la cuenca tributaria a la zona

de captación varía entre 0,010 y 0,123 con un valor medio de 0,091 tonelada-h/MJ-mm (ver Figura 5-235).

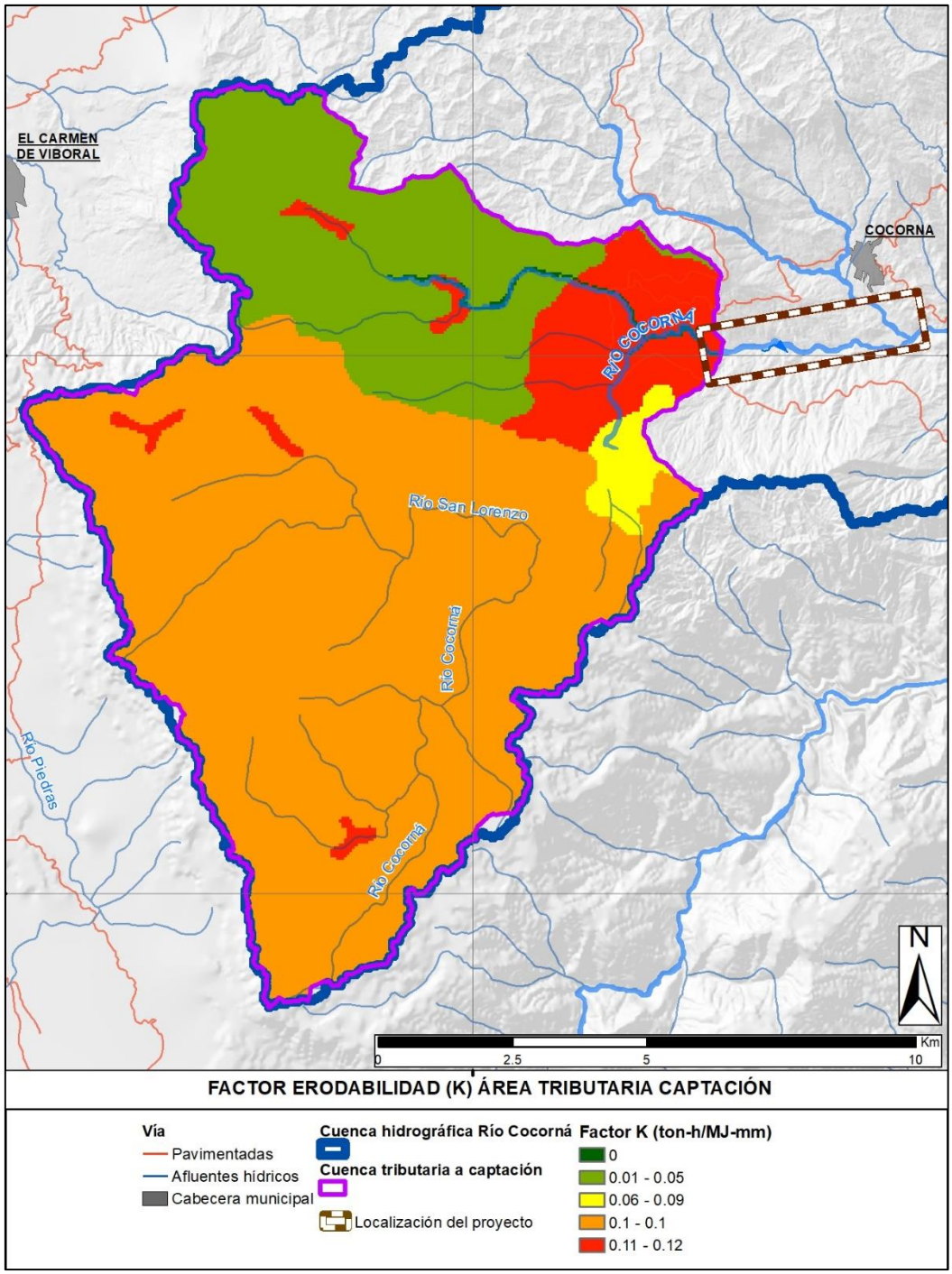


Figura 5-235. Capa de erodabilidad (K) en el área tributaria a la captación del proyecto

En el modelo RUSLE la topografía es abordada por dos factores; L que corresponde a la longitud de la pendiente y S que es la inclinación de la misma. Es común que se realice la agrupación de ambos factores como (LS), en la literatura se han realizado diferentes propuestas para su cálculo (Barrios, 2000; Mintegui & Robledo, 1993; Suárez, 2008; Van Remortel, Maichle, & Hickey, 2004). Para este ejercicio se tomó la propuesta de Barrios (2000), que evaluó el factor LS para una cuenca andina y aplicando regresiones lineales al trabajo de (Mintegui & Robledo, 1993) llegó a que:

$$LS = 0{,}009 * S^2 + 0{,}0798 * S \qquad para\ S\ \leq 30\%$$

$$LS = 0{,}2558 * S + 3{,}248 \qquad para\ S > 30\%$$

Dónde: S es la pendiente porcentual del terreno.

Para aplicar las anteriores ecuaciones al área de estudio se utilizó un DEM con resolución espacial 12,5 x 12,5 m obtenido por el satélite ALOS con el sensor radar PALSAR, propiedad de la Agencia Japonesa de Exploración Aeroespacial (JAXA). Utilizando herramientas SIG se obtuvo el mapa de pendiente en porcentaje (%) para el área de estudio sobre la cual se aplicaron las ecuaciones de LS planteadas por Barrios (2000). Al aplicar el procedimiento descrito, obtenemos que el factor topográfico para el área de la cuenca tributaria a la zona de captación varía entre 0,00 y 109,26 con un valor medio de 8,98 (ver Figura 5-236).

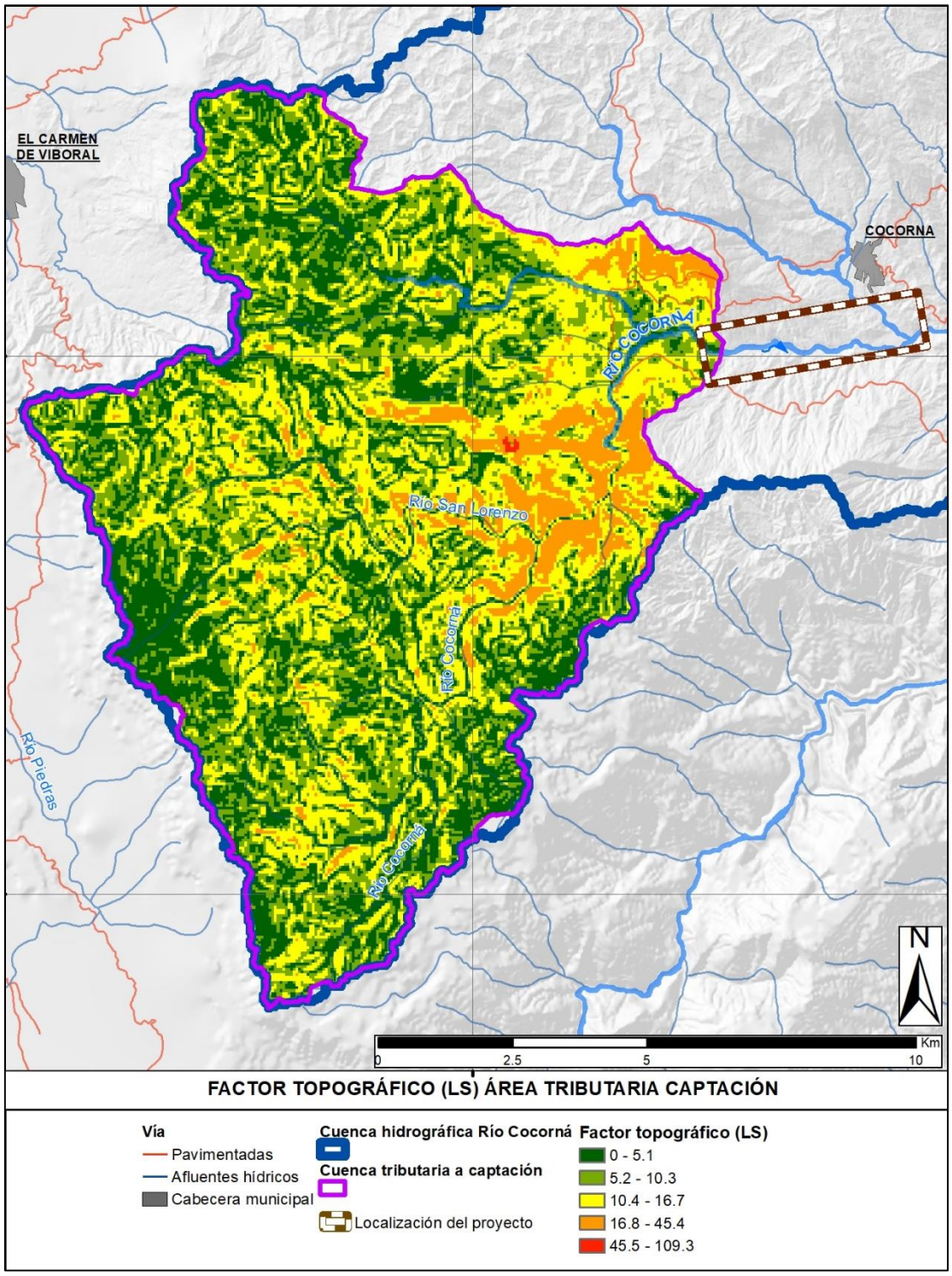


Figura 5-236. Capa del factor topográfico (LS) en el área tributaria a la captación del proyecto

El factor (C) en el modelo RUSLE corresponde al tipo de cobertura y da cuenta del efecto de las interrelaciones entre las coberturas del suelo y las prácticas de gestión sobre la pérdida de suelo media anual. Este factor presenta un rango de variación entre cero (0) y uno (1), en donde los valores cercanos a cero corresponden a suelos menos vulnerables a la erosión y los valores cercanos a uno son los más propensos a ser erodados (Ríos, 2018).

El factor (P) corresponde a las prácticas de manejo que se hacen del suelo. Este se define como la relación entre la pérdida de suelo con una práctica de manejo o soporte específica y la pérdida de suelo asociada a laderas con labranza y siembra de tipo descendente o en la dirección del mayor gradiente. Las tres prácticas de manejo de cultivos más importantes son la labranza en contornos, el cultivo en franjas siguiendo contornos y los sistemas de terrazas (Ríos, 2018; Wischmeier & Smith, 1978). En la Tabla 5-157 se presentan los valores tomados de la literatura para los factores C y P. La magnitud de los factores sigue la misma lógica de los explicados previamente, en donde un valor cercano a cero (0) significan una inexistente o muy baja predisposición a la erosión mientras que los valores cercanos a uno (1) significan una alta erosividad para la cobertura o práctica.

Tabla 5-157. Valores para el factor C y P en el modelo RUSLE

Cobertura	Factor C	Factor P
1.1.1. Tejido urbano continuo	0,001	0,001
1.1.2. Tejido urbano discontinuo	0,001	0,001
2.1.1. Otros cultivos transitorios	0,4	0,700
2.1.2. Cereales	0,4	0,700
2.1.5. Tubérculos	0,6	0,700
2.2.1. Cultivos permanentes herbáceos	0,3	0,500
2.2.2. Cultivos permanentes arbustivos	0,1	0,500
2.2.3. Cultivos permanentes arbóreos	0,05	0,500
2.2.5. Cultivos confinados	0,02	0,200
2.3.1. Pastos limpios	0,02	0,200
2.3.2. Pastos arbolados	0,02	0,100
2.3.3. Pastos enmalezados	0,02	0,200
2.4.1. Mosaico de cultivos	0,02	0,200
2.4.2. Mosaico de pastos y cultivos	0,15	0,300
2.4.3. Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales	0,02	0,200
2.4.4. Mosaico de pastos con espacios naturales	0,01	0,150
2.4.5. Mosaico de cultivos con espacios naturales	0,02	0,200
3.1.1. Bosque denso	0,03	0,060
3.1.2. Bosque abierto	0,04	0,080
3.1.3. Bosque fragmentado	0,09	0,180

Cobertura	Factor C	Factor P
3.1.4. Bosque de galería y ripario	0,005	0,010
3.1.5. Plantación forestal	0,015	0,002
3.2.1. Herbazal	0,001	0,250
3.2.2. Arbustal	0,002	0,250
3.2.3. Vegetación secundaria o en transición	0,005	0,250
3.3.1. Zonas arenosas naturales	0,700	1,000
3.3.2. Afloramientos rocosos	0,005	0,010
3.3.3. Tierras desnudas y degradadas	0,700	1,000
5.1.1. Ríos (50 m)	0,000	0,000
5.1.4. Cuerpos de agua artificiales	0,000	0,000

Fuente: Adaptado de Ríos (2018) y Wischmeier & Smith (1978)

Utilizando los factores presentados en la Tabla 5-157 y aplicándolos a las coberturas y usos del suelo del POMCA de la Cuenca del Río Samaná Norte (Cornare, Corantioquia, 2017) actualizado con los inventarios forestales realizados durante el presente EIA se obtuvieron las capas ráster para C y P necesarias para aplicar el modelo RUSLE (Figura 5-237 y Figura 5-238, respectivamente).

Para el factor de coberturas (C) se obtuvo un valor medio de 0,029 y para el factor relacionado con las prácticas de manejo (P) un valor medio de 0,126. Estos valores indican suelos con una baja tendencia a la erosión.

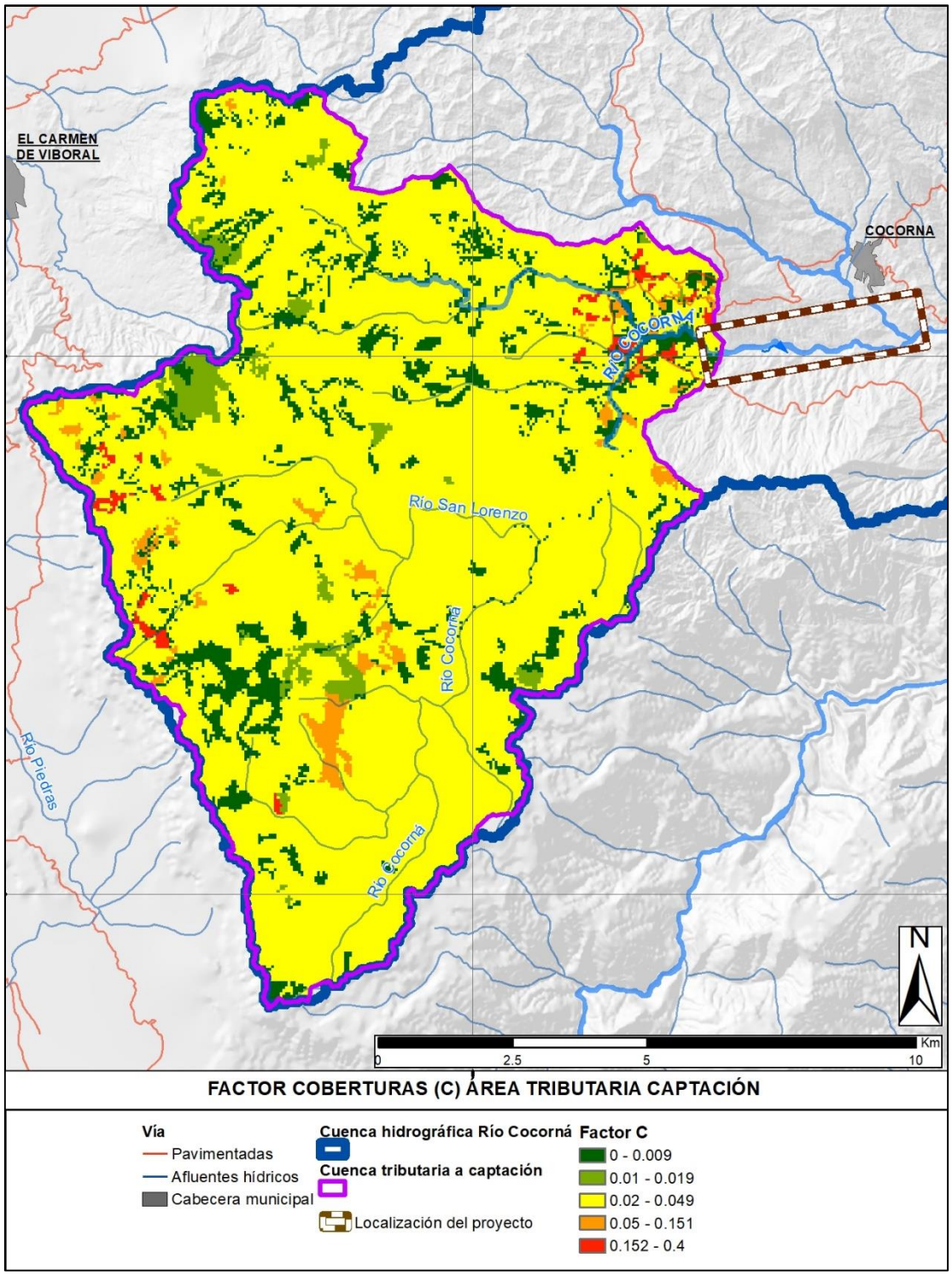


Figura 5-237. Capa factor coberturas (C) en el área tributaria a la captación del proyecto

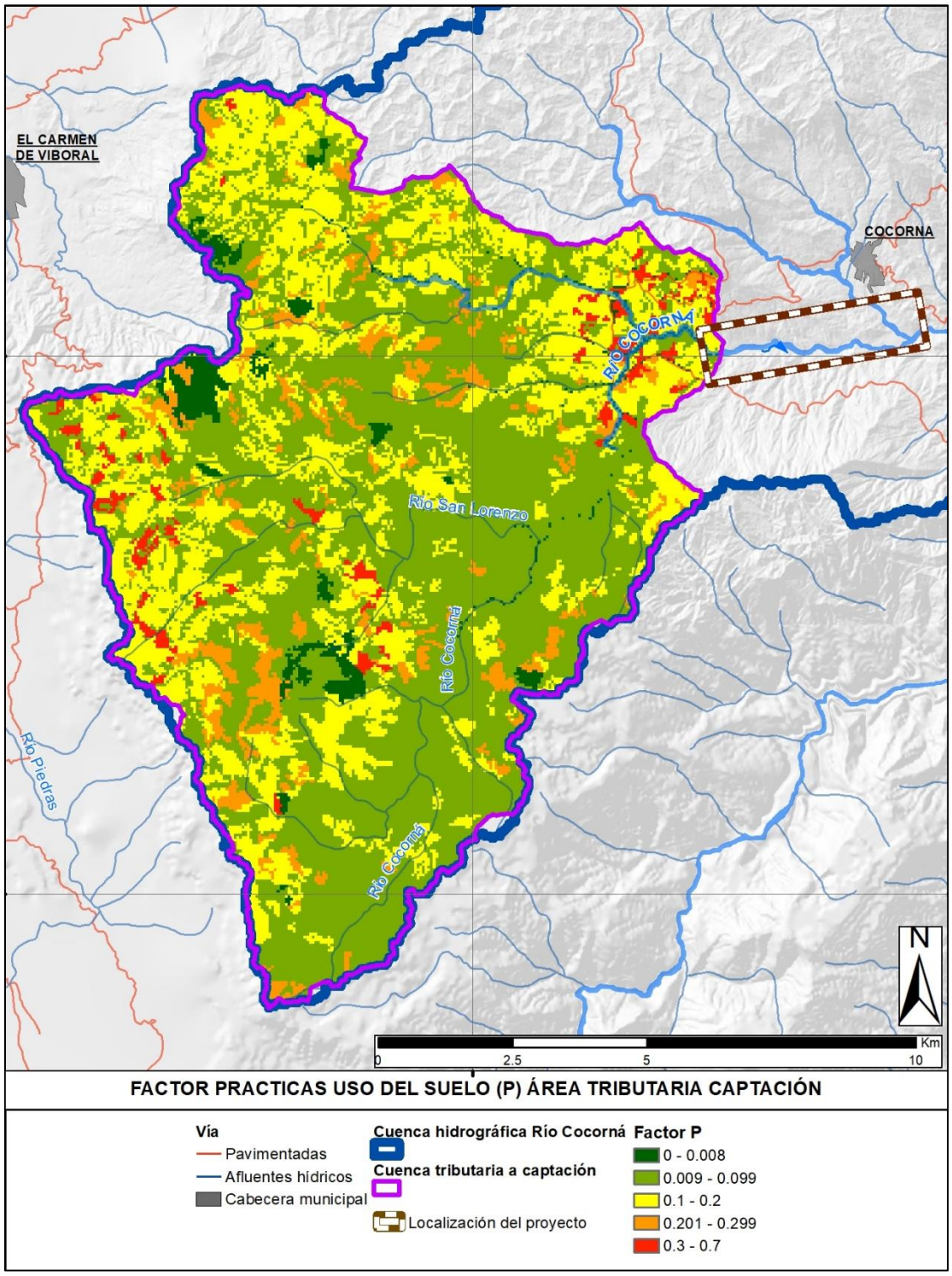


Figura 5-238. Capa factor coberturas (P) en el área tributaria a la captación del proyecto

Luego de obtener todas las capas necesarias para aplicar el modelo RUSLE se recurre a aplicar el álgebra de mapas en un programa SIG. Se obtiene entonces que, de acuerdo al modelo, en la Cuenca del Río Cocorná, desde su nacimiento hasta el sitio de ubicación de la captación del proyecto hay una pérdida de suelo que oscila entre 0 y 1.549,8 tonelada-ha/año con un valor medio de 13 tonelada-ha/año, lo que equivale a una pérdida laminar de 1,30 mm/año (ver Figura 5-239).

Al realizar la estadística zonal para toda la cuenca hasta la captación del proyecto, la pérdida de suelo total es de 618.861 toneladas al año. Para la cuenca del río Cocorná hasta antes de la desembocadura al río Tafetanes la pérdida de suelo es de 5.119.195 ton/año.

De acuerdo a literatura, la denudación natural es del orden de 0,1 mm/año (Restrepo, 2015), mientras que una tasa entre 1 y 2 corresponde a un “Muy Alto” grado de erosión (Gómez, Alarcón, & Grisales (1975) citado por Villa (2012)). Así mismo, Cenicafé establece los siguientes rangos, ver Tabla 5-158:

Tabla 5-158. Grado de erosión en función de la pérdida anual de suelo

Grado de erosión	Pérdida anual	
	Ton/ha	Espesor en mm
Natural	<1,0	<0,1
Baja	1,0-3,0	0,1-0,3
Media	3,0-5,0	0,3-0,5
Alta	5,0-10,0	0,5-1,0
Muy alta	10,0-20,0	1,0-2,0
Severa	20,0-30,0	2,0-3,0
Muy severa	>30,0	>3,0

Fuente: (CENICAFË, 1975)

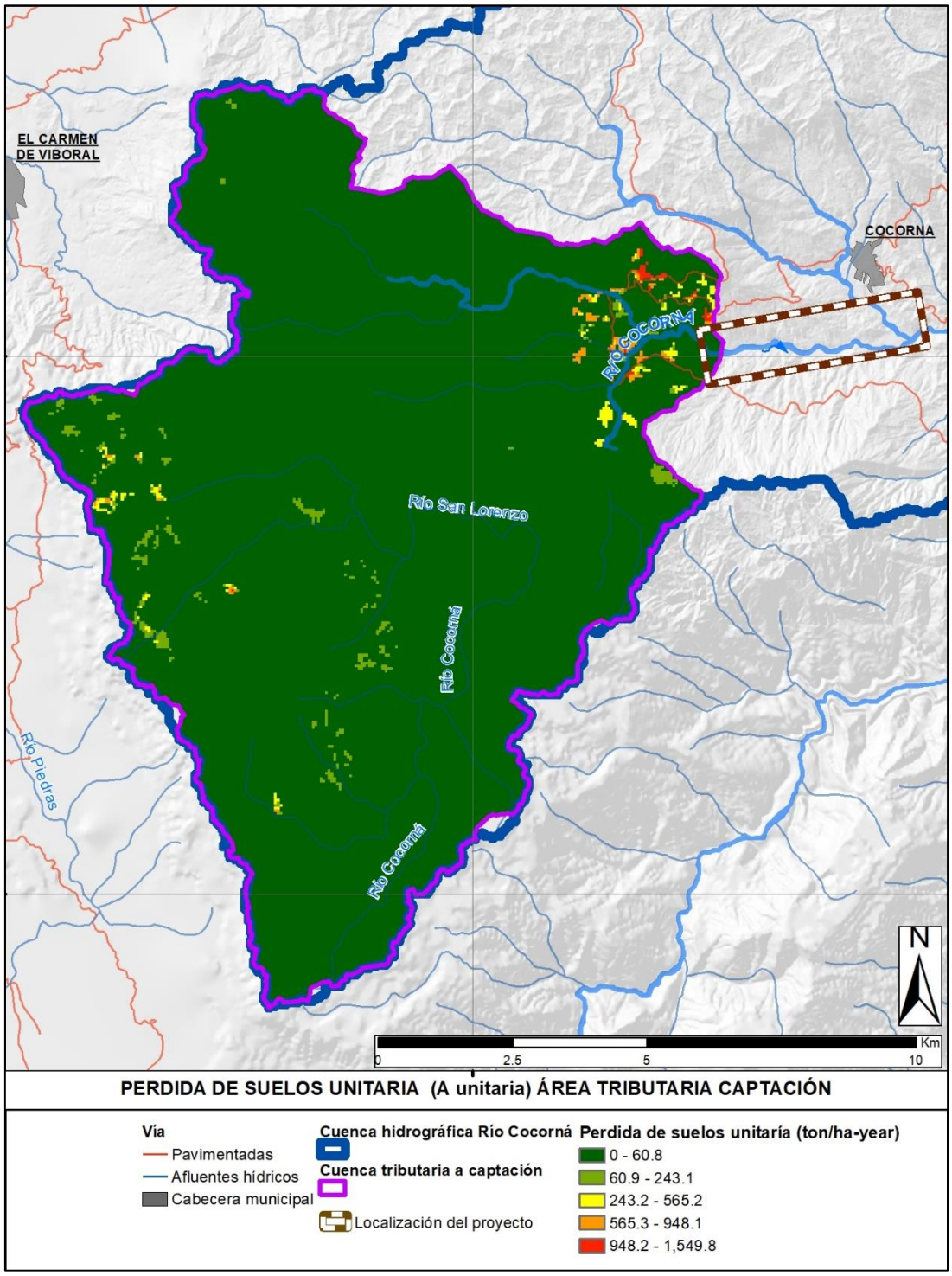


Figura 5-239. Pérdida de suelo (toneladas/ha/año) en el área tributaria a la captación del proyecto

La alta tasa de denudación obtenida en la Cuenca del Río Cocorná luego de aplicar el modelo RUSLE debe ser analizada a la luz de la información utilizada y lo evidenciado en el trabajo de campo. Es importante tener en cuenta que se utilizaron capas de entrada al modelo con diferentes escalas y temporalidades; por ejemplo el Estudio general de suelos y zonificación de tierras para el departamento de Antioquia (IGAC, 2007a) con el cual se realizó el cálculo de la erodabilidad (K) tiene una escala 1:100.000, mientras que las capas de coberturas del POMCA (Cornare, Corantioquia, 2017) tiene una escala de 1:25.000. Adicionalmente, es importante tener en cuenta que el factor R que corresponde a la erosión por la lluvia y la escorrentía fue obtenido por modelos regresivos para estaciones en otras zonas del departamento debido a la ausencia de estaciones pluviométricas con un alto detalle en la resolución temporal en la red del IDEAM para la Cuenca del río Cocorná.

Durante los recorridos de campo y tal como se presenta en la caracterización geológica y geomorfológica, algunos tramos del cauce y las laderas se encuentran conformados por roca competente, en algunos sectores aguas arriba de la captación del proyecto los depósitos aluviales encontrados son de gravas y cantos, los cuales pueden tener dimensión de hasta 10 metros de diámetro que dan cuenta de la alta capacidad de transporte del río, con lo cual se evidencia que el río Cocorná en la zona de estudio se caracteriza por el predominio del transporte en lugar de la depositación (S. A. Schumm, 1977) (ver Zona 1 en Figura 5-233). Adicionalmente, es importante notar que la Cuenca del Río Samaná Norte y la Subcuenca del río Cocorná en su parte alta presentan una considerable extensión de coberturas naturales que atenúan la capacidad erosiva de la lluvia, al mismo tiempo que aumentan la cohesión y resistencia del suelo ante la erosión.

En conclusión, se puede decir que las características topográficas y de pluviosidad en la cuenca tributaria a la captación presentan unas condiciones que propician la erosión de suelo. Sin embargo, las diferencias en la escala espacial y temporal de la información disponible para aplicar el modelo RUSLE, así como la gran extensión de cobertura natural en la cuenca, permite sospechar que la tasa de denudación de 1,30 mm/año es un valor sobreestimado con un gran nivel de incertidumbre debido a las razones previamente explicadas. Se precisa entonces la instrumentación de la fuente y la ejecución de muestreos de sedimentos en diferentes condiciones hidrológicas para validar los resultados obtenidos con el modelo RUSLE.

BIBLIOGRAFÍA

Aguirre, M. R., Vanegas, E. A., & García, N. (2016). Aplicación del Índice de Calidad del Agua (ICA). Caso de estudio: Lago de Izabal, Guatemala. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, *25*(2), 39–43.

Barrios, R. (2000). Distribucion espacial del factor LS (RUSLE) usando procedimientos SIG compatibles con IDRISI. Aplicacion en una microcuenca andina. *Rev. Forest. Venez.*, *44*(1), 57–64.

Bateman, A. (2007). *Hidrología Básica y Aplicada* .

Castro, L. M., & C. (2010). Análisis de tendencia y homogeneidad de series climatológicas. *Ingeniería de Recursos Naturales y Del Ambiente*. Retrieved from https://www.redalyc.org/pdf/2311/231116434002.pdf

CENICAFË. (1975). *Manual de conservación de suelos de ladera*.

Chow, V. Te, Maidment, D. R., & Mays, L. W. (1994). *Hidrologia Aplicada* (1st ed.). Santafé de Bogotá, Colombia: McGRAW-HILL Interamericana S.A.

Cornare, Corantioquia, C. P. O. A. (2017). *POMCA del Río Samaná Norte*. El Santuario.

Cornare. (2014a). Referentes Ambientales Municipio de Cocorná. In *Referentes Ambientales para la Construcción de los Planes de Desarrollo en los Municipios del Oriente Antioqueño*. Retrieved from http://www.cornare.gov.co/index.php/component/content/article/166-siar/484-referentes-ambientales

Cornare. (2014b). Referentes Ambientales Municipio de Granada. In *Referentes Ambientales para la Construcción de los Planes de Desarrollo en los Municipios del Oriente Antioqueño*. Retrieved from http://www.cornare.gov.co/index.php/component/content/article/166-siar/484-referentes-ambientales

Cornare. (2019). *Referentes Ambientales para la Construcción de los Planes de Desarrollo en los Municipios de la Jurisdicción Cornare*. Retrieved from https://www.cornare.gov.co/referentes-ambientales/

Cornare, Corantioquia, & Consorcio POMCAS Oriente Antioqueño. (2017). *Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca Hidrográfica del Río Samaná Norte*. Retrieved from http://www.cornare.gov.co/planes-de-ordenacion-y-manejo-de-cuencas-hidrograficas-pomcas/

Cornare, & UdeA. (2011). *Plan de Ordenamiento del Recurso Hídrico (PORH) en los tramos receptores de vertimientos líquidos de la jurisdicción de la Corporación Autónoma Regional de los ríos Negro y Nare*. El Santuario, Antioquia.

DSSA. (2018). Vigilancia Agua de Consumo Humano (Acueductos).

Eslava-Ramírez, J. A. (1995). *Régimen de la presión atmosférica en Colombia* (FAO, Ed.). Retrieved from http://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=CO1999001175

Gómez, A., Alarcón, H., & Grisales, G. (1975). *Manual de conservación de suelos de ladera*. Chinchiná.

IGAC. (2007a). *Estudio general de suelos y zonificación de tierras: departamento de Antioquia.* Bogotá D.C.

IGAC. (2007b). *Estudio general de suelos y zonificación de tierras del departamento de Antioquia*. Bogotá.

Instituto Nacional de Vías. (2009). *Manual de Drenaje para Carreteras*.

Jaramillo, A. (2005). Lluvias Máximas En 24 Horas Para La Región Andina De Colombia. *Cenicafé*, *56*(3), 250–268. Retrieved from https://www.cenicafe.org/es/publications/arc056%2803%29250-268.pdf

Lieu, E. H., & Chapman, R. E. (1916). The relation between atmospheric pressure and rainfall at kew and valencia observatories. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, *42*(180), 289–299. https://doi.org/10.1002/qj.49704218009

Londoño Arango, C. (2001). Cuencas hidrográficas: Bases Conceptuales, Carracterización, administración. *Universidad Del Tolima*, *1*, 1–350.

Mesa, J. D., & Pérez, O. (2002). Estimación del factor de erosividad de la lluvia en Colombia. *In XV Seminario Nacional de Hidráulica e Hidrología*, 12. Medellín.

Miller. (1990). *Environmental Science: Living on the Earth*. USA: Wadsworth Publischers Ltd.

MinSalud. (2016). *Informe Nacional de Calidad del Agua para Consumo Humano INCA 2015*. Bogotá D.C.

Mintegui, J. M., & Robledo, J. C. (1993). *Métodos para la estimación de los efectos torrenciales en una cuenca hidrográfica: manual para un programa básico*.

Organización Meteorológica Mundial. (1994). *Guía de prácticas hidrológicas, adquisición y proceso de datos, análisis, predicción y otras aplicaciones*.

Posada, L. (1994). *Transporte de sedimentos*. Medellín: Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín.

Poveda, G. (2004). La Hidroclimatología de Colombia: Una síntesis desde la escala interdecadal hasta la escala diurna. *Revista Academia Colombiana de Ciencias*, *28*(107), 201–222.

Poveda, G., Mesa, O. J., Salazar, L. F., Arias, P. A., Moreno, H. A., Vierira, S. C., … Alvarez, J. F. (2005). The Diurnal Cycle of Precipitation in the Tropical Andes of Colombia. *Monthly Weather Review*, *133*(1), 228–240. https://doi.org/10.1175/MWR-2853.1

Ramírez, A., Restrepo, R., & Viña, G. (1997). Cuatro índices de contaminación para caracterización de aguas continentales. Formulaciones y aplicación. *Ciencia, Tecnologia y Futuro*, *1*(3), 135–153.

Renard, K., Foster, G., Weesies, G., & McCool, D. (1997). *Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)*.

Restrepo, J. D. (2015). *Causas naturales y humanas de la erosión en la Cuenca del Río Magdalena: Resumen para tomadores de decisión*.

Ríos, J. D. (2018). *Ríos Arboleda, J. D. Erosión hídrica y evolución del relieve en las cuencas de los ríos Grande y San Andrés, Antioquia–Colombia*. Universidad Nacional de Colombia-Sede Medellín.

Rosgen, D. L., & Silvey, H. L. (1996). *Applied river morphology* (Vol. 1481). Wildland Hydrology Pagosa Springs, Colorado.

Schumm, S. A. (1977). *The fluvial system* (Willey, Ed.). New York.

Schumm, Stanley A. (1963). Sinuosity of alluvial rivers on the Great Plains. *Geological Society of America Bulletin*, *74*(9), 1089–1100.

Sharpley, A. N., & Williams, J. R. (1990). *EPIC-erosion/productivity impact calculator: 1. Model documentation*.

Soil Conservtion Service. (1972). *National Engineering Handbook, section 4, Hydrology*.

Suárez, M. C. G. (2008). *Suárez, M. C. G. (2008). Metodología de cálculo del factor topográfico, LS, integrado en los modelos Rusle y Usped. Aplicación al arroyo del lugar, Guadalajara (España)*. Universidad Politécnica de Madrid.

Superservicios. (2015). *Evaluación Integral De Prestadores Empresa de Servicios Publicos de Cocorná E.S.P.* Retrieved from

https://www.superservicios.gov.co/servicios-vigilados/acueducto-alcantarillado-y-aseo/empresa-servicios-publicos-cocorna-esp

UNESCO. (2010). *Engineering : Issues Challenges and Opportunities for Development*. Francia.

Van Remortel, R. D., Maichle, R. W., & Hickey, R. J. (2004). Computing the LS factor for the Revised Universal Soil Loss Equation through array-based slope processing of digital elevation data using a C++ executable. *Computers & Geosciences*, *30*, 1043–1053.

Villa, S. (2012). *Modelación de la erosión hídrica a escala de cuenca en la zona alta de la quebrada La García del municipio de Bello-Antioquia*. Universidad Nacional Sedel Medellín.

Wischmeier, W. H., & Smith, D. D. (1978). *Predicting rainfall erosion losses-a guide to conservation planning*. 62–67.

Yu, L. (2007). Global Variations in Oceanic Evaporation (1958–2005): The Role of the Changing Wind Speed. *Journal of Climate*, *20*(21), 5376–5390. https://doi.org/10.1175/2007JCLI1714.1