

CONTENIDO

CONTENIDO	I
ÍNDICE DE TABLAS	IV
INTRODUCCIÓN	I
1 ALCANCE Y METODOLOGÍA DEL ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO	1
1.1 DELIMITACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO Y ANÁLISIS DE INFORMACIÓN PREVIA	2
1.2 TRABAJO DE CAMPO	2
1.3 ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS	7
1.4 CONSTRUCCIÓN DEL MODELO	7
2 MARCO GEOMORFOLÓGICO	7
3 MARCO GEOLÓGICO	9
3.1 MODELO ESTRATIGRÁFICO	11
4 HIDROLOGÍA	19
4.1 DRENAJE	20
4.1.1 QUEBRADA SANTA ELENA	20
4.1.2 QUEBRADA SALAZAR O SAJONIA	21
4.1.3 PATRONES DE DRENAJE, DINÁMICA FLUVIAL Y ESTIMACIÓN DE CAUDALES	21

4.1.4	ZONAS INUNDABLES	25
4.2	PRECIPITACIÓN.....	25
5	INVENTARIO DE PUNTOS DE AGUAS	28
5.1	AGUAS INTERMITENTES	33
5.2	AGUAS CONTINUAS	33
5.3	AGUAS ESTANCADA.....	34
5.4	HUMEDALES	35
5.5	NACIMIENTOS.....	35
5.6	DOLINAS.....	36
5.7	LAGUNAS	37
5.8	TANQUES DE AGUA	37
6	HIDROGEOLOGÍA	37
6.1	CONSTRUCCIÓN DEL MODELO.....	38
6.2	CONDICIONES DE FRONTERA.....	38
6.2.1	CONTORNO.....	38
6.2.2	LÍMITES INFERIOR Y SUPERIOR.....	39
6.2.3	RECARGA.....	39
6.2.4	RÍOS.....	39

6.2.5	DRENES.....	40
6.3	PROPIEDADES HIDRÁULICAS.....	41
6.4	DISCRETIZACIÓN TEMPORAL.....	41
6.5	SIMULACIONES Y RESULTADOS.....	43
6.5.1	ESTADO ESTACIONARIO.....	43
6.5.2	ESTADO TRANSITORIO – DOS FRENTES DE AVANCE	44
6.6	CONCLUSIONES.....	47
6.7	RECOMENDACIONES.....	48
7	REFERENCIAS.....	49

ANEXO A FIGURAS

ANEXO B ENSAYOS DE CAMPO

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-1. Perforaciones relacionadas con hidrogeología	3
Tabla 1-2 - Resumen sondeos eléctricos verticales.....	3
Tabla 1-3 - Resultados análisis de salinidad.....	5
Tabla 4-1 – Cuencas de estudio	20
Tabla 4-2 – Caudales estimados	22
Tabla 5-1 – Puntos de agua.....	28
Tabla 6-1. Propiedades hidráulicas de los materiales.....	41
Tabla 6-2. Discretización temporal frente occidental	42
Tabla 6-3. Discretización temporal frente oriental.....	42
Tabla 6-4. Detalle de los caudales infiltrados para el frente occidental	45
Tabla 6-5. Detalle de los caudales infiltrados para el frente oriental.....	46

INTRODUCCIÓN

SOLINGRAL S.A. desarrolló por solicitud de INTEGRAL S.A. la evaluación hidrogeológica de la zona que podría verse afectada por el Túnel Santa Elena, esto en el marco de los trabajos de diseño de la conexión vial entre el Valle de Aburrá y el Valle de San Nicolás desarrollados por INTEGRAL S.A. para la Concesión Aburrá Oriente. Dicha conexión, con una longitud total de 19+400 km, incluye un túnel denominado Santa Elena ubicado entre el km 10+200 y el km 18+517, el cual inicia en la cuenca de la quebrada Santa Elena, (margen derecha de la quebrada La Aguadita) y termina en la cuenca de la quebrada Salazar (cerca a la glorieta de Sajonia, vía aeropuerto José María Córdova).

En este informe se presenta la metodología implementada para realizar los estudios hidrogeológicos, la cual incluye exploración directa e indirecta de campo, ensayos de laboratorio sobre muestras de agua y sobre muestras de suelo, geología general del sitio, y las características y propiedades hidráulicas de los materiales que componen el subsuelo. Luego, sobre un modelo digital del terreno (DEM) y con los insumos descritos además de la ayuda del programa Modflow, se construyó el modelo hidrogeológico para el sector del Túnel de Oriente en el corregimiento de Santa Elena. Finalmente, se dan las conclusiones y las observaciones con respecto al impacto que tendrá el túnel en la hidrogeología del sitio, y se presentan las recomendaciones generales.

El Túnel de Santa Elena se localiza en la zona de influencia de alta montaña en la cordillera Central.

1 ALCANCE Y METODOLOGÍA DEL ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO

Dentro de los estudios realizados para el proyecto del Túnel de Oriente, se consideró como de gran importancia la realización de un estudio hidrogeológico en la zona de influencia directa del túnel en el sector de Santa Elena, ya que las excavaciones para la realización del mismo se podrían reflejar directamente tanto en los niveles freáticos como en los caudales de aguas superficiales aflorantes en el sector. Con este estudio se pretende establecer un balance hídrico de la zona de trabajo, tanto desde el punto de vista de las aguas subterráneas como a partir de los diferentes tipos de aguas aflorantes en el sector, con la identificación, localización, caracterización y evaluación de los puntos de agua, a lo largo del corredor terreno definido como influenciado por el túnel proyectado y que establece si podrían ser impactados por la construcción y operación del nuevo proyecto vial.

Para cumplir dicho objetivo fue necesario identificar las formaciones geológicas y superficiales de la región, su caracterización estratigráfica a través de sondeos indirectos (geofísica, tipo geoelectrica), inventariar los usos y afloramientos de agua, estimar los parámetros hidráulicos de los materiales de las cuencas y ejecutar una campaña de perforaciones y levantamientos de campo.

Para este estudio se contó con una cartografía digital básica a escala 1:5 000 y 1:10 000 donde se plasmó la información geológica, además de observar condiciones geomorfológicas de los terrenos, muestreo de contenido de sal de las aguas profundas (obtenidas de las perforaciones) y algunos puntos superficiales donde se identificó agua salada. Adicionalmente se contó con el estudio "Evaluación Hidrogeológica del Corredor del Túnel Aburrá Oriente", elaborado por el ingeniero Fabián Hoyos Patiño en el año 2000.

El presente trabajo fue desarrollado siguiendo la metodología tradicional de este tipo de estudios, la cual se amplía a continuación:

1.1 DELIMITACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO Y ANÁLISIS DE INFORMACIÓN PREVIA

Para el establecimiento de un modelo hidrogeológico la zona de trabajo ésta debe estar enmarcada dentro de fronteras impermeables y/o con condiciones de flujo definido, es decir, condiciones de flujo que no serán alteradas por el proyecto del túnel. Esta área o contorno se estableció con base en las siguientes actividades:

- Fotointerpretación y cartografía geológica detallada a partir de trabajo de campo e información regional.
- Localización y caracterización de las fuentes y/o afloramientos de agua, como son zonas húmedas, nacimientos, dolinas, aguas empozadas, lagunas, tanques de agua y aguas intermitentes o continuas.
- Estimación preliminar en campo de caudales de algunos drenajes de menor jerarquía. Los de mayor jerarquía se establecieron a partir de modelos hidrológicos.
- Mapa de divisorias de aguas y cuencas hidrográficas

Dentro de las cuencas delimitadas se tienen seis zonas definidas por las corrientes principales que drenan tanto hacia el Valle de Aburrá como hacia el altiplano de San Nicolás, estas cuencas pertenecen a las quebradas La Bocana, Santa Elena, La Cascada, El Yarumo y Salazar, además de otra corriente sin nombre.

1.2 TRABAJO DE CAMPO

Los trabajos de campo están divididos en tres actividades diferentes como son: (a) cartografía de campo para verificar y ajustar la información obtenida de los trabajos de fotointerpretación, (b) exploración directa (perforaciones) e indirecta (geoeléctrica) con el fin de caracterizar el subsuelo, las permeabilidades y los niveles piezométricos y (c) levantamiento detallado de las fuentes y/o afloramientos de agua.

En cuanto a la geología de campo y sus resultados se puede consultar el Capítulo 3 del informe final. Allí se cuenta con los mapas correspondientes a

toda la zona del proyecto vial, la cual incluye en su totalidad la zona de influencia hidrogeológica.

La investigación directa consistió en la ejecución de cuatro perforaciones con las profundidades dadas en la Tabla 1-1. En estos sondeos se tomaron muestras tanto inalteradas como remoldeadas y se hicieron ensayos de permeabilidad tipo Lefranc. Además, se recuperaron muestras para ensayos de laboratorio, especialmente ensayos de clasificación y permeabilidad, con el fin de obtener la información necesaria para modelar y analizar el comportamiento del flujo de agua, y poder hacer los análisis y las evaluaciones del comportamiento que tendrá éste en el tiempo. Es importante mencionar que estas exploraciones complementaron las perforaciones profundas de caracterización de los materiales rocosos. En estas perforaciones profundas se realizaron también ensayos Lugeon para diversos tramos, con el objeto de obtener parámetros de permeabilidad *in situ* del macizo.

Tabla 1-1. Perforaciones relacionadas con hidrogeología

Identificación	Profundidad (m)
AO-H-P-01	30,10
AO-H-P-02	30,45
AO-H-P-03	30,30
AO-H-P-04	30,05
Total	120.60

Se ejecutaron un total de 20 sondeos eléctricos verticales (SEV) con un equipo DZD 10, fabricado para tal fin. La longitud (profundidad) y localización de dichos sondeos se muestra en la Tabla 1-2, acomodándose a las características geográficas de la zona, de tal manera que se lograra un buen grado de confiabilidad hasta la profundidad explorada.

Tabla 1-2 - Resumen sondeos eléctricos verticales

Sondeo	Longitud	Azímüt	Profundidad	Observaciones
SEV 1	270	330	90	Basamento a 48 m
SEV 2	300	265	100	Valores anómalos
SEV 3	270	320	90	Basamento a 53 m
SEV 4	300	80	100	Basamento a 55 m
SEV 5	300	340	100	Basamento a 46 m
SEV 6	-	280	-	Anomalia -
SEV 7	300	350	100	Basamento a 62 m
SEV 8	300	330	100	Basamento a 16 m
SEV 9	300	160	100	Basamento a 71 m
SEV 10	-	60	-	Anomalia-

Sondeo	Longitud	Azimut	Profundidad	Observaciones
SEV 11	270	330	90	Basamento a 35 m
SEV 12	300	100	100	Perfil de suelo >100 m
SEV 13	300	10	100	Perfil de suelo >100 m
SEV 14	300	330	100	Perfil de suelo >100 m
SEV 15	300	105	100	Basamento a 34 m
SEV 16	300	80	100	Basamento a 60 m
SEV 17	300	330	100	Basamento a 65 m
SEV 18	165	70	55	Basamento a 17 m
SEV 19	300	5	100	Basamento a 54 m
SEV 20	105	100	35	Basamento a 16 m

El método geoelectrico empleado se basa en la inyección de corriente al suelo mediante dos polos (A y B) y la medida de la variación de la resistividad con la profundidad (polos M y N), la cual depende del tipo de material y su grado de saturación. La distribución geométrica que se utilizó fue la de Wenner (Figura 1-1), que consiste en mantener constante las distancias entre los polos de inyección y los polos de medida obteniendo así un mayor grado de detalle en la estratigrafía que el obtenido con otros arreglos geométricos. Para evaluar la variación de la resistividad con la profundidad, el arreglo geométrico de los electrodos debe ser tal que permita que cada medida sea generada por materiales a diferentes profundidades. Esto se consigue cambiando sistemáticamente la distancia entre los electrodos.

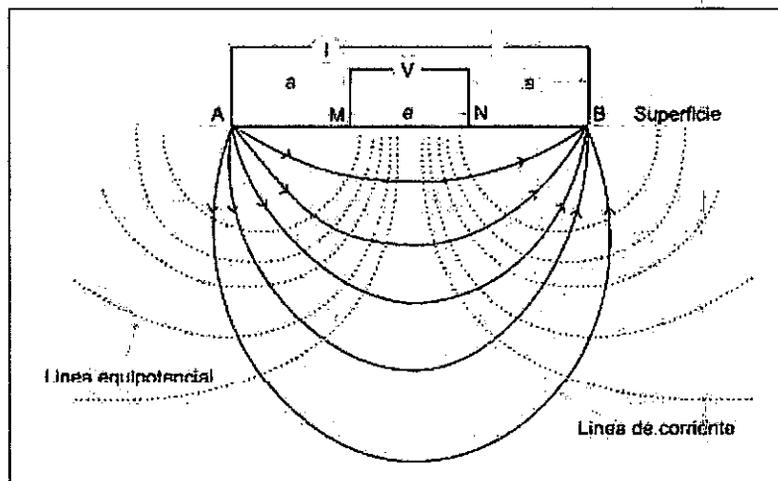


Figura 1-1 -Configuración de electrodos de corriente y potencial en el arreglo de Wenner. Sección transversal de líneas de corriente y superficies equipotenciales.

Paralelamente a la campaña de exploración se tomaron muestras de agua, a profundidades diferentes durante la ejecución de las perforaciones profundas, así como en algunas de las exploraciones y corrientes naturales. Sobre dichas muestras se determinaron la densidad y el contenido de cloruros (salinidad). Los resultados de estos ensayos se presentan en la Tabla 1-3, según normas referenciadas de ALPHA, AWWA, WPCF. En este punto es importante aclarar que para la región de Santa Elena se han reportado por los menos tres puntos donde afloran (nacimientos) aguas salobres, llamados coloquialmente "salares". Dos en inmediaciones de la vereda Mazo y el tercero cerca al Tambo, sector de Chorro Clarín. Estos sitios están bastante alejados del proyecto vial que nos ocupa; sin embargo, con la idea de conocer una concentración de cloruros que sirva de referencia se visitaron estos nacimientos y se tomaron las respectivas muestras de agua, además para contrastar los estudios hidrogeológicos ya realizados por Hoyos (2000) los cuales proponen la existencia de agua salada confinada en un importante tramo del macizo rocoso que cruza el túnel.

Tabla 1-3 - Resultados análisis de salinidad

Muestra	Localización	Salinidad (%)	Densidad a 25°C
	Pozo Real – Clarín – El Tambo	12.30	1.01132
	El Salado – El Mazo	26.30	1.02384
P1	Pozo 130.20 m	0.04	1.0003
	Quebrada 130.20 m	0.02	1.0000
	Pozo 150.30 m	0.04	1.0003
	Quebrada 150.30 m	0.02	1.0002
P2	10 m – Entrada	0.02	1.0001
	10 m – Salida	0.02	0.9999
	20 m – Entrada	0.02	0.9998
	20 m – Salida	0.07	1.0000
	30 m – Entrada	0.02	0.9999
	30 m – Salida	0.11	1.0001
	40 m – Entrada	0.02	1.0000
	40 m – Salida	0.08	1.0002
P-3	111.30 m - Entrada	0.02	1.00002
	111.30 m - Salida	0.03	1.00030
	111.65 m - Entrada	0.02	0.99996
	111.65 m - Salida	0.004	1.00013
	130 m - Entrada	0.03	0.99980
	130 m - Salida	0.03	0.99993
	140 m - Entrada	0.03	0.99937
	140 m - Salida	0.04	1.00025
	150 m - Entrada	0.03	0.99954
	150 m - Salida	0.04	0.99955
P-4	80 m - Entrada	0.03	1.0000
	80 m - Salida	0.40	1.0003
	90 m - Entrada	0.03	0.99941
	90 m - Salida	0.07	0.99976

	100 m - Entrada	0.03	1.00019
	100 m - Salida	0.04	1.00016

Sobre el corredor del túnel se realizó el trabajo de inventario de puntos de agua, incluyendo la estimación de los caudales de algunos afluentes de menor jerarquía, asociados a las principales cuencas (quebrada Sajonia, Yarumal y Santa Elena (ver Plano AO-VI-HG-001).

La estimación de caudales se ejecutó según la metodología típica de campo. Según ésta, inicialmente se escoge un tramo donde el cauce (por debajo del nivel de agua) presente una forma geométrica regular. Luego se obtienen las dimensiones geométricas del cauce, necesarias para establecer el área transversal efectiva (profundidad en el centro, amplitud, profundidad en el eje, etc). Posteriormente se establece un tramo de longitud conocida sobre el cauce (en general uno o dos metros) simétrico respecto al punto de la sección transversal ya medida. Finalmente, se lanza un objeto liviano (corcho y/o icopor) en el centro del cauce y se mide el tiempo necesario para avanzar el tramo seleccionado. Esta medida se repite dos o tres veces. Estableciéndose de esta manera la velocidad promedio del agua. El caudal se estima entonces como el producto del área y la velocidad.

Es importante aclarar que los datos obtenidos según esta metodología de campo son una aproximación burda del caudal, con importantes factores de incertidumbre.

Así mismo se realizó un levantamiento de diferentes puntos de agua tales como: zonas húmedas o de empozamientos, nacimientos de aguas, dolinas, aguas estancadas, lagos sean artificiales o naturales, localización de tanques de agua, zonas de aguas intermitentes o continuas que no corresponden a quebradas (ver Plano AO-VI-HG-001). El mapa de este inventario cumple dos objetivos fundamentales; el primero es que sirve como información de referencia y calibración para el modelo hidrogeológico y el segundo es establecer un nivel de referencia que sea factible de contrastar durante la construcción y operación del Túnel de Oriente o de Santa Elena.

La cartografía de las fuentes superficiales se realizó en un mapa 1:5 000 el cual incluía desde el portal occidental del túnel en la quebrada La Aguadita hasta los límites de las cuencas de las quebradas Sajonia y Yarumal. De este punto hasta la glorieta de Sajonia la cartografía se realizó en escala 1:10 000.

1.3 ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS

Para este estudio se tomó como base el estudio hidrogeológico del sector túnel del año 2000, elaborado por el ingeniero Fabián Hoyos Patiño. De allí se obtuvo información relacionada con:

- Clima: precipitación media y rangos en los cuales varía durante el año.
- Corrientes y fuentes de agua: capacidad de las fuentes de agua (quebradas Santa Elena, Yarumo, Sajonia o Salazar entre otras corrientes menores).
- Evaporación

Adicionalmente, a partir de los ensayos de campo se estimaron parámetros como la porosidad efectiva. Con base en los ensayos de campo y laboratorio se determinaron las permeabilidades de los estratos.

1.4 CONSTRUCCIÓN DEL MODELO

A partir del modelo estratigráfico se construyó el modelo hidrogeológico tridimensional de la condición actual, alimentado con los niveles de agua freática, la capacidad de los acuíferos, las corrientes superficiales, las permeabilidades de los diferentes estratos, los caudales de agua extraída y su localización y la precipitación. Una vez calibrado este modelo se simuló la situación futura con la presencia del túnel, modelado como un dren sub-horizontal.

2 MARCO GEOMORFOLÓGICO

La zona de interés desde el punto de vista geomorfológico y geológico tiene una forma irregular y se extiende desde el Valle de Aburrá hasta el altiplano de San Nicolás. Las principales corrientes que se tienen en el área afectada directamente por el túnel de Santa Elena corresponden en su orden desde el portal de entrada (km 10+2500) a las quebradas La Aguadita y La Bocana, Las Torres, La Cascada afluentes directas de la quebrada Santa Elena que también es cruzada por el alineamiento además de algunas tributarias menores, y las

quebradas El Yarumo, Salazar y Sajonia al final del alineamiento del túnel (km 18+400) que pertenecen a la cuenca del río Negro.

Los terrenos por los que atraviesa el túnel de Santa Elena inician en plano escarpe erosivo del Valle de Aburrá, en la margen izquierda de la quebrada del mismo nombre, la cual corresponde a una zona empinada a escarpada, de cuchillas puntiagudas, cañones estrechos y profundos hacia la parte media de la cuenca en dirección al Valle de Aburrá, además se presentan zonas de acumulación de materiales a modo de depósitos de vertiente, especialmente donde se presentan peldaños descendidos. En su parte más baja, presenta terrazas formadas por la intervención antrópica a modo de llenos. Más adelante el túnel transcurre por debajo de la zona conocida como los altiplanos del oriente antioqueño, específicamente el altiplano de Santa Elena con alturas entre las cotas 2 250 y 2 720 m.s.n.m. Allí predomina un relieve relativo bajo, constituido por colinas bajas y redondeadas, corrientes de agua superficiales y sinuosas, aunque se presenta un contraste orográfico conocido como Cerro Verde, de laderas más inclinadas (20 y 30%) y alturas mayores a los 2 500 m. El conjunto de altiplanos corresponden a los remanentes de antiguas superficies de erosión de la cordillera Central. Es decir, amplias porciones de territorio que estuvieron sometidas por largos periodos de tiempo geológico a la erosión y meteorización, quedando reducidas a extensas planicies o zonas suaves cercanas al nivel del mar y caracterizadas por profundos perfiles de alteración (suelos tropicales). Posteriores eventos tectónicos e isostáticos favorecen el levantamiento de estas superficies hasta las alturas que hoy presentan. Allí nuevamente existe la energía potencial suficiente para el desarrollo de nuevos frentes erosivos remontantes (como es el caso del Valle de Aburrá) y sus tributarios que inician un proceso de remodelación y desgaste de suelos.

Según la latitud y altitud el área de estudio da como resultado entre las cotas 1 400 y 2 000 msnm se tiene una temperatura entre los 17 y 24°C y una precipitación anual de 1 744 mm, identificándose la zona de vida bosque húmedo Premontano (bh-PM) y entre las cotas 2 000 y 2 700 msnm, con una temperatura media que oscila entre los 12 y 17°C y una precipitación de 2 067 mm al año se tiene la zona de vida bosque muy húmeda Montano Bajo (bmh-MB). El comienzo y la mitad del año son estaciones secas, de resto el clima es variable, lluvioso en algunas épocas y medianamente seco en otras.

Por su ubicación entre montañas, Medellín es una ciudad de vientos suaves provenientes del valle, que ascienden hasta chocar con los vientos regionales del alto de Santa Elena, esto obliga a que se eleven aún más, permitiendo el

enfriamiento, condensación y posterior precipitación en el área del centro de la ciudad. El régimen de vientos lo determinan los alisios dominantes del noreste y las masas de aire cálido que suben desde los valles bajos de los ríos Cauca y Magdalena, con predominio de movimiento en la zona norte del Valle de Aburrá, lo que origina que el viento sople en dirección norte-sur.

Las cuencas estudiadas particularmente para este proyecto presentan relieves variados, desde los montañosos y escarpados hasta las suaves a onduladas planicies. Considerando estos principios se mencionan algunas características de las cuencas diferenciadas en zonas para este estudio. La zona 1 corresponde a la quebrada La Bocana, tributaria de la quebrada Santa Elena, es una cuenca pequeña con un drenaje largo y poco sinuoso, de pocos tributarios, con forma ovalada en terrenos de pendientes moderadas hasta escarpadas localmente. A seguir se tiene la zona 2, quebrada Santa Elena, esta es la mayor de todas, posee una forma ovalada un poco alargada al suroeste, los drenajes son largos y medianamente sinuosos, de patrón dendrítico y media a alta densidad en zonas de mayores pendientes y un poco menos denso y más subparalelo en las zonas de topografía más suave. La zona 3 corresponde a la quebrada La Cascada, tributaria de la quebrada Santa Elena por su margen derecha, es una cuenca pequeña de topografía ondulada a escarpada, de pocos tributarios. La zona 4 drena hacia la quebrada Santa Elena, también por su margen derecha, tiene una forma ovalada alargada hacia el noreste, es una corriente larga de forma poco sinuosa con algunos tributarios cortos. Para la zona 5, quebrada El Yarumo, se cambia de cuenca, esta drena hacia el río Negro, es una cuenca larga de forma oval, posee un patrón de drenaje subparalelo dendrítico, de tributarios largos en una zona de topografía ondulada a montañosa hacia la parte alta. Por último la zona 6, quebrada Salazar, de forma redondeada es un corriente de menor jerarquía, con un patrón de drenaje escaso, poco sinuoso para un cauce joven, las formas de las vertientes que drena son onduladas a bajas.

3 MARCO GEOLÓGICO

A partir de información geológica derivada de los reconocimientos de campo y de la bibliografía consultada, se enunciarán de manera breve los materiales presentes en la zona de interés, desde los más jóvenes y superficiales hasta los más antiguos y profundos (ver planos AO-VI-GO-001, AO-VI-GO-002 y AO-VI-GO-003).

Inicialmente se observan como las unidades recientes los depósitos de origen aluvial incluyendo aluviotorrenciales en cercanías de algunas corrientes principales y depósitos de vertiente los cuales pueden ser clasificados como talus, depósitos de deslizamiento y flujos de escombros y/o lodos, además de llenos de origen antrópico. Dentro de las unidades litodémicas (que constituyen el basamento cristalino de la cordillera) se encuentra un conjunto litológico complejo afectado tectónicamente y denominado como "zona de cabalgamiento" (Kmce) que se localiza a media ladera en una franja subhorizontal en la vertiente que drena hacia el Valle de Aburrá, margen izquierda de la quebrada Santa Elena. A seguir, según la edad aparecen los intrusivos cretáceos representados gabros, dioritas y cuarzodioritas dentro del denominado Batolito Antioqueño (KcdA) que aflora en el sector del altiplano, incluyendo su apófisis Stock de Samarcanda (KcdS) en la parte media a final del trazado del túnel. Continuando la secuencia cristalina del cordillera Central aparece el Gneis Milonítico de Sajonia (JKgmS) hacia la zona de borde occidental del altiplano y dentro del Complejo Ofiolítico de Aburrá se tienen las rocas de tipo metagabro y dunitas representadas en las Metabasitas del Picacho (JKmbP) y las Dunitas de Medellín (JKuM) que se localizan en la vertiente del Valle de Aburrá y una pequeña escama en el sector de Sajonia. Dentro de las rocas más antiguas, las del Triásico, y donde se excavará la mayor proporción del túnel, se incluyen las rocas metamórficas del Complejo Cajamarca, definidas dentro del Grupo El Retiro que incluyen anfibolitas, gneises, esquistos y migmatitas. Todas ellas con sus principales afloramientos en el altiplano de San Nicolás, con excepción de las Anfibolitas de Medellín (TRaM) que son las rocas más abundantes del trazado y aparecen tanto hacia la vertiente del Valle de Aburrá como en el sector del altiplano de San Nicolás. Tanto las unidades rocosas como los depósitos de vertiente presentan perfiles de meteorización, con desarrollo de suelos residuales de variado espesor y con características de permeabilidad propias. Además los terrenos estudiados presentan como característica una cobertura de cenizas volcánicas que suavizan el paisaje, algunas veces como coberturas sobre las diferentes unidades y otras veces a modo de mezcla dentro de los depósitos de vertiente.

Tectónicamente se presentan varios sistemas de fallas que pueden tener su incidencia directa en estos terrenos; entre las que se destaca la falla Santa Elena y otras estructuras relacionadas muy estrechamente según un sistema Riedel, indicando un comportamiento de rumbo para los últimos desplazamientos.

Como ya se discutió en el Capítulo 3 de este informe las fallas, según las perforaciones y los afloramientos observados no presentan una jerarquía

regional ni afectan gravemente el macizo rocoso del túnel. Sin embargo, desde el punto de vista hidrogeológico estas estructuras tienen una gran importancia. En este sentido es importante recordar que para macizos cristalinos (ígneos y/o metamórficos) y éste no es la excepción, la permeabilidad primaria es en extremo baja, recayendo el establecimiento de la red de flujo en la permeabilidad secundaria, es decir, aquella asociada a las discontinuidades (fallas, diaclasa y fracturas) y su disposición geométrica respecto a las obras. Obviamente esta permeabilidad secundaria será mayor en los tramos de menor calidad de macizo rocoso, situación que es observable en las excavaciones subterráneas como abundantes afloramientos de agua en las zonas de alto grado de fracturamiento.

Para el caso del Túnel de Santa Elena las fallas pueden entenderse como cuerpos geométricos tabulares de espesor variable entre los cinco y diez metros, con zonas de influencia de otros 10 m aproximadamente a cada lado. Al interior de estos paralelepípedos la roca es cizallada con RQD cercanos a cero, con material triturado y en ocasiones pulverizado y plástico (gouge o salvanda); hacia los respaldos se observan zonas de bloques con mayor RQD y menor cantidad de discontinuidades por metro. Otras importantes propiedades de estas fallas son su buzamiento y su extensión. En cuanto al buzamiento las fallas cruzadas por el túnel presentan ángulos de alto a muy alto (60° - 90°) lo que tendrá implicaciones en la velocidad y caudal infiltrado durante las excavaciones. Además, según el modelo geológico desarrollado, la totalidad de fallas interpretadas y/o cartografiadas se extienden desde prácticamente la superficie (donde se han desarrollado perfiles de suelos más espesos que el promedio) y en donde se da la infiltración de las aguas que alimentan el sistema hidrogeológico hasta el interior del macizo, cruzando el túnel.

3.1 MODELO ESTRATIGRÁFICO

Con el objeto de entender la dinámica del agua subterránea en la zona de interés y complementar la cartografía de superficie ya descrita, se desarrolló una campaña de exploración geoelectrica (20 SEV).

• Interpretación Geoelectrica

Los modelos de interpretación se basan en la suposición que el suelo consiste en una sucesión de capas de espesor finito y eléctricamente homogéneas, isotrópicas y con contactos horizontales entre ellas. Por esto esta técnica geofísica se adapta mejor para determinar las condiciones en zonas geológicas con capas horizontales (Rendón 2003). Sin embargo, en la realidad la

resistividad de cada unidad geoelectrica está determinada por litologías heterogéneas, estructuras geológicas y diferencias locales en la calidad del agua. De esta forma el resultado obtenido en estas medias es sólo la resistividad aparente (ρ_a) de las capas (Rendón 2003). La resistividad aparente, según el modelo de Wenner, es calculada a partir de la siguiente expresión:

$$\rho_a = 2\pi a(V/I)$$

Donde:

a: Separación entre polos en metros (m)

V: Diferencia de potencial medida en voltios (V)

I: Corriente inyectada medida en amperios (A)

La resistividad aparente (ρ_a) en Ω/m y la distancia entre los electrodos son graficados logarítmicamente. Para su interpretación fue aplicado inicialmente el método del punto auxiliar, el cual corresponde a la comparación, segmento por segmento, de las curvas obtenidas en campo con una serie de curvas maestras derivadas de modelos matemáticos de dos capas. Esta interpretación manual definió una distribución preliminar de los paquetes o unidades geoelectricas, que posteriormente fueron corroboradas por medio un software especializado para tal fin.

El software mencionado utiliza la regresión polinomial para encontrar matemáticamente la curva que mejor se ajuste a los datos de campo, minimizando el error y definiendo una secuencia de paquetes de resistividad homogénea que pueda explicar los resultados (Figura 3-1).

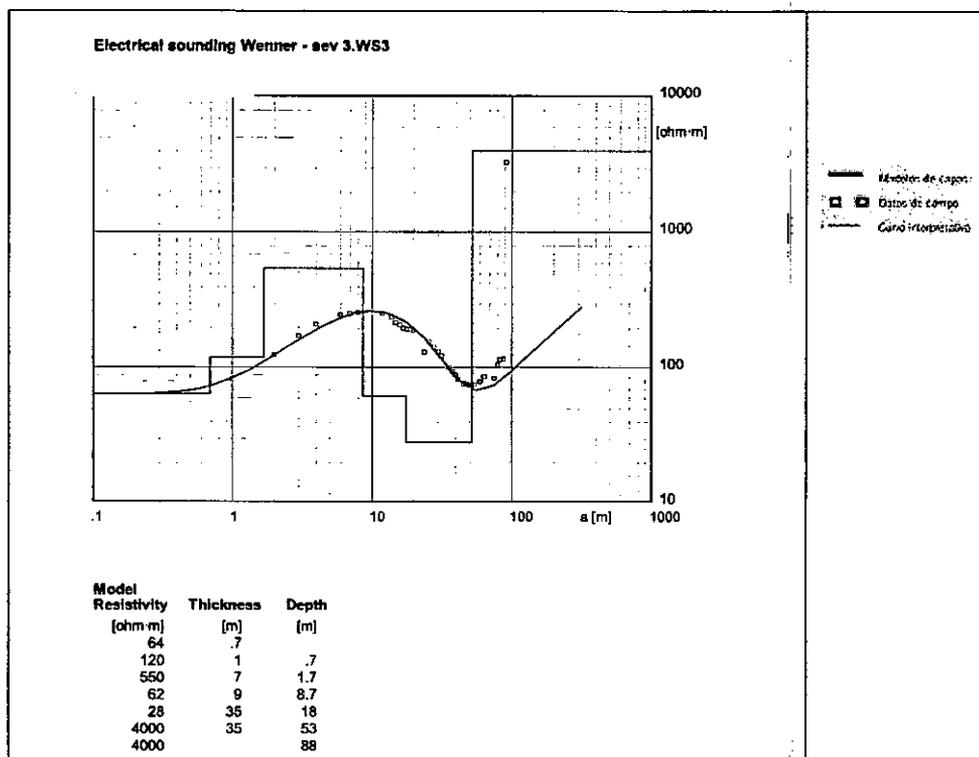


Figura 3-1. Ejemplo de interpretación por medio de software WinSEV 6.0 de un sondeo geoelectrico realizado en este estudio.

Con los datos obtenidos de los sondeos eléctricos verticales (Figura 3-1), se realizaron columnas estratigráficas interpretativas que fueron correlacionadas con los datos obtenidos de algunas de las exploraciones del subsuelo realizadas para este estudio (ver descripción de exploraciones). Con la tendencia general definida en las cuencas se realizaron perfiles sistemáticos, los cuales se alimentaron con la información geológica de superficie, los sondeos, niveles freáticos y la interpretación geoelectrica. Es importante aclarar que estos sondeos son una representación gráfica de datos geofisicos (técnica de exploración indirecta) mas no una descripción detallada o estratigráfica de los materiales que constituyen la zona de trabajo.

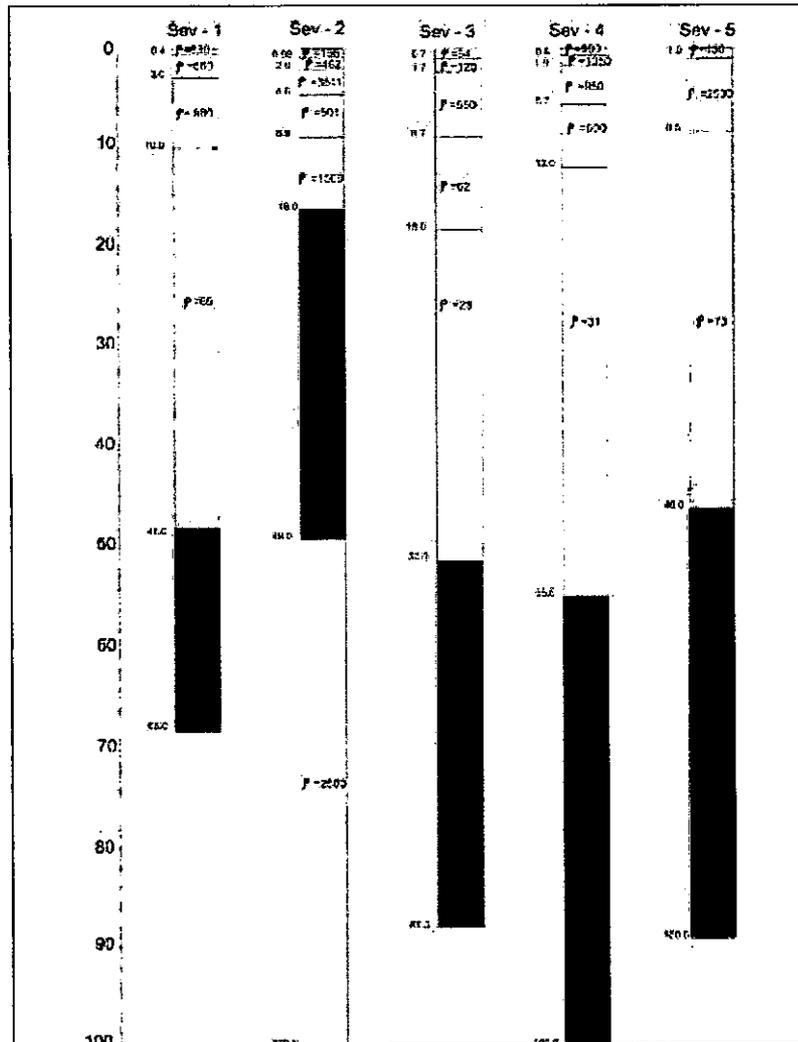


Figura 3-2. Columnas estratigráficas (SEV 1 a SEV 5)

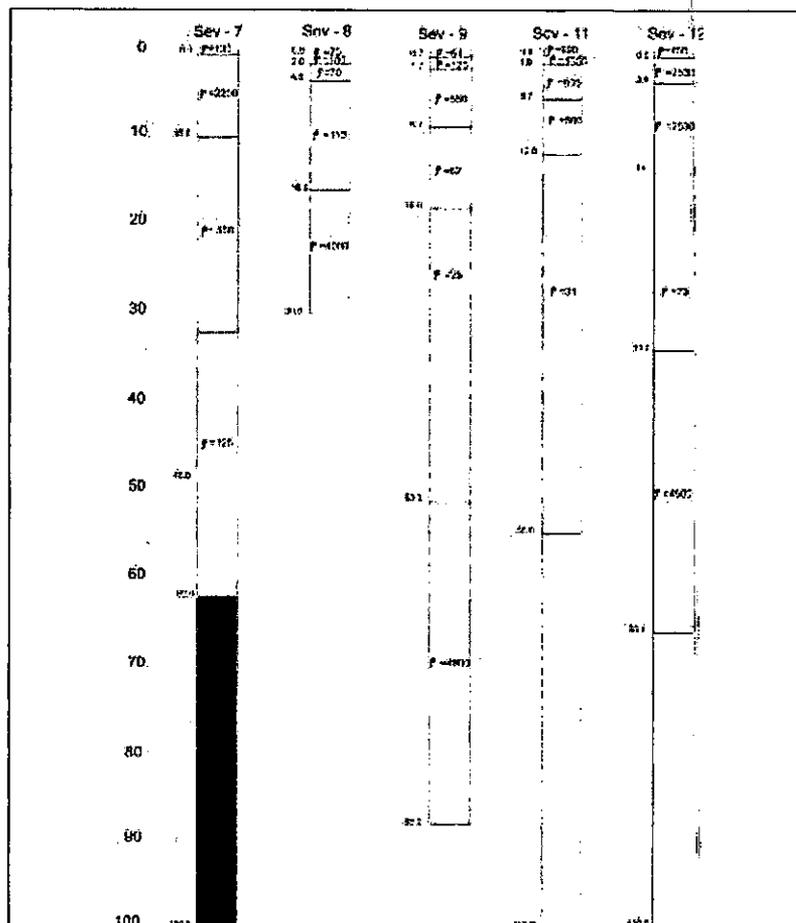


Figura 3-3. Columnas estratigráficas (SEV 7 a SEV 12)

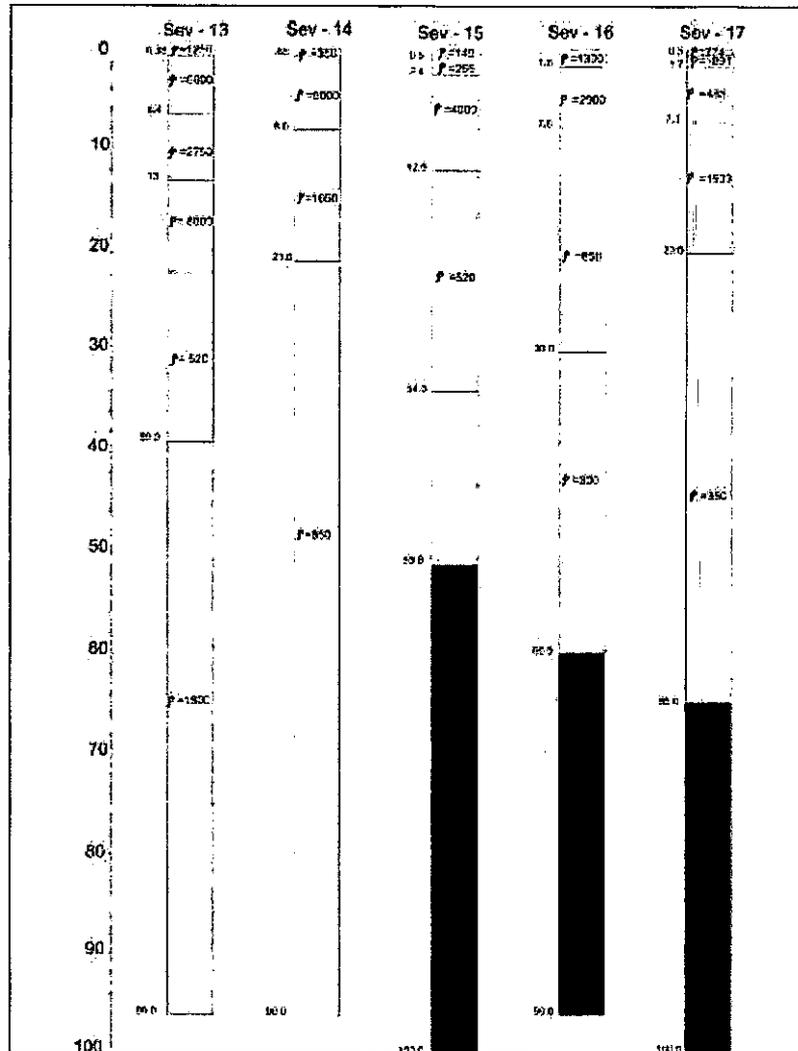


Figura 3-4. Columnas estratigráficas (SEV 13 a SEV 17)

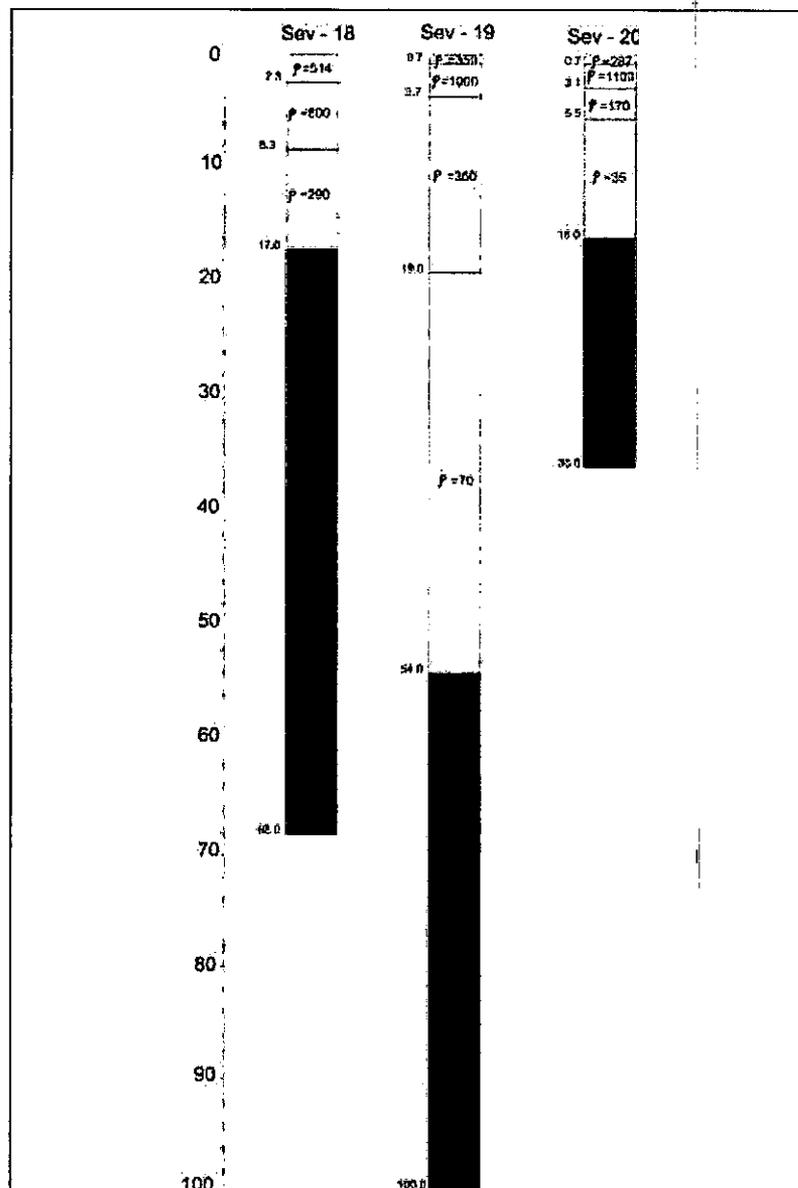


Figura 3-5. Columnas estratigráficas (SEV 18 a SEV 20)

El modelo geoelectrico obtenido señala la presencia de una sobrecapa continua de meteorización con espesor, constitución y condiciones de permeabilidad

variables. Dentro de esta sobrecapa, correspondiente al perfil de alteración de las rocas, pueden separarse al menos dos tipologías.

Por un lado y en mayor proporción están los suelos derivados de las rocas metamórficas (anfibolitas, gneises y milonitas) con espesores de hasta 45 m y constituidos predominantemente por limos arcillosos en superficie (IA e IB) y pasan en profundidad a limos arenosos finos (IC) de mayor permeabilidad. Sin embargo, dada la granulometría fina y la moderada permeabilidad, este perfil no ofrece una capacidad de acumulación de aguas que permita interpretarlo como un acuífero (explotable). Hacia la parte inferior se presenta la transición suelo - roca (IC-IIA) de poco espesor y remata de manera más o menos neta con el macizo rocoso levemente meteorizado (IIA, IIB y III), controlado por la permeabilidad secundaria, que es aún menor que la permeabilidad de los suelos suprayacentes, constituyendo una barrera para el flujo de agua subterránea.

Por otro lado y ubicado luego de la mitad del túnel hacia Sajonia, se identificaron suelos derivados de un cuerpo granítico ácido (granito y/o cuarzodiorita), que alcanzan espesores de hasta 100 m. Este perfil de alteración anormalmente espeso está constituido por limos en su parte superficial (IA y IB) de baja permeabilidad, pero rápidamente se torna en un saprolito franco arenoso (IC) claro y deleznable, con una permeabilidad moderada a alta que transicionalmente se transforma en una combinación de núcleos de roca aún fresca en medio de una matriz saprolítica (IC-IIA) cuyo espesor es en extremo variable. En este macizo rocoso es frecuente hallar, en medio de la roca de excelente calidad, pequeñas zonas de arena (saprolito) y cáscaras rocosas producto de la meteorización esferoidal, indicando el flujo de aguas meteóricas erráticas. Al igual que el anterior perfil, a pesar de la mayor permeabilidad, estos suelos no ofrecen condiciones de permeabilidad, acumulación y/o recarga que permitan interpretarlo como un acuífero de interés económico. Adicionalmente, desde el punto de vista regional el nivel piezométrico presenta una única superficie, relacionada estrechamente con la topografía del territorio, con profundidades entre 2,0 y 15 m en general. Saturando los perfiles de meteorización descritos, definiendo una especie de gran acuífero libre, sin sub-presiones o posibilidades de saltación.

El macizo rocoso, como ya se describió, no presenta posibilidad de almacenar agua pero sí de transmitirla a través de las discontinuidades.

Es importante remarcar que en una región cerca del corredor por donde cruzaría el Túnel de Santa Elena se reporta la presencia de sistemas pseudocársticos, es decir, la presencia de rocas solubles (especialmente en las discontinuidades) que permiten el establecimiento de un importante flujo de agua en medio de oquedades y o fisuras ampliadas por la disolución de las paredes rocosas. Es así como, en la vereda El Plan, se identificaron quebradas de caudal considerable que súbitamente se introducen en el macizo rocoso a través de oquedades denominadas dolinas y continúan de manera subterránea hasta aflorar más abajo, en la vertiente media alta de la quebrada Santa Elena, según lo reportan algunos estudios de la Universidad Nacional. Esta situación se relaciona con la unidad litológica denominada Dunita de Medellín, la cual puede sufrir disolución parcial de los materiales que constituyen las discontinuidades.

Teniendo esta situación como referencia se realizaron varios recorridos de campo en el corredor de influencia del túnel, con el objeto de identificar rasgos y/o características geomorfológicas indicativas de un fenómeno pseudocárstico en el macizo en el que se excavaría el túnel. Sin embargo, no se hallaron, en concordancia con las características mineralógicas y tectónicas de las rocas además de la literatura técnica sobre el tema. Incluso algunas personas de la zona reportaron la presencia de cuevas en el sector de El Tambo, lejos de la zona de influencia del proyecto. Se realizó una inspección del sitio y se pudo corroborar que se trata de excavaciones antrópicas en medio de los suelos, con forma de herradura y evidencias de actuación de herramientas en las paredes, descartándose efectos de disolución o tubificación de estos materiales.

4 HIDROLOGÍA

El área de influencia indirecta está comprendida entre el Valle de Aburrá y el altiplano de San Nicolás en el departamento de Antioquia; donde las corrientes drenan en sentido noroeste hacia el valle y sureste hacia el altiplano. Para efectos de análisis de la red de drenaje, se realizó la identificación de los cuerpos de agua que atraviesan la zona de estudio con base en la cartografía básica disponible, complementada con la ayuda de restituciones cartográficas escala 1:10.000, elaboradas por el IGAC y de un modelo digital de terreno que abarca la zona de estudio, sobre los cuales se trazaron las divisorias de seis cuencas de drenaje de los principales cauces en algunos sitios de interés general.

En la zona de estudio y sus alrededores se identificaron las quebradas Santa Elena, Yarumito, Salazar, La Bocana, La Aguadita, La Espadera, Salazar entre otras como los cauces principales asociados a la zona de influencia del trazado del túnel. En la zona del altiplano también existen otros cauces menores, así como una serie de acequias utilizadas para el aprovechamiento de las aguas en la producción agrícola y lechera, y otras corrientes de menor importancia para el sistema de drenaje, además de algunas aguas de escorrentía superficial estacionarias como producto de las lluvias en épocas invernales.

La cobertura vegetal de las cuencas altas está constituida principalmente por zonas de bosque con coberturas vegetales pobres, mientras que en la parte baja predominan las zonas de pradera y pastizales, al igual que áreas destinadas a la explotación agrícola. Las cuencas definidas en el estudio, están enmarcadas dentro de una geología de rocas duras de origen ígneo y metamórfico, así como algunos depósitos de origen aluvial y de vertiente.

4.1 DRENAJE

La zona de influencia directa del túnel de oriente, sector de interés para este estudio, se trabajaron seis cuencas principales que se muestran a seguir en la Tabla 4-1, con sus respectivas áreas y nombre relacionado con la quebrada dominante.

Tabla 4-1 – Cuencas de estudio

ZONA	Área (m ²)	Nombre de la Cuenca
Zona 1	587 852,94	Quebrada La Bocana
Zona 2	8 860 309,85	Quebrada Santa Elena
Zona 3	968 005,76	Quebrada La Cascada
Zona 4	1 152 268,72	
Zona 5	4 619 868,99	Quebrada El Yarumo
Zona 6	2 995 528,51	Quebrada Salazar

4.1.1 Quebrada Santa Elena

Nace en el cerro del Espíritu Santo, vereda de Santa Elena, en la cota 2 680; hacia la cota 2 620 confluye por la margen derecha otro ramal que conforma su

cabecera a la cual le llegan otros afluentes por ambas márgenes aumentando así su caudal. Entre sus afluentes se cuentan las quebradas San Juan, El Cerro, Santa Barbará, La Cascada, La Espadera o Bizarro, Los Cauces y La Pastora entre otras corrientes menores.

La cuenca de la quebrada Santa Elena limita por el norte con las subcuencas de las quebradas El Ahorcado, El Molino y parte de Piedras Blancas; por el oriente con La Cuchilla, La Gulupera (divisoria de aguas de Piedras Blancas, hasta encontrarse con el alto de Santa Bárbara; de allí hasta el alto de las Brisas, punto de intersección de los municipios de Guarne y Rionegro; al sur con el municipio de Rionegro y las subcuencas de las quebradas La Presidenta y La Poblada y al occidente con el río Medellín o Aburrá.

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

4.1.2 Quebrada Salazar o Sajonia

Hace parte de la cuenca que drena hacia el altiplano correspondiente a la quebrada Yarumito, es también conocida como Sajonia. Corresponde a una corriente juvenil, la cual de manera incipiente está labrando su cauce, aunque presenta varios tributarios de mediana longitud. Esta corriente está enmarcada dentro de colinas medias de topes redondeados y lomos largos.

4.1.3 Patrones de drenaje, dinámica fluvial y estimación de caudales

A nivel regional se observa en las partes altas de las cuencas analizadas un patrón de drenaje con características propias de cauces de montaña, los cuales presentan un cauce con alineamiento predominantemente recto, con fondos encañonados en forma de "V" y valles estrechos, en los cuales no se evidencia una divagación importante.

Hacia la zona del altiplano, las partes topográficamente más bajas, las corrientes son escurridas por cauces de baja pendiente con fondos suaves, que presentan patrones de drenaje de tipo meándrico ligeramente sinuosos y amplias zonas de inundación, sobre las cuales se han observado algunas evidencias ligeras de divagación del cauce. De manera general, las corrientes estudiadas poseen cauces bien definidos.

En el plano I-P-2028-AO-VI-HG-001 llamado cuencas, puntos de agua y sondeos eléctricos verticales, se localizan 24 estaciones con estimación de caudales, las cuales fueron tomadas en puntos representativos de pequeñas corrientes, según una metodología de campo. En la siguiente tabla se muestran los resultados y se describe de manera general su ubicación.

Tabla 4-2 – Caudales estimados

ESTACIÓN	CAUDAL (m ³ /s)	COORDENADAS		OBSERVACIONES
		N	E	
SECTOR ORIENTAL TÚNEL SANTA ELENA				
1C	0.21	1175632	847693	270 m aguas arriba del portar oriental del túnel sobre la cuenca de la quebrada Salazar
2C	0.0032	1175816	847459	Pequeño afluente por margen derecha de la quebrada Salazar, 300 m aguas arriba del 1C
3C	0.097	1176295	847533	Pequeño afluente de la quebrada Salazar por margen izquierda, 1km aguas arriba del portal oriental del túnel
4C	0.006	1176073	847759	Pequeño afluente de la quebrada Salazar por margen izquierda, 350 m aguas abajo del 3C
5C	0.037	1176340	847217	1.3 km aguas arriba del portal sobre el cauce principal de la quebrada Salazar
6C	0.026	1176821	845975	Pequeño afluente por margen izquierda de la quebrada El Yarumo, abajo del peaje
7C	0.025	1175862	845672	Afluente por margen derecha de la quebrada El Yarumo en la cuenca media-alta

ESTACIÓN	CAUDAL (m ³ /s)	COORDENADAS		OBSERVACIONES
		N	E	
SECTOR OCCIDENTAL TÚNEL SANTA ELENA				
8C	0.5	1178472	842797	Cauce principal de la quebrada San Pedro, 100 m aguas arriba de la desembocadura de la quebrada Santa Elena
9C	0.11	1178968	842678	Afluente por margen derecha de la quebrada Santa Elena, 220 m aguas abajo del casco urbano y 230 m aguas arriba de la vía Santa Elena (obra hidráulica vía veredal)
10C	0.024	1179977	842358	Cauce principal de la quebrada El Placer en la obra hidráulica de cruce de la vía Santa Elena, 200 m antes de llegar al desvío de la vereda El Plan
11C	1.3	1179860	842263	Cauce principal quebrada Santa Elena, en el pontón de acceso a la finca de Corantioquia
12C	0.032	1179645	842401	Afluente por margen derecha de la quebrada Santa Elena, medida sobre la obra hidráulica de la vía al Plan, 170 m después de las partidas
13C	0.014	1179732	842807	500 m aguas arriba de la medida del 12C
14C	0.0094	1179825	843060	750 m aguas arriba de la medida del 10C, sobre el mismo afluente
15C	0.04	1179197	842236	Cerca a la desembocadura de la quebrada Las Torres a la Santa Elena por la margen

ESTACIÓN	CAUDAL (m ³ /s)	COORDENADAS		OBSERVACIONES
		N	E	
				derecha
16C	0.02	1179217	842310	Sobre la quebrada Las Torres, 75 m aguas arriba de su desembocadura en la Santa Elena. En la obra de cruce de la vía Santa Elena
17C	0.046	1178852	841435	Cauce intermitente en la Vereda El Plan, el cual termina en una dolina
18C	0.0043	1178974	841803	Cabeceras de un pequeño afluente de la quebrada Santa Elena (por margen izquierda) en inmediaciones de la Vereda El Plan
19C	0.15	1177882	842127	Parte alta de un afluente de la quebrada San Pedro, por su margen izquierda
20C	0.076	1178915	842270	40 m antes de la desembocadura de una quebrada a la Santa Elena, por su margen izquierda. Esta quebrada se ubica 280 m aguas arriba del puente de la vía a El Plan.
21C	0.0011	1178554	842097	430 m aproximadamente aguas arriba del punto 20C
22C	0.24	1178659	842091	330 m aguas arriba del punto 21C
23C	0.9	1178946	842289	Quebrada Santa Elena, 240 m aguas arriba del puente de la vía a El Plan sobre la quebrada Las Torres.
24C	0.02	1179249	842592	300 m aguas arriba de la vía Santa Elena, sobre la quebrada Las torres

4.1.4 Zonas inundables

En el caso de las quebradas y cauces de menor importancia identificados en la zona, que en general permanecen secos, cuando se presenta un fuerte aguacero, se desbordan e inundan pequeñas extensiones de tierra.

4.2 PRECIPITACIÓN

Las características pluviales fueron analizadas para tres aspectos; los dos primeros relacionados con el régimen de precipitaciones evaluando la variación mensual de la precipitación y el número de días con lluvia que se presentan en promedio en cada uno de los meses del año y el tercero con el análisis de las precipitaciones máximas.

Precipitaciones medias: a partir de los registros de precipitación se construyeron los histogramas y se analizó la precipitación media mensual para algunas estaciones cercanas, a modo de ejemplo se muestra la distribución de lluvias para el mes de enero del presente año en el municipio de Medellín; adicionalmente, la Figura 4-1 muestra la variación de la precipitación total anual en las diferentes estaciones analizadas.

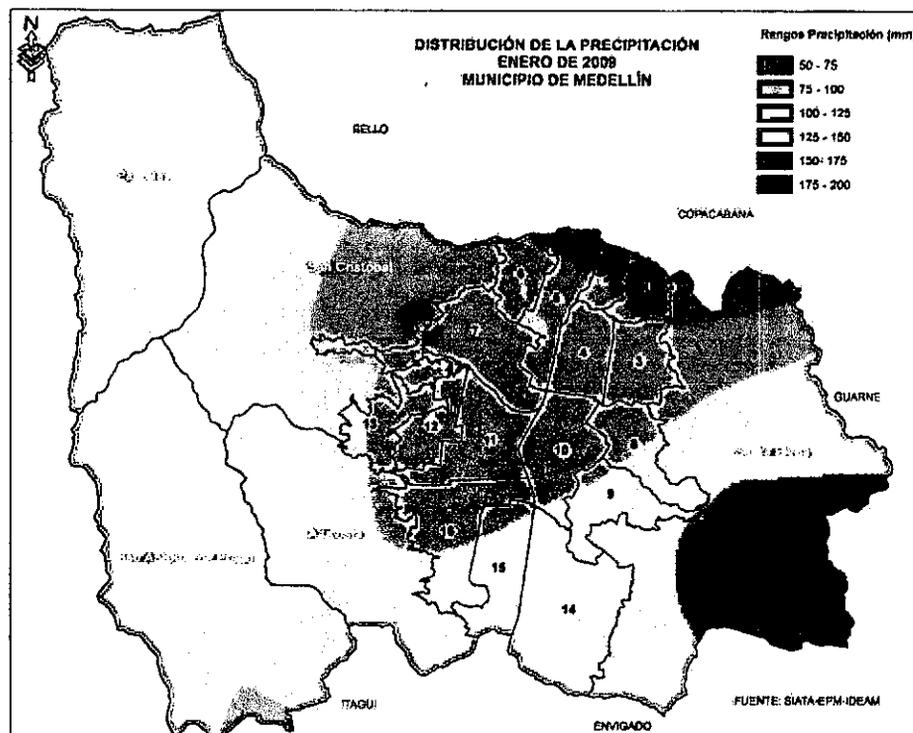


Figura 4-1 - Precipitaciones en el mes de enero para el municipio de Medellín

Como se observa en el mapa anterior, en el mes de enero de 2009 las mayores precipitaciones se concentraron hacia el corregimiento de Santa Elena. La estación con mayores valores de precipitación mensual reportados fue la ubicada en el corregimiento de Santa Elena (Liceo Santa Elena) con 185,5 mm.

Las medias mensuales para el municipio de Medellín, según datos tomados en el Aeropuerto Olaya Herrera de precipitación se muestran en la Figura 4-2.

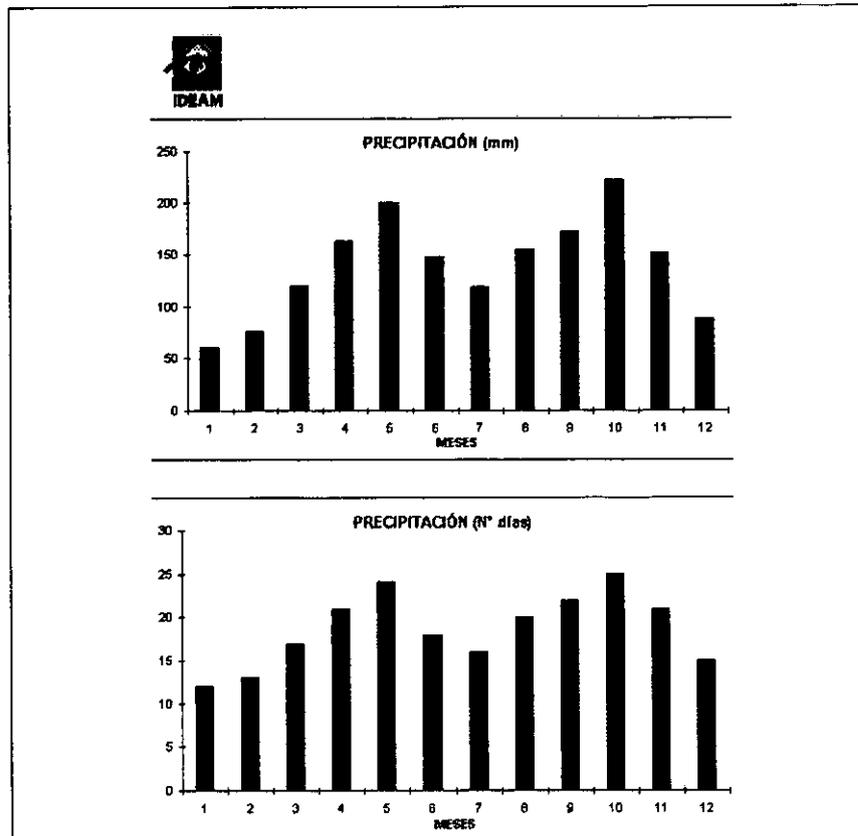


Figura 4-2 - Precipitación total anual y por días para el municipio de Medellín (Información suministrada por el Programa de Meteorología Aeronáutica del IDEAM)

Como se puede observar, el régimen de precipitaciones de la zona es de tipo bimodal, donde se alternan las temporadas lluviosas en los meses de abril-mayo, con máximos de precipitación de 200 mm y de septiembre a noviembre, con máximos de 220 mm. Los periodos de lluvia menores se presentan en los periodos de diciembre-febrero y julio, siendo los meses de enero a febrero los más secos, con precipitaciones que oscilan entre 60 y 75 mm.

5 INVENTARIO DE PUNTOS DE AGUAS

Una característica importante de la zona de impacto directo del proyecto del túnel de oriente es la densidad de población asentada en sus inmediaciones, pues es una población en crecimiento con un predominio de uso agrícola de los suelos (ejemplos: fincas de cultivos de flores y cultivos de hortalizas, además de ganado de leche), donde se observan viviendas en aumento así como zonas de fincas de recreo.

A partir del trabajo de campo y la información secundaria consultada se pudo establecer que el aprovechamiento de las aguas es básicamente para los cultivos y el uso doméstico. Es importante mencionar que el levantamiento de la información de campo fue bastante complejo, debido precisamente a la restricción del paso en las zonas de los cultivos en donde no fue posible el acceso. A seguir se presentan los diferentes tipos de afloramientos o puntos de agua mapeados para la zona de influencia directa del túnel de oriente y una breve descripción de estos fenómenos y en la Tabla 5-1 se listan los puntos mapeados que pueden observarse en el planol-P-2028-AO-VI-HG-001:

Tabla 5-1 – Puntos de agua

Número identificador	Tipo de Agua
1	Agua intermitente
2	Agua estancada
3	Humedal
4	Humedal
5	Agua constante
6	Humedal
7	Agua estancada
8	Humedal
9	Agua constante
10	Nacimiento
11	Humedal
12	Nacimiento
13	Humedal
14	Humedal
15	Nacimiento
16	Humedal
17	Humedal
18	Humedal

Número identificador	Tipo de Agua
19	Nacimiento
20	Humedal y Nacimiento
21	Agua intermitente
22	Agua constante
23	Humedal
24	Nacimiento
25	Dolina
26	Laguna
27	Humedal
28	Laguna
29	Laguna
30	Dolina
31	Humedal
32	Dolina
33	Nacimiento
34	Laguna
35	Humedal
36	Nacimiento
37	Humedal
38	Tanque de Agua
39	Humedal
40	Humedal
41	Tanque de Agua
42	Tanque de Agua
43	Laguna
44	Agua constante
45	Humedal
46	Nacimiento
47	Dolina
48	Nacimiento
49	Tanque de Agua
50	Agua constante
51	Humedal
52	Humedal
53	Agua estancada
54	Humedal
55	Nacimiento
56	Tanque de Agua
57	Nacimiento
58	Humedal
59	Humedal
60	Humedal

Número identificador	Tipo de Agua
61	Humedal
62	Nacimiento
63	Nacimiento
64	Humedal
65	Laguna artificial
66	Agua intermitente con agua estancada
67	Agua constante
68	Humedal
69	Tanque de Agua
70	Nacimiento
71	Tanque de Agua
72	Nacimiento
73	Nacimiento
74	Humedal
75	Laguna artificial
76	Nacimiento
77	Laguna artificial
78	Laguna artificial
79	Tanque de Agua
80	Nacimiento
81	Humedal
82	Nacimiento
83	Tanque de Agua
84	Humedal
85	Tanque de Agua
86	Nacimiento
87	Nacimiento
88	Nacimiento
89	Laguna
90	Nacimiento
91	Laguna
92	Lagunas artificiales
93	Laguna artificial
94	Nacimiento
95	Agua estancada
96	Nacimiento
97	Agua constante
98	Humedal
99	Agua intermitente
100	Laguna
101	Humedal y Nacimiento
102	Tanque de Agua

Número Identificador	Tipo de Agua
103	Humedal
104	Tanque de Agua
105	Nacimiento
106	Humedal y Agua Intermitente
107	Tanque de Agua
108	Humedal
109	Nacimiento
110	Humedal
111	Nacimiento
112	Tanque de Agua
113	Nacimiento
114	Nacimiento
115	Humedal
116	Tanque de Agua
117	Humedal
118	Tanque de Agua
119	Agua estancada
120	Nacimiento
121	Laguna
122	Nacimiento
123	Humedal
124	Nacimiento
125	Humedal
126	Nacimiento
127	Nacimiento
128	Humedal
129	Nacimiento
130	Nacimiento
131	Laguna artificial
132	Nacimiento
133	Laguna artificial
134	Humedal y Nacimiento
135	Tanque de Agua
136	Nacimiento
137	Agua constante
138	Humedal y Nacimiento
139	Humedal
140	Nacimiento
141	Nacimiento
142	Humedal
143	Laguna
144	Nacimiento

Número identificador	Tipo de Agua
145	Nacimiento
146	Humedal
147	Nacimiento
148	Nacimiento
149	Humedal
150	Humedal
151	Agua estancada
152	Humedal y Nacimiento
153	Nacimiento
154	Laguna
155	Humedal
156	Agua estancada
157	Nacimiento
158	Nacimiento
159	Humedal
160	Humedal
161	Humedal
162	Nacimiento
163	Laguna
164	Nacimiento
165	Humedal
166	Humedal y Nacimiento
167	Humedal
168	Nacimiento
169	Laguna artificial
170	Lagunas artificiales
171	Humedal
172	Nacimiento
173	Nacimiento
174	Nacimiento
175	Agua intermitente
176	Nacimiento
177	Nacimiento
178	Humedal y Nacimiento
179	Tanque de Agua
180	Humedal y Nacimiento
181	Laguna artificial
182	Agua estancada
183	Humedal
184	Nacimiento
185	Humedal
186	Humedal y Nacimiento

Número identificador	Tipo de Agua
187	Agua estancada
188	Humedal y Nacimiento
189	Nacimiento
190	Humedal
191	Tanque de Agua y agua constante
192	Agua intermitente
193	Humedal
194	Nacimiento
195	Agua constante
196	Humedal
197	Agua constante
198	Humedal
199	Tanque de Agua
200	Humedal
201	Laguna artificial
202	Nacimiento
203	Laguna artificial
204	Humedal
205	Agua estancada
206	Nacimiento
207	Tanque de Agua

5.1 AGUAS INTERMITENTES

Se presentan de dos formas principalmente; la primera, en zonas de captación de aguas cercanas a las vías principales, y la segunda en zonas sometida a alta pluviosidad la cual genera la ocurrencia de dichas aguas. La característica fundamental es que se logra ver el recorrido eventual del agua y en algunas partes se preserva cierta humedad en el suelo durante periodos de tiempo más largos. Las aguas intermitentes se logran ver en gran parte del área de influencia del proyecto.

5.2 AGUAS CONTINUAS

Se encuentran ampliamente distribuidas en la zona, donde se caracterizan por ser pequeños afluentes de agua a quebradas principales (Foto 1) y aguas derivadas de captaciones en tanques o pequeños represamientos los cuales no presentan ningún tipo de control y propician hilos o pequeños cauces de aguas superficiales.

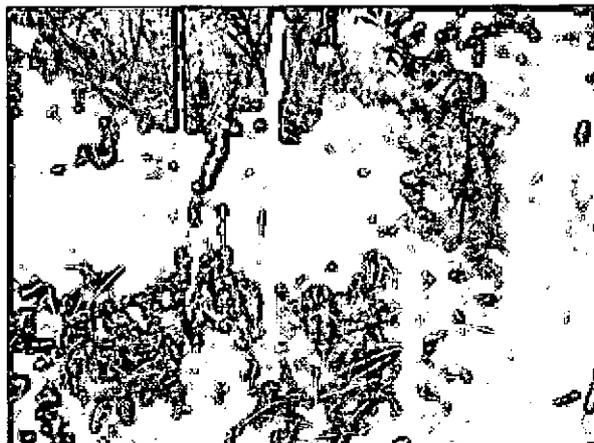


Foto1. Pequeño afluente de agua La Torres

5.3 AGUAS ESTANCADA

En la zona se encontraron lugares en las que el agua se estancaba ya sea porque la pendiente no favorecía a la escorrentía o por excavaciones descubiertas sin control (Foto 2) que permitían el estancamiento de aguas ya sean de lluvias o de escorrentías. Se caracterizan en ciertas zonas por estar cerca de fincas, además de que se forman en tiempos de alta pluviosidad.

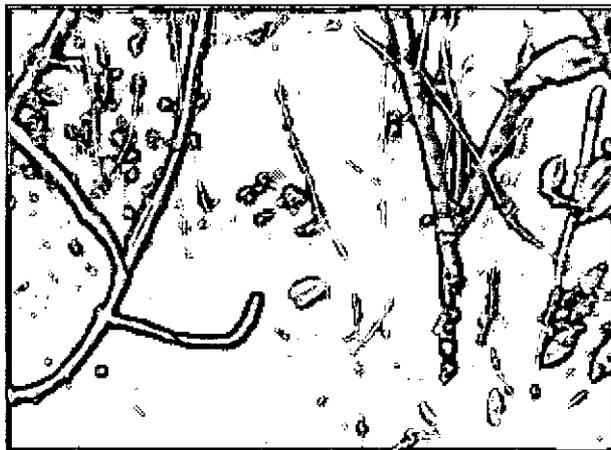


Foto 2. Agua estancada en una cavidad de unos dos metros

5.4 HUMEDALES

Los humedales se encontraron en toda la zona de trabajo, fue la presentación de agua más común que se pudo ver. Se caracteriza por presentarse en áreas planas, con mucha vegetación y saturación de agua, tanto en suelos residuales de dunita, anfibolita y granito (Foto 3). Es muy frecuente el encuentro de humedales con nacimientos de agua, además son puntos de aguas que varían mucho en sus dimensiones, pueden ser pequeños focos muy localizados, los cuales son los más comunes o pueden ser áreas de tamaños considerables formando lodazales.

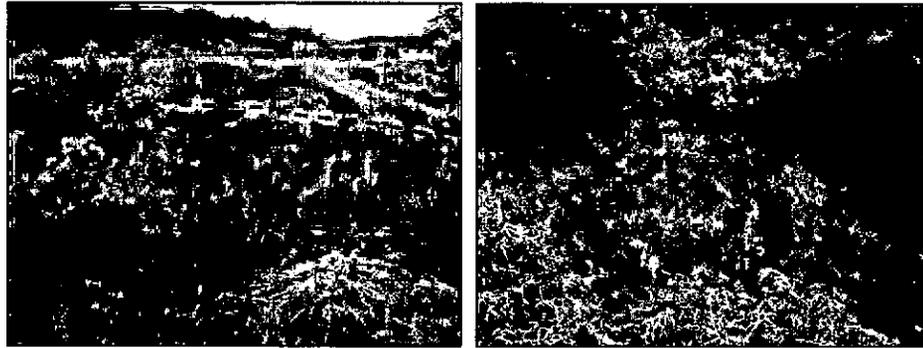


Foto 3. a. Humedal en suelo residual de anfibolita
b. Humedal en suelo residual de dunita

5.5 NACIMIENTOS

Se lograron cartografiar una gran cantidad de nacimientos, en las diferentes cuencas, que dan evidencia de la importancia hídrica de esta zona. Los nacimientos se presentan ampliamente distribuidos y sirven como tomas para acueductos veredales, fuentes de agua para cultivos y en otros casos son utilizados por pobladores para uso netamente particular (Foto 4). En todo tipo de litología se encuentran los nacimientos, y de igual forma ocurre con el relieve, ya que desde cerros empinados hasta en cercanías de colinas suaves se pueden encontrar.

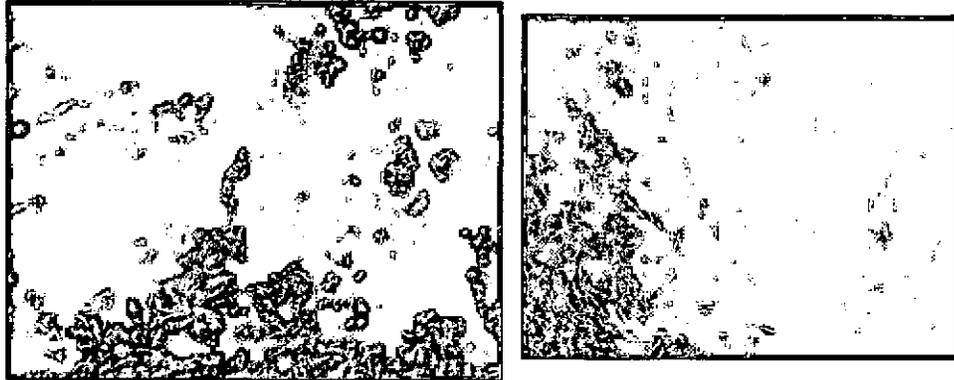


Foto 4. a. Nacimiento quebrada Santa Elena
b. Nacimiento quebrada San Pedro

5.6 DOLINAS

Son una característica muy importante en el relieve de la zona, ya que son agujeros en el suelo que permiten que el agua de quebradas u otras continúen su cauce por debajo de éste, condicionando así el flujo del agua. Las dolinas son una característica exclusivamente en el sector de la zona constituida por dunita, y donde es importante resaltar que algunas presentan abundante vegetación en su interior. Sin embargo, en la zona de influencia del túnel no se apreció ninguna de ellas. Alrededor de cuatro dolinas fueron vistas claramente en el área de estudio (Foto 5).



Foto 5. Dolinas típicas en zona de dunita

5.7 LAGUNAS

Son pequeñas concentraciones de agua en área y las cuales se pueden clasificar en naturales y artificiales en el lugar de trabajo. Principalmente eran puntos de vegetación baja en la superficie del agua y en cercanías de nacimientos. Son muy comunes en zonas donde la roca predominante es anfibolita. Son puntos de agua que por estar en partes muy poco transitadas se conservan en gran medida, es importante resaltar que ninguna tenía algún grado de salinidad apreciable (Foto 6).

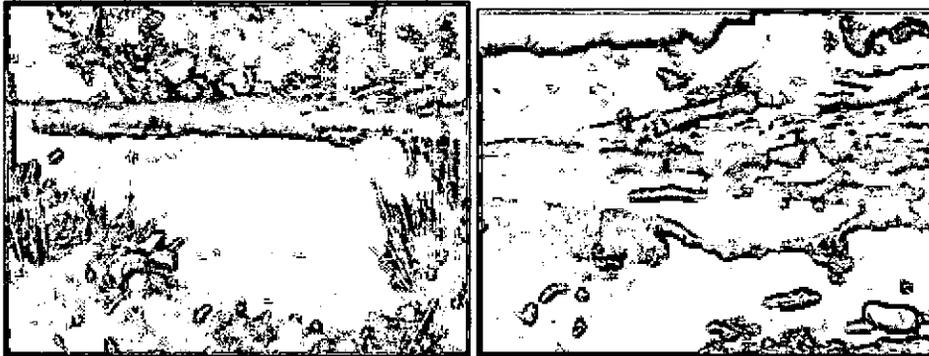


Foto 6. a. Laguna en Cerro Verde

b. Laguna cerca quebrada Sajonia

5.8 TANQUES DE AGUA

En zonas donde se encontraba gran concentración de cultivos y ganado era común encontrar tanques de agua los cuales eran abastecidos por agua de quebradas o nacimientos y que permiten tener zonas que no presentaban mucha agua para los cultivos muy activos. De esta perspectiva se presenta la importancia de los tanques en ciertas zonas. En esta parte podemos encontrar albercas en todo el cauce de una quebrada captando agua pero la cual le permite seguir con su curso.

6 HIDROGEOLOGÍA

En perfil hidrogeológico generalizado se obtuvo a partir del trabajo de campo y la exploración geoelectrónica.

El nivel freático en general es somero, variando desde menos de un metro hasta unos 15 m. Adicionalmente, los ríos y quebradas del sector constituyen importantes elementos de recarga, así como las escorrentías de las vertientes rocosas aledañas, que baja a los depósitos arenosos y limo arenosos.

Para el modelo hidrogeológico la estratigrafía de la zona se simplificó en cinco unidades. La primera unidad corresponde al suelo derivado de las anfibolitas de Medellín, el cual cubre la mayor parte de la zona de estudio; la segunda unidad es la que representa el suelo residual del Stock de Samarcanda, ambas unidades tienen espesores inferiores a los 100 m y se encuentran ubicadas en la parte superior del modelo. Las otras tres unidades restantes corresponden a las anfibolitas de Medellín, al Stock de Samarcanda y las fallas de mayor incidencia en el alineamiento del túnel. Todas estas tres últimas unidades se encuentran desde la parte inferior del suelo residual hasta la cota 1800.

6.1 CONSTRUCCIÓN DEL MODELO

El área comprendida en el modelo es de 40,7 km², la cual se dividió en una malla de 200 columnas por 200 filas, generando así celdas de 21,5 m de ancho por 47 m de largo. Se utilizó una distribución homogénea de celdas con el fin de tener un correcto nivel de interpolación para la superficie del terreno.

En profundidad el modelo está compuesto por una primera capa que representa el estrato de suelo en toda la zona de estudio, posteriormente se distribuyeron 28 capas paralelas a la primera con el fin de discretizar el modelo para obtener resultados adecuados al momento de modelar la condición de dren dentro del macizo.

En la figura 1 se presenta la disposición en planta del modelo y en la figura 2 una sección por aproximada por el alineamiento del túnel.

6.2 CONDICIONES DE FRONTERA

6.2.1 Contorno

Las condiciones de frontera del modelo se definieron a partir de la disposición geomorfológica de las seis cuencas afectadas por el trazado del túnel. Los límites en el costado sur están dados por: la zona 1 que corresponde a la cuenca de la quebrada La Bocana, en el modelo la quebrada La Bocana sirve como condición de frontera en el tramo occidental; desde este punto hasta la parte media del modelo el límite está dado por la divisoria natural que delimita la

cuenca de la quebrada Santa Elena; continuando hacia el occidente en un pequeño tramo el límite está dado por la divisoria de la cuenca de la quebrada El Yarumo y posteriormente, esta misma quebrada sirve de límite del modelo hasta el extremo oriental. El costado norte del modelo se encuentra delimitado por las divisorias de las cuencas de las quebradas La Salazar, La Cascada y Santa Elena, además de la quebrada asociada a la cuenca de la zona 4.

6.2.2 Límites inferior y superior

El límite inferior del modelo está dado por la cota 1 800, la cual está por debajo de la zona de influencia del túnel. El límite superior corresponde a la altura máxima por la que transcurre el trazado del túnel, de 2741 m, la cual se encuentra en Cerro Verde.

6.2.3 Recarga

Considerando las entradas se tiene una recarga por infiltración natural de la lluvia o precipitación, teniendo en cuenta el tipo de suelo y el régimen de precipitación, la recarga potencial está estimada de 46 mm/año, lo cual genera una infiltración del orden de 2000 mm³/día en toda la zona de estudio.

6.2.4 Ríos

Los cuerpos de agua superficiales (ríos, quebradas, lagos, humedales, entre otros) pueden aportar o extraer agua al sistema de flujo subterráneo, dependiendo del gradiente existente entre estos dos sistemas. El objetivo de VMODFLOW con este módulo es simular el efecto de flujo entre cuerpos de agua superficial y cuerpos de agua subterránea.

El Esquema 6-1 muestra la representación de esta condición de frontera en VMODFLOW. Como se observa la interacción, general entre el acuífero y el río se hace a través del lecho del río, representado en forma similar a un acuífero semiconfinado mediante la conductividad hidráulica del lecho y el espesor del mismo.

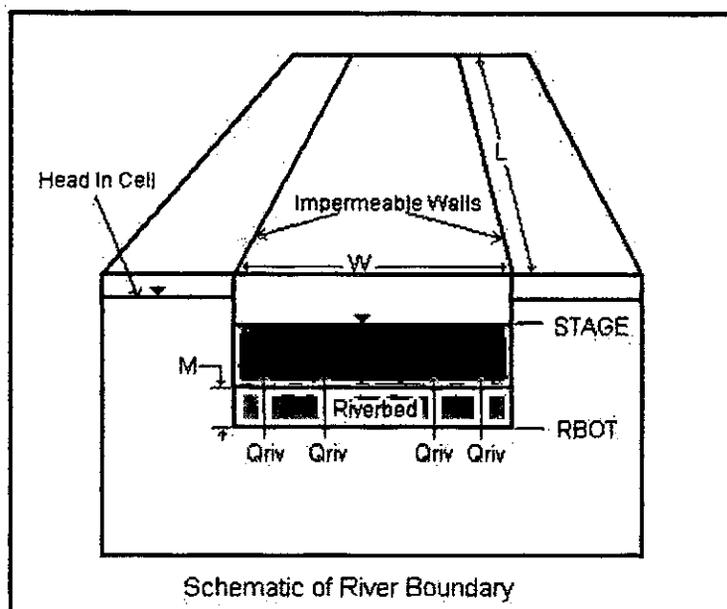
En este caso, VMODFLOW tiene en cuenta los siguientes parámetros:

L = Longitud del cauce en la celda

W = Ancho del cauce en la celda

M = Espesor del lecho del cauce

K = conductividad hidráulica del lecho del cauce



Esquema 6-1 Condición de frontera de río.

Un valor importante en la modelación con VMODFLOW es el valor de conductancia para los lechos de ríos, lagos y en general cuerpos de agua superficial a modelar. El valor de la conductancia en este caso se encuentra entre $70 \text{ m}^2/\text{día}$ y $200 \text{ m}^2/\text{día}$ y se obtuvo a partir de la calibración del modelo, teniendo en cuenta condiciones de flujo estacionario y hasta alcanzar un nivel freático similar al observado en las exploraciones realizadas en la zona.

6.2.5 Drenes

La condición de frontera Dren está diseñada para simular los efectos de elementos tales como drenes para agricultura, los cuales remueven agua del acuífero a una tasa proporcional entre la diferencia de cabezas entre el acuífero y alguna cabeza o altura fija dada por el dren. Esta condición supone que el

dreno no tiene efecto en la cabeza del acuífero una vez ésta se encuentre por debajo del nivel del dren.

En este caso la condición de frontera se utiliza para modelar el efecto que tiene el túnel dentro del macizo rocoso, el cual es similar al de un dren. El dren se ubicó sobre el alineamiento y la altura en la cual se va a construir el túnel.

La conductividad utilizada para los drenes fue de 10 m²/día mientras se realiza la excavación de cada tramo de túnel; una vez finalizada la excavación del tramo y comienzo del siguiente, la conductividad disminuye a 5 m²/día con el fin de modelar el revestimiento definitivo y el sistema de impermeabilización del túnel.

6.3 PROPIEDADES HIDRÁULICAS

Las propiedades hidráulicas utilizadas en el análisis hidrogeológico se tomaron a partir de los ensayos realizados sobre las muestras recuperadas de las perforaciones ejecutadas en la zona, pruebas de permeabilidad de campo (Lugeon y Lefranc) y literatura técnica.

Los parámetros de conductividad utilizados para los diferentes materiales se presentan en la Tabla 6-1

Tabla 6-1. Propiedades hidráulicas de los materiales

Material	Conductividad (m/s)	Almacenamiento específico (m ⁻¹)	Sy
Suelo derivado de anfibolita	6,2 E -7	3 E -4	0,17
Suelo derivado del Stock de Samarcanda	2,3 E -6	3,2 E -4	0,3
Roca Anfibolita	6,4 E -8	5,7 E -7	0,04
Roca Stock de Samarcanda	9,8 E -9	5,7 E -7	0,04
Zonas de falla	8,5 E -7	3 E -4	0,2

6.4 DISCRETIZACIÓN TEMPORAL

Con el fin de incorporar en el modelo tanto el efecto de la construcción del túnel como las condiciones bajo las cuales se realizará el avance de éste, se calcularon los tiempos de avance para tramos 500 m de longitud. La tasa de avance utilizada para este cálculo fue de 200 m por mes. Además también se

modelaron las condiciones del sistema a 10, 20, 50 y 100 años después de comenzada la construcción del túnel.

En la Tabla 6-2 y la Tabla 6-3 se presenta la discretización temporal del modelo.

Tabla 6-2. Discretización temporal frente occidental

Tramo	Abscisa		Tiempo inicial (días)	Tiempo final (días)
1	10+330	10+830	0	75
			75	36500
2	10+830	11+330	0	75
			75	150
			150	36500
3	11+330	11+830	0	150
			150	225
			225	36500
4	11+830	12+330	0	225
			225	300
			300	36500
5	12+330	12+830	0	300
			300	375
			375	36500
6	12+830	13+330	0	375
			375	450
			450	36500
7	13+330	13+830	0	450
			450	525
			525	36500
8	13+830	14+455	0	525
			525	600
			600	36500

Tabla 6-3. Discretización temporal frente oriental

Tramo	Abscisa		Tiempo inicial (días)	Tiempo final (días)
9	14+445	15+017	0	525
			525	600
			600	36500

Tramo	Abscisa		Tiempo inicial (días)	Tiempo final (días)
10	15+017	15+517	0	450
			450	525
			525	36500
11	15+517	16+017	0	375
			375	450
			450	36500
12	16+017	16+517	0	300
			300	375
			375	36500
13	16+517	17+017	0	225
			225	300
			300	36500
14	17+017	17+517	0	150
			150	225
			225	36500
15	17+517	18+017	0	75
			75	150
			150	36500
16	18+017	18+517	0	75
			75	36500

6.5 SIMULACIONES Y RESULTADOS

6.5.1 Estado estacionario

La primera simulación corresponde al estado estacionario. Esta simulación tiene el fin de calibrar el modelo, tener una primera apreciación del flujo de agua subterránea en la zona y obtener la disposición de las cabezas piezométricas iniciales para el modelo de estado transitorio.

Este modelo estacionario sirve para efectuar la calibración aproximada variando las conductancias de los ríos, fijando la infiltración y la conductividad hidráulica definida para cada uno de los materiales de tal forma que no se obtuviera zonas inundadas ni tampoco completamente secas, sino niveles aproximadamente similares a los observados en la exploración de campo realizada en la zona.

En las Figuras 3 y 4 se presentan los niveles piezométricos y la profundidad del nivel freático de esta primer simulación.

6.5.2 Estado transitorio – dos frentes de avance

Una vez efectuada la simulación en estado estacionario, se procedió a simular el avance del túnel descrito en el Numeral 6.4. Los resultados obtenidos son: la distribución tridimensional de cabezas piezométricas, con sus variaciones en función del tiempo, y los caudales que afloran en el túnel. También se obtienen otros parámetros como por ejemplo magnitud y dirección de velocidades de flujo.

6.5.2.1 Cabezas Piezométricas

Los períodos de tiempo para la simulación se escogieron de acuerdo al avance del túnel, los cuales se presentan en la Tabla 6-2 y Tabla 6-3. Se incluyen también períodos de simulación a los 10, 20, 50 y 100 años desde el inicio de la construcción. Para tener una buena aproximación numérica en estado transitorio cada período de simulación a su vez se subdivide en pasos (intervalos) de tiempo.

Los resultados obtenidos a partir de la modelación se presentan en las figuras 5 a 11, correspondientes a los tiempos de simulación 150 días, 300 días, 450 días, 600 días, 10 años, 20 años y 50 años, respectivamente. En estas figuras se presenta la distribución de cabezas en un corte del modelo (la fila 85 $Y=1178520E$); en donde se puede observar las diferencias de cabezas piezométricas y la distribución de velocidades a lo largo del tiempo simulado.

En cada una de las figuras se aprecia el efecto del avance del túnel sobre los niveles piezométricos; sin embargo, la estabilización de este efecto se alcanza rápidamente mostrando que a los 20 años los niveles piezométricos permanecen constantes.

6.5.2.2 Abatimientos

Es muy útil observar la distribución de abatimientos (descensos de la cabeza piezométrica). En las figuras 12 a 17 se presentan los descensos en metros para los mismos tiempos de 150, 300, 450, 600 días, 10 y 20 años de simulación, graficadas en la capa del modelo en donde se tiene la mayor parte

del túnel. Se observa la propagación de los cambios de cabeza 0 presión en función del tiempo.

6.5.2.3 Caudales de infiltración en el Túnel. Impacto sobre la construcción

Para cuantificar el caudal que se infiltra en el túnel a medida que se avanza en su construcción, y después de haberlo terminado, se establecieron zonas de balance de agua en cada uno de los tramos especificados anteriormente. Estas zonas con sus correspondientes caudales se presentan en la Tabla 6-4 y Tabla 6-5. Hay que tener en cuenta que, dependiendo del tiempo, cada una de las zonas tiene un valor diferente de conductancia asociado a la instalación o no del revestimiento. Se puede observar que los mayores aportes de caudal ocurren entre las abscisas 10+830 – 11+330 (falla de cabalgamiento), 12+830 – 13+330 (falla Santa Elena) y 14+445 – 15+017 (parte media del túnel).

Tabla 6-4. Detalle de los caudales infiltrados para el frente occidental

Tramo	Abscisa		Tiempo inicial (días)	Tiempo final (días)	Conductancia (m ² /día)	Caudal (m ³ /día)
1	10330	10830	0	75	10	520.42
			75	36500	5	399.27
2	10830	11330	0	75	0	0
			75	150	10	1961.4
			150	36500	5	1398.8
3	11330	11830	0	150	0	0
			150	225	10	1130.1
			225	36500	5	832.68
4	11830	12330	0	225	0	0
			225	300	10	1321.8
			300	36500	5	1186.3
5	12330	12830	0	300	0	0
			300	375	10	1300
			375	36500	5	1228.9
6	12830	13330	0	375	0	0
			375	450	10	2650
			450	36500	5	1965.9
7	13330	13830	0	450	0	0
			450	525	10	1327.1
			525	36500	5	1227.5
8	13830	14455	0	525	0	0
			525	600	10	1789.3
			600	36500	5	1708.9

Tabla 6-5. Detalle de los caudales infiltrados para el frente oriental

Tramo	Abscisa		Tiempo inicial (días)	Tiempo final (días)	Conductancia (m ² /día)	Caudal (m ³ /día)
9	14445	15017	0	525	0	0
			525	600	10	3760.4
			600	36500	5	2582.2
10	15017	15517	0	450	0	0
			450	525	10	1248.003
			525	36500	5	900.06
11	15517	16017	0	375	0	0
			375	450	10	208.992
			450	36500	5	174.4
12	16017	16517	0	300	0	0
			300	375	10	167.986
			375	36500	5	141.13
13	16517	17017	0	225	0	0
			225	300	10	655.018
			300	36500	5	468.03
14	17017	17517	0	150	0	0
			150	225	10	1456.792
			225	36500	5	964.49
15	17517	18017	0	75	0	0
			75	150	10	584.933
			150	36500	5	474.31
16	18017	18517	0	75	10	339.39
			75	36500	5	296.67

En la figura 19 está graficado el caudal total de infiltración en el túnel en función del tiempo. Se puede observar que el máximo caudal es del orden de los 185 l/s, el cual se obtiene hacia el final de la construcción del túnel. Después va disminuyendo hasta valores de aproximadamente 150 l/s.

Estos caudales de infiltración serán los máximos que la construcción del túnel inducirá hacia el mismo. El caudal acumulado aumenta a medida que se avanza en el tiempo; sin embargo, cada uno de los tramos disminuye ya que se está considerando un control del flujo del tramo construido inmediatamente anterior asociado a la instalación del sistema de impermeabilización y del revestimiento definitivo. Este caudal corresponde, durante el período de construcción, al caudal a manejar y durante la operación al caudal que deben manejar los drenes o el sistema de drenaje establecido para el túnel.

6.5.2.4 Balance Regional de Agua. Impacto sobre el Medio Ambiente

En toda el área simulada (área del Túnel) el modelo arroja un balance regional de agua, el cual se presenta en las figuras 22 a 25 para 75 días, 10, 20 y 50 años respectivamente. Mediante este balance se puede observar el efecto de todo el túnel sobre la hidrología superficial, y permite determinar el impacto que se genera.

Este impacto se cuantifica por el aumento de infiltración inducida a partir de la hidrología superficial (river leakage in), consistente en ríos y manantiales, y por la disminución del aporte del agua subterránea hacia cauces y manantiales (river leakage out). Se puede observar que es más sensible la disminución en el flujo base que el aumento de infiltración inducida. Se puede observar que el impacto a largo plazo consiste en una disminución entre 80 y 85 l/s, tomando los resultados arrojados por el modelo para 10 y 50 años respectivamente.

6.6 CONCLUSIONES

De acuerdo a los resultados del presente estudio se tienen las siguientes conclusiones:

- Los caudales máximos inducidos hacia el túnel están entre 150 a 185 l/s.
- La disminución efectiva de caudales de la hidrología superficial (ríos y manantiales), consistente en disminución del flujo base entre 80 y 85 l/s.
- Los descensos máximos de presión (abatimientos) se presentan hacia el centro del túnel, con valores máximos entre 140 y 180 m (para t=36500 días).
- Los descensos máximos de la tabla de agua se presentan hacia el centro del túnel que también corresponde a la zona de mayor techo, sector de cerro verde, con valores que están entre 50 y 60 m, el descenso en la zona promedio a lo largo del alineamiento del túnel se encuentra entre 20 y 40 m. en las figuras 18 a 20 se presenta la variación de la tabla de agua para 5, 50 y 100 años respectivamente.
- El suelo del área en estudio, por encima del nivel freático, retiene una cantidad apreciable de agua dada su alta porosidad, gran superficie de contacto que tiene las partículas de suelo fino y a la suave morfología del terreno. Esto hace que se mantengan altas las condiciones locales de humedad cerca de la superficie (suelo de uso agroindustrial). Además le

favorece que la precipitación promedio es de 2200 mm/año mucho mayor a la evapotranspiración de 714 mm/año.

6.7 RECOMENDACIONES

- Es fundamental conocer la tabla de agua y las condiciones geohidráulicas a lo largo del área de influencia del túnel, a varias profundidades, la cual se puede acometer mediante la instalación de una red de pozos de monitoreo o de observación y mediante el uso y actualización del modelo que aquí se presenta. Se deben efectuar, adicional a las pruebas de Lugeon, pruebas de conductividad hidráulica y de almacenamiento. Así mismo estos pozos servirán para monitorear los descensos de presión durante la construcción y uso del túnel.
- Es importante que los pozos de monitoreo o piezómetros de observación se construyan con filtros y sellos de bentonita adecuados, para poder hacer pruebas hidráulicas confiables.
- Previo a la construcción del túnel y a lo largo de su trazado se deben realizar ensayos de humedad sobre varias columnas y/o perfiles de suelo, cada 0,5m en los primeros 3,0 m de profundidad. Este procedimiento debe repetirse para diferentes regimenes de lluvia. Esta información permitirá establecer diferencias (y cuantificarlas) entre las condiciones actuales del suelo de uso agroindustrial con las generadas por la construcción y operación del túnel.
- Los modelos que aquí se presentan son dinámicos en el tiempo, aún no se han calibrado en régimen transitorio, sólo en forma aproximada en estado estacionario; de manera que se recomienda introducir los cambios necesarios a medida que se tenga más información.
- En relación con la eventual variación de los caudales de las corrientes ubicadas en la zona de influencia del túnel de Santa Elena, se recomienda establecer una red de estaciones de aforo en varios sitios estratégicos. Algunos de estos sitios podrían coincidir con las estaciones de campo donde se estimaron caudales para este trabajo. Sin embargo, dichas estaciones deberán ser construidas según normas técnicas (sección regular en concreto, mira, molinete, etc), de tal forma que se permita su medida sistemática (con frecuencia no superior a dos semanas), incluyendo varios períodos climáticos. Finalmente, cuando estas condiciones técnicas estén listas se deberá hacer una medida inicial de referencia. Las estimaciones de caudales acá presentados no cumplen como línea base.

7 REFERENCIAS

- SCHLUMBERGER WATER SERVICES. Visual MODFLOW Premium 2009, User's Manual. Waterloo, Canada.
- CASTANY G. Tratado Práctico de las Aguas Subterráneas. Ediciones Omega S.A. Barcelona, España.

ANEXO A - FIGURAS

Figura 1. Imagen de la planta del modelo	1
Figura 2. Perfil del modelo.....	2
Figura 3. Profundidad del nivel freático obtenida después de la modelación en estado estacionario (condición inicial para el estado transitorio).....	4
Figura 4. Niveles piezométricos, Modelación estado estacionario	5
Figura 5. Niveles piezométricos, 150 días después de comenzada la excavación	6
Figura 6. Niveles piezométricos, 300 días después de comenzada la excavación	7
Figura 7. Niveles piezométricos, 450 días después de comenzada la excavación	7
Figura 8. Niveles piezométricos, 600 días después de comenzada la excavación	8
Figura 9. Niveles piezométricos, 10 años después de comenzada la excavación	9
Figura 10. Niveles piezométricos, 20 años después de comenzada la excavación	9
Figura 11. Niveles piezométricos, 50 años después de comenzada la excavación	10
Figura 12. Abatimiento, 150 días después de comenzada la excavación	11
Figura 13. Abatimiento, 300 días después de comenzada la excavación	12
Figura 14. Abatimiento, 450 días después de comenzada la excavación	13
Figura 15. Abatimiento, 600 días después de comenzada la excavación	14
Figura 16. Abatimiento, 10 años después de comenzada la excavación	15

Figura 17. Abatimiento, 20 años después de comenzada la excavación	16
Figura 18. Variación de la posición del nivel freático 5 años después de iniciada la excavación	17
Figura 19. Variación de la posición del nivel freático 50 años después de iniciada la excavación.....	18
Figura 20. Variación de la posición del nivel freático 100 años después de iniciada la excavación.....	19
Figura 21. Caudal de infiltración en el túnel en función del tiempo	20
Figura 22. Balance regional de agua 75 días después de iniciada la excavación.	21
Figura 23. Balance regional de agua 10 años después de iniciada la excavación.	22
Figura 24. Balance regional de agua 20 años después de iniciada la excavación.	23
Figura 25. Balance regional de agua 50 años después de iniciada la excavación.	24

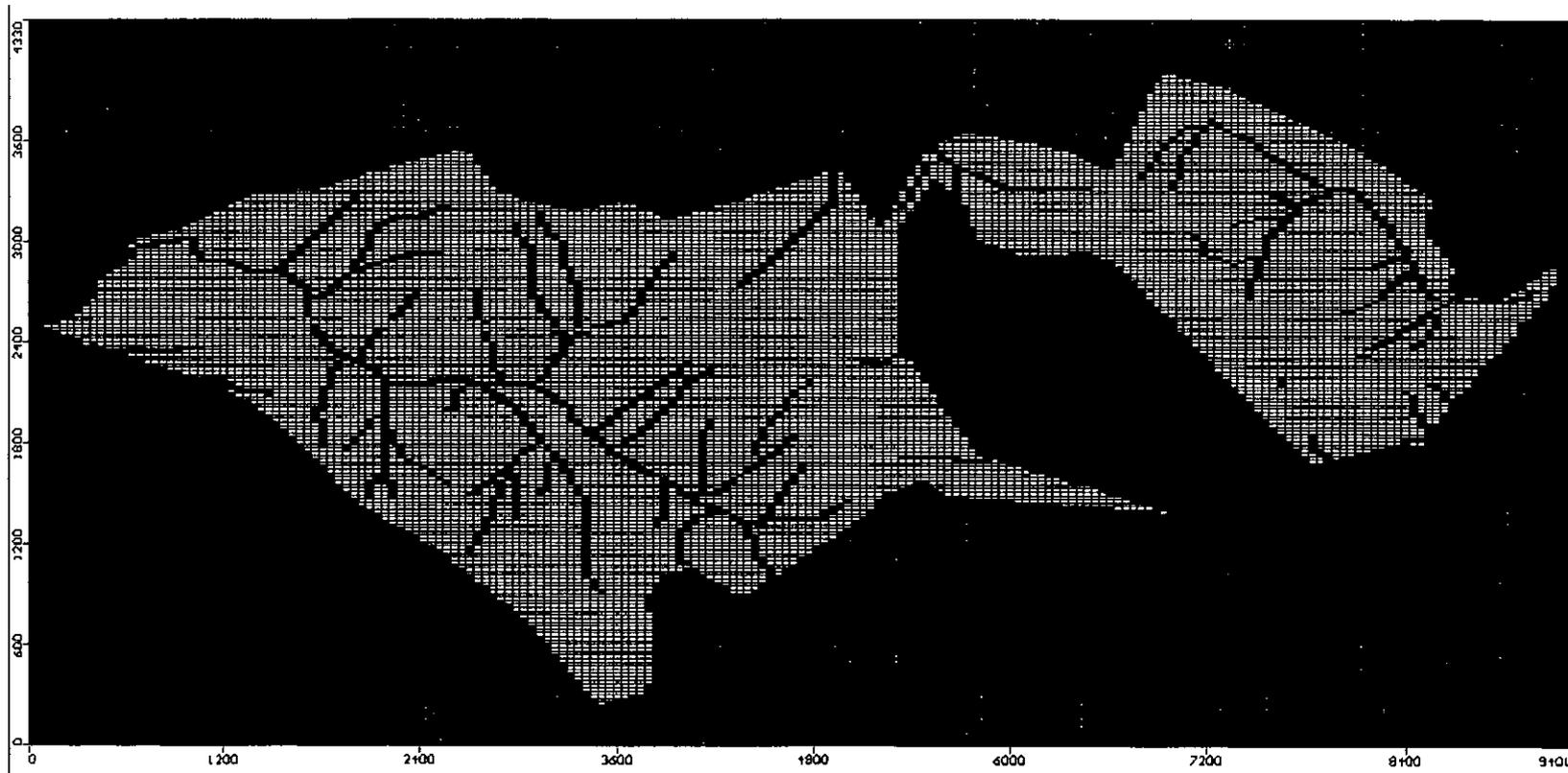


Figura 1. Imagen de la planta del modelo

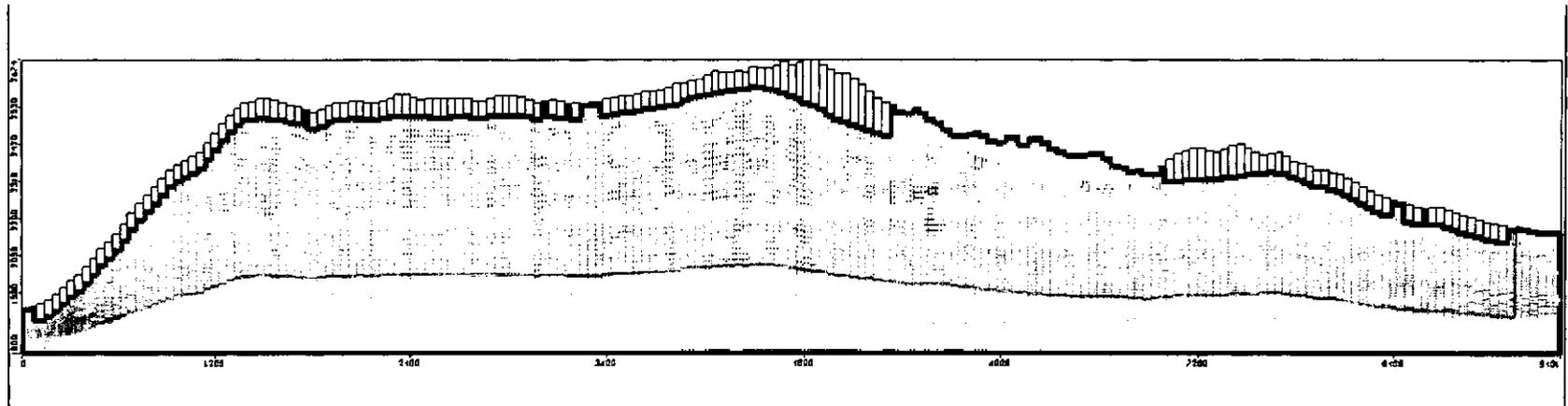


Figura 2. Perfil del modelo

CONVENCIONES

-  Suelo Residual Stock de Samarcanda
-  Suelo Residual de Anfibolita
-  Anfibolita
-  Stock de Samarcanda
-  Zona de Falla

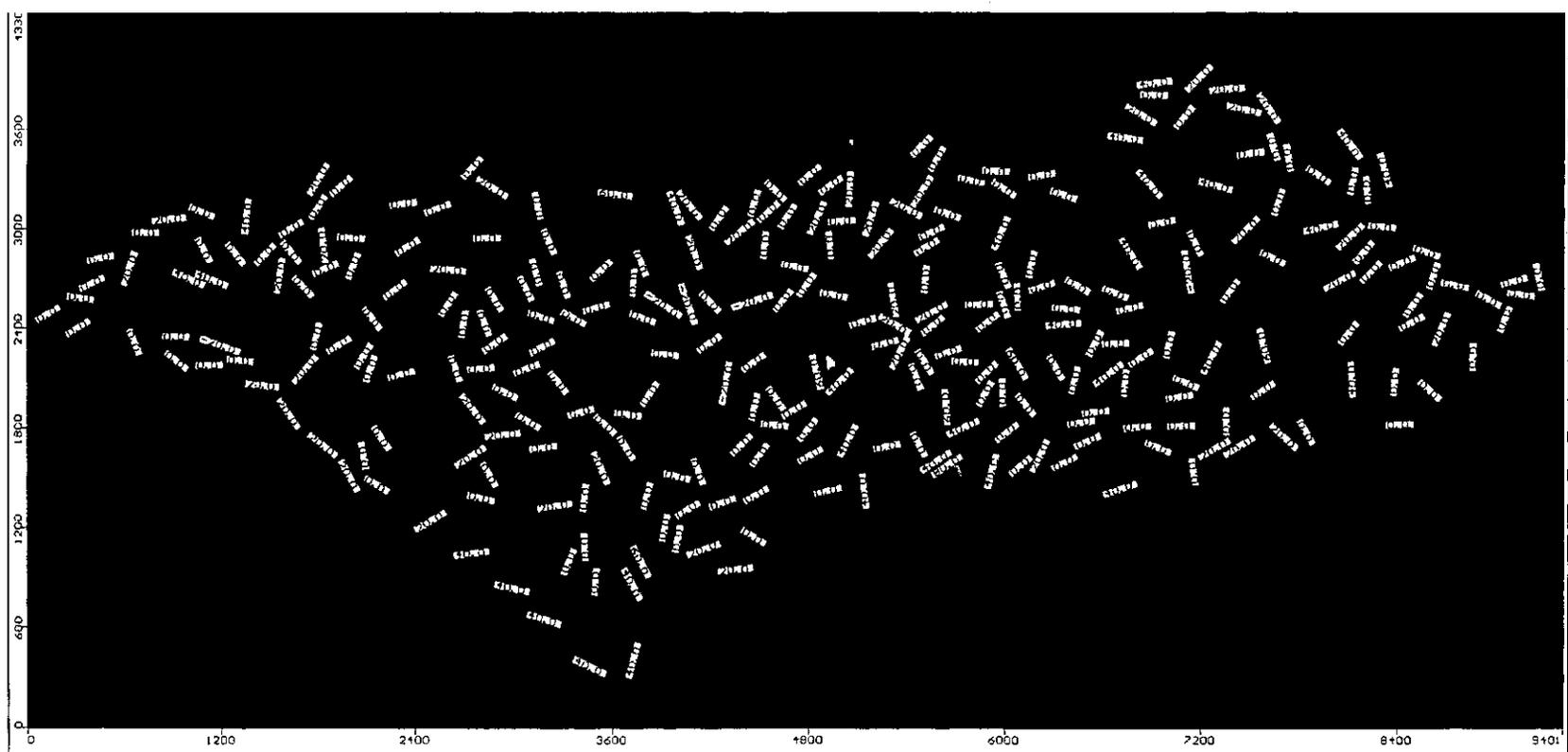


Figura 3. Profundidad del nivel freático obtenida después de la modelación en estado estacionario (condición inicial para el estado transitorio)

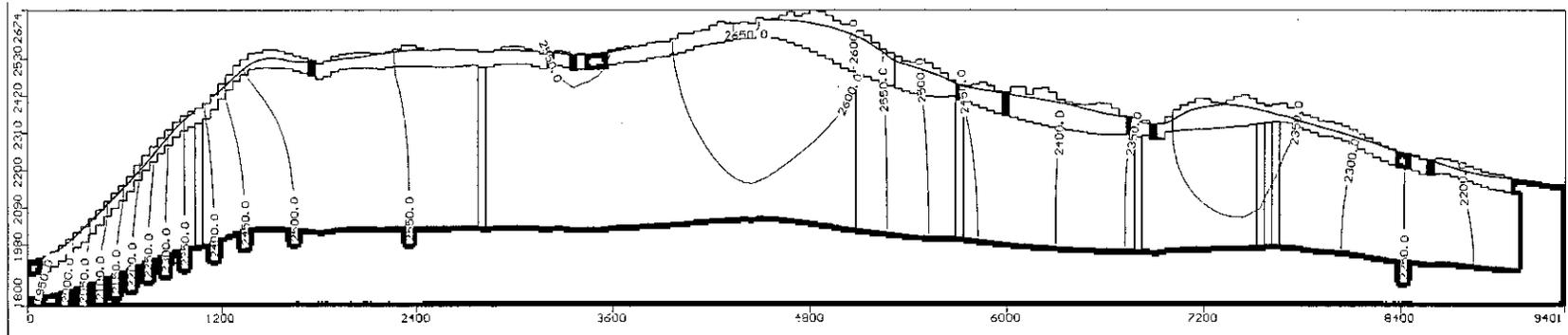


Figura 4. Niveles piezométricos, Modelación estado estacionario

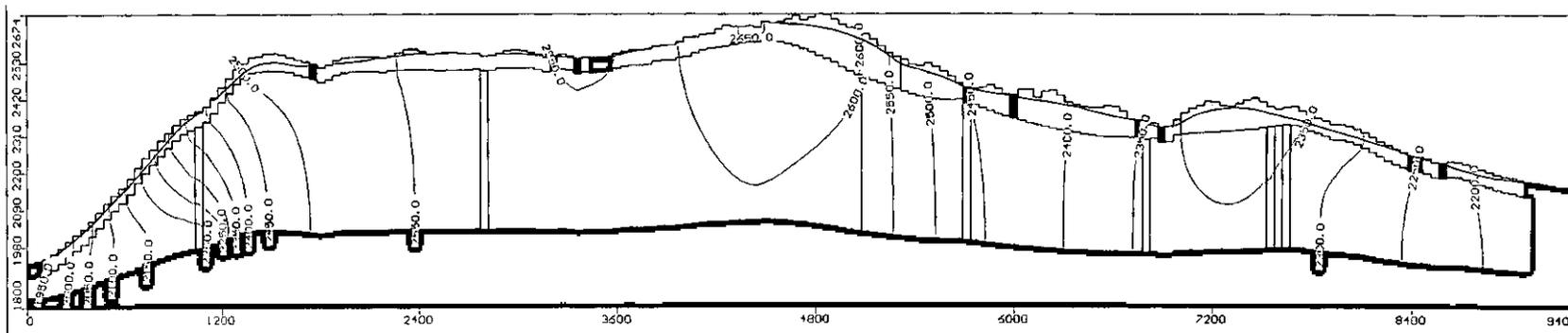


Figura 5. Niveles piezométricos, 150 días después de comenzada la excavación

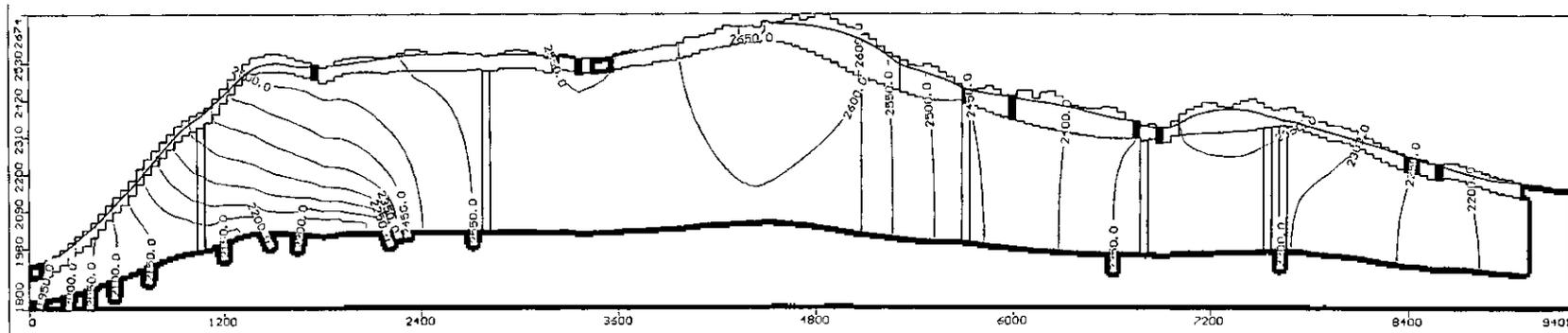


Figura 6. Niveles piezométricos, 300 días después de comenzada la excavación

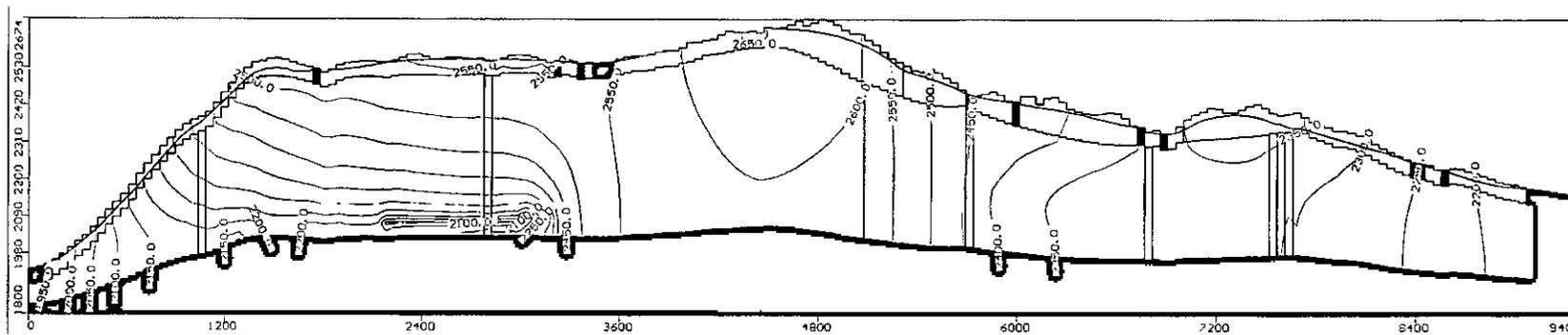


Figura 7. Niveles piezométricos, 450 días después de comenzada la excavación

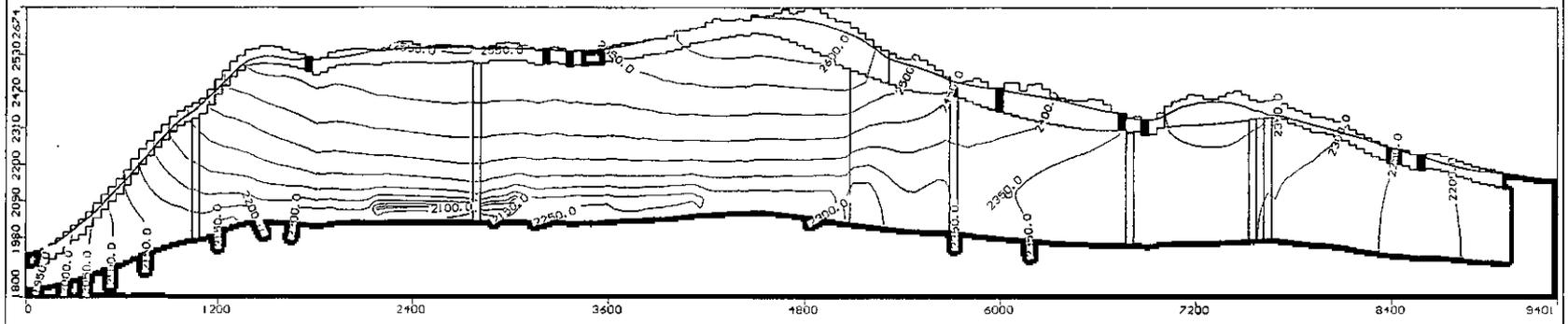


Figura 8. Niveles piezométricos, 600 días después de comenzada la excavación

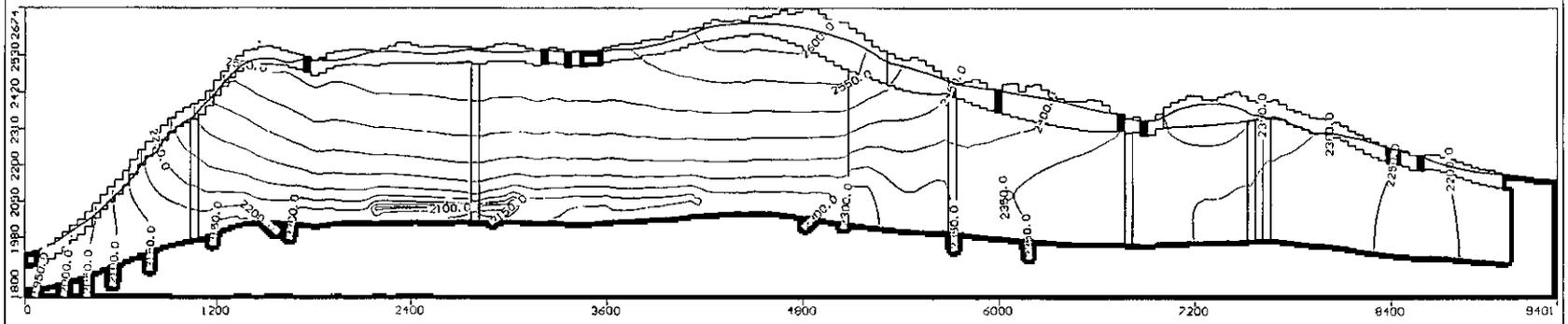


Figura 9. Niveles piezométricos, 10 años después de comenzada la excavación

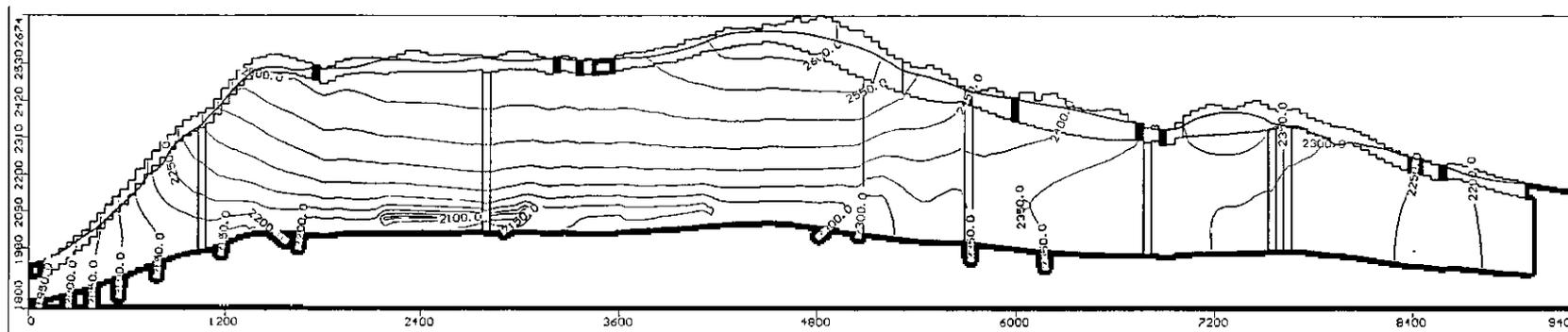


Figura 10. Niveles piezométricos, 20 años después de comenzada la excavación

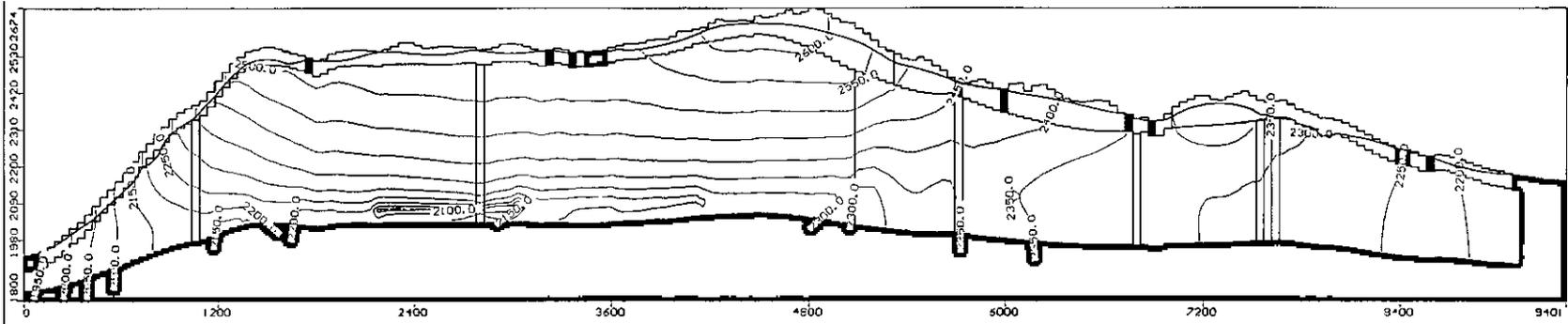


Figura 11. Niveles piezométricos, 50 años después de comenzada la excavación

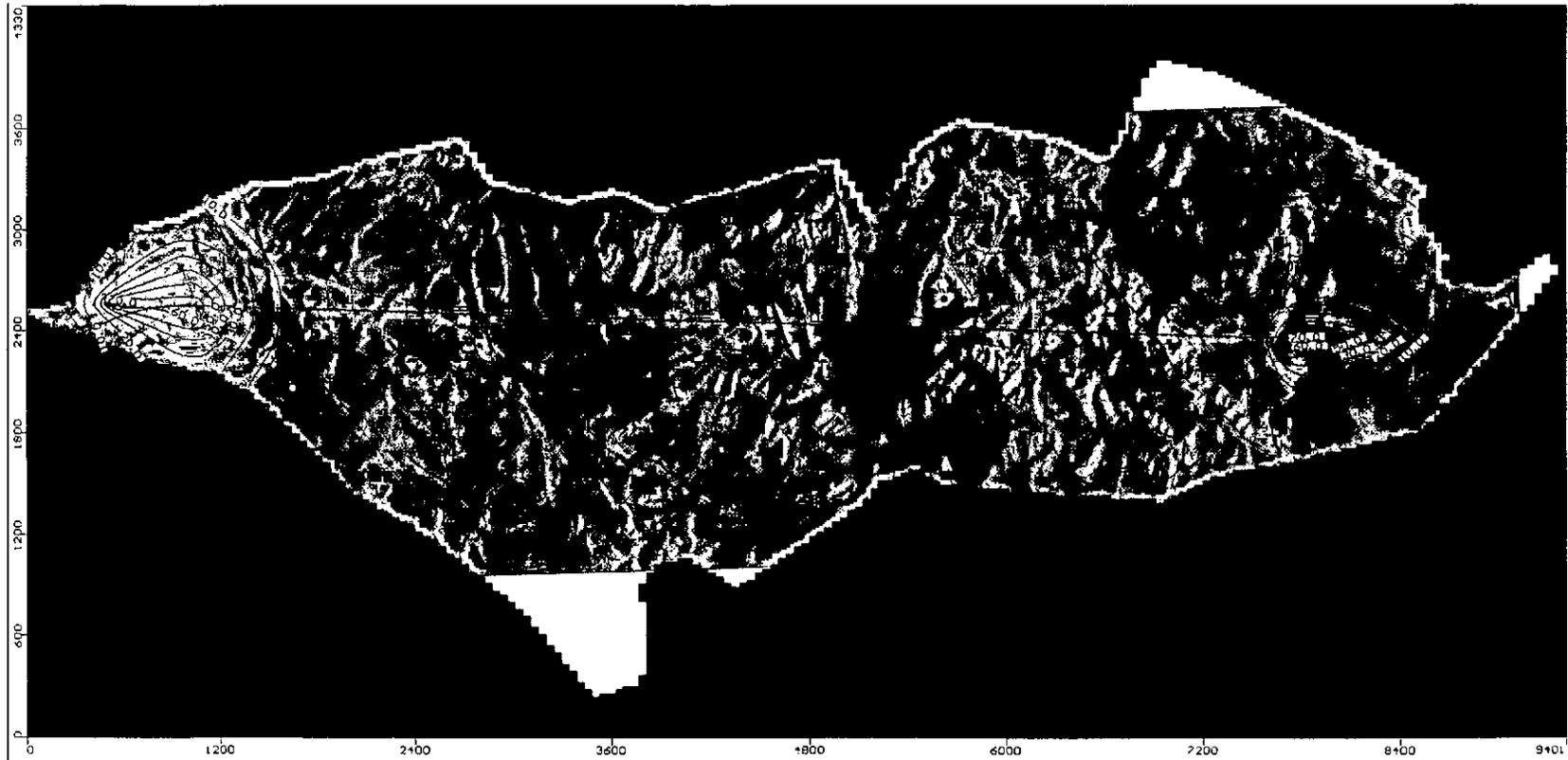


Figura 12. Abatimiento, 150 días después de comenzada la excavación

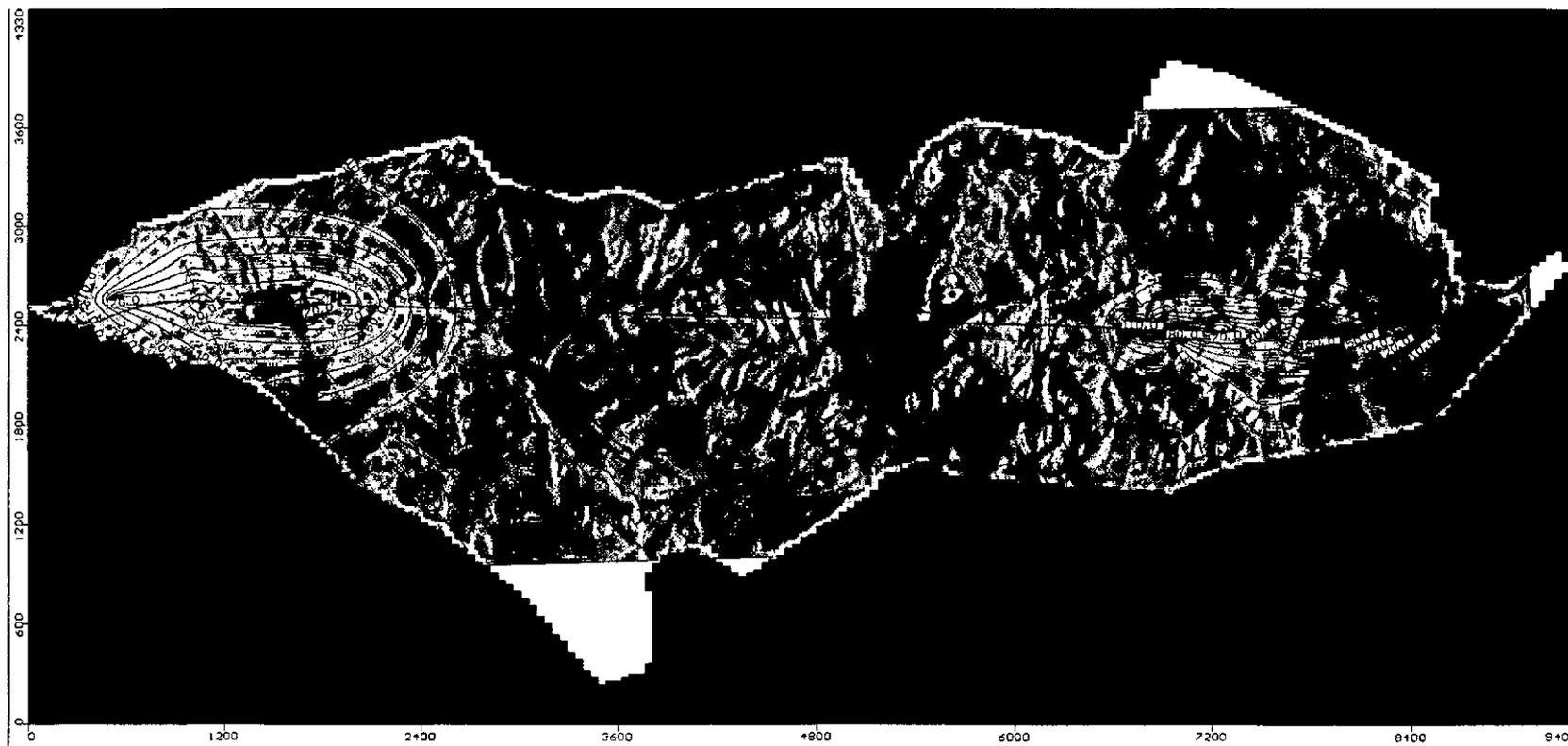


Figura 13. Abatimiento, 300 días después de comenzada la excavación

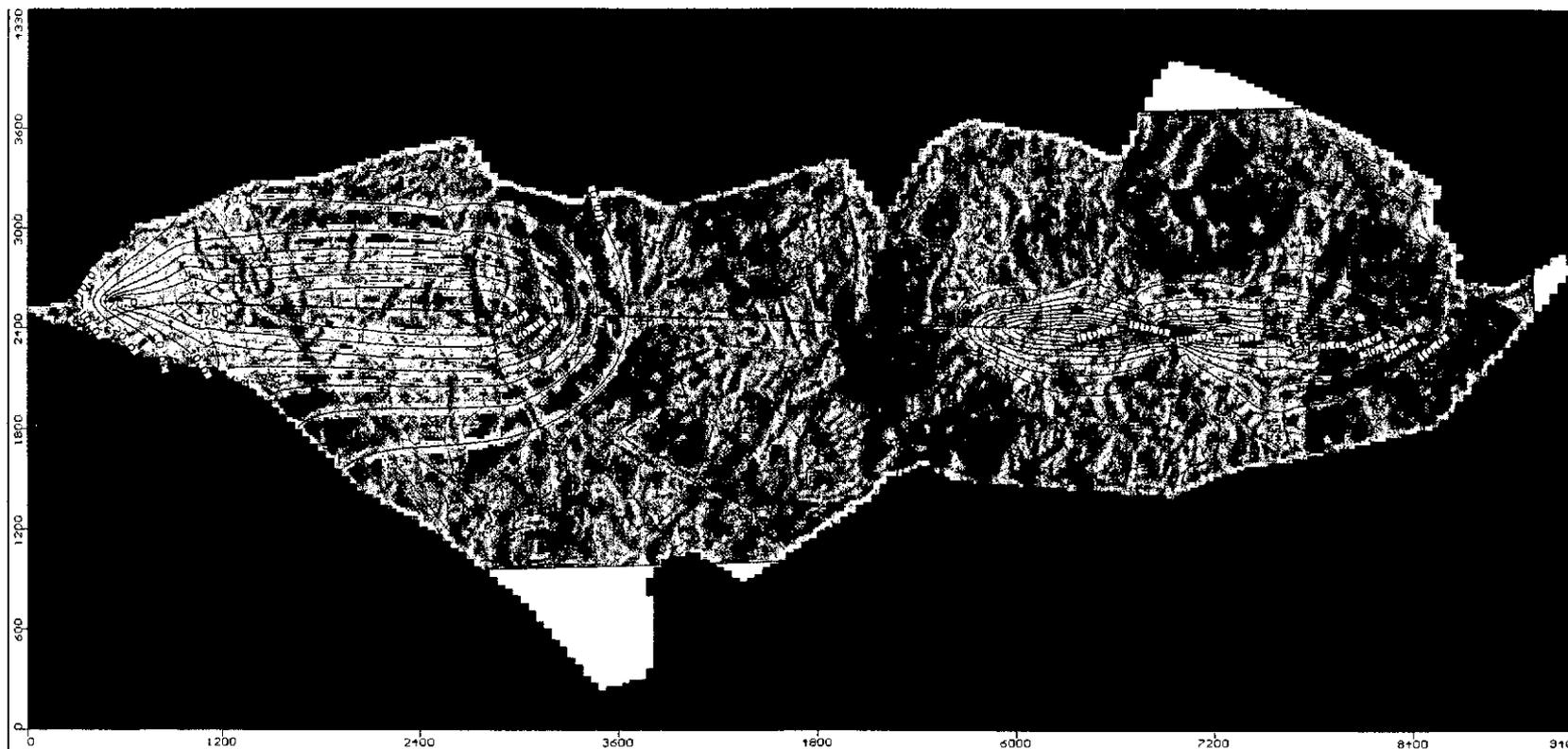


Figura 14. Abatimiento, 450 días después de comenzada la excavación

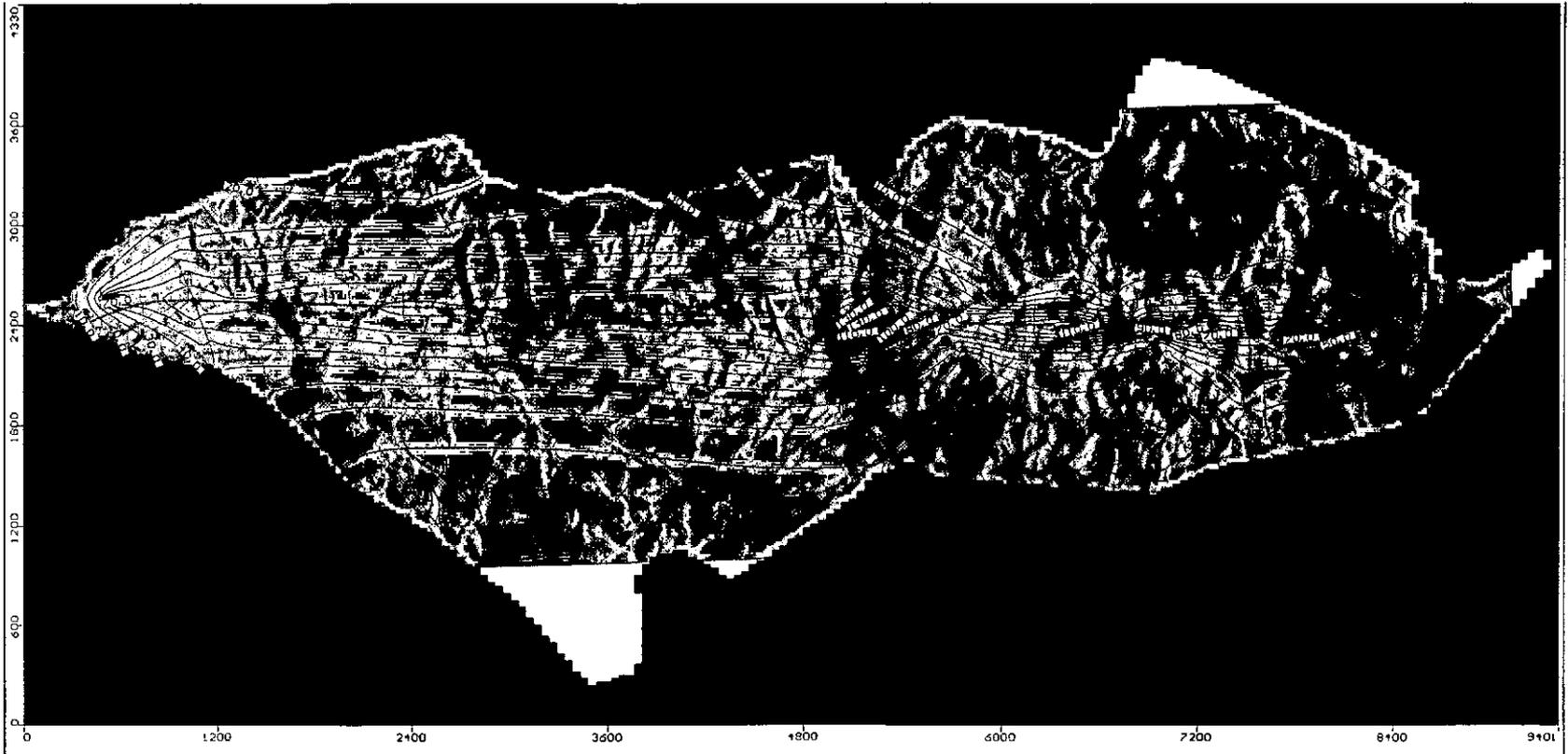


Figura 15. Abatimiento, 600 días después de comenzada la excavación

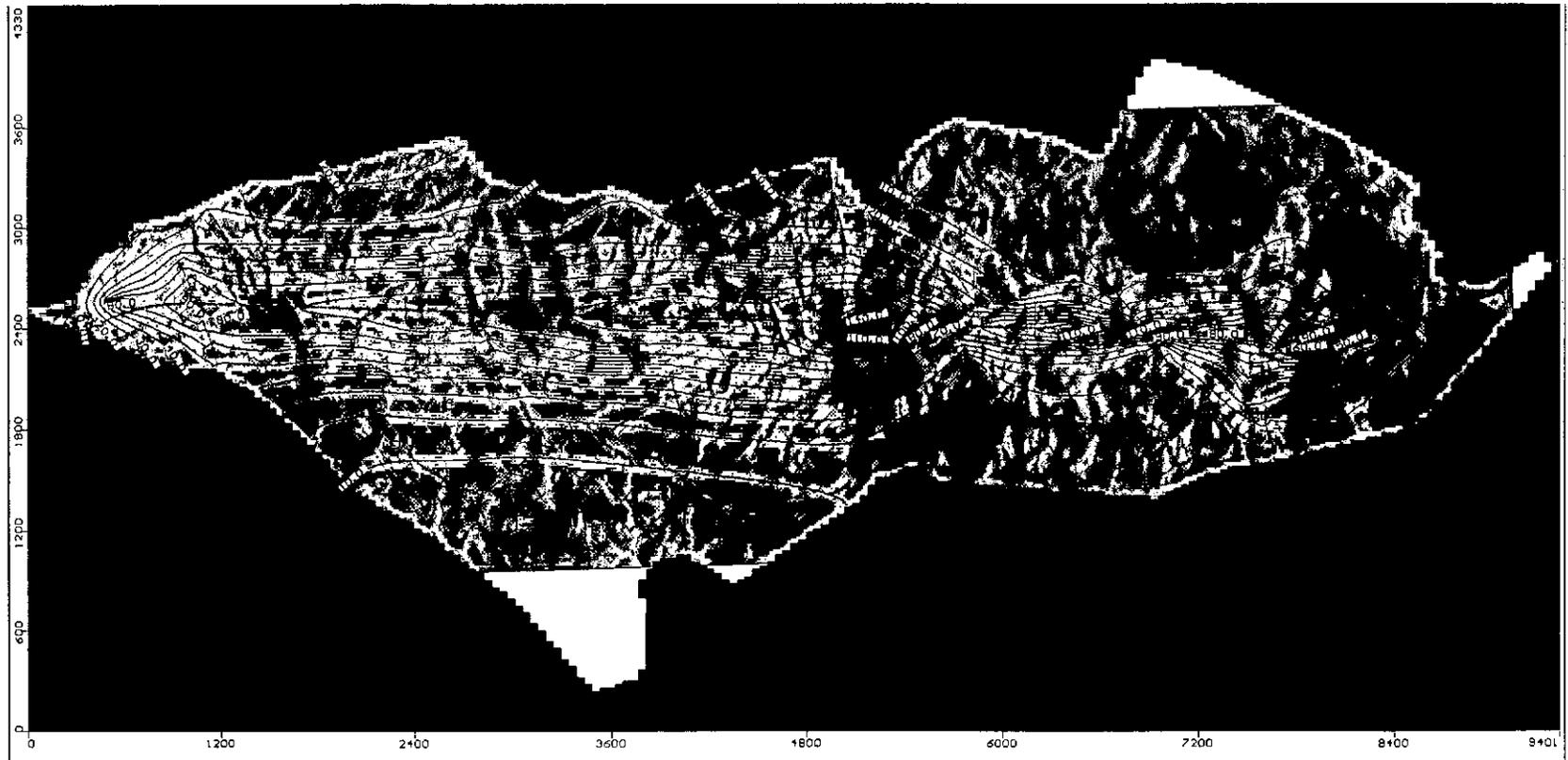


Figura 16. Abatimiento, 10 años después de comenzada la excavación

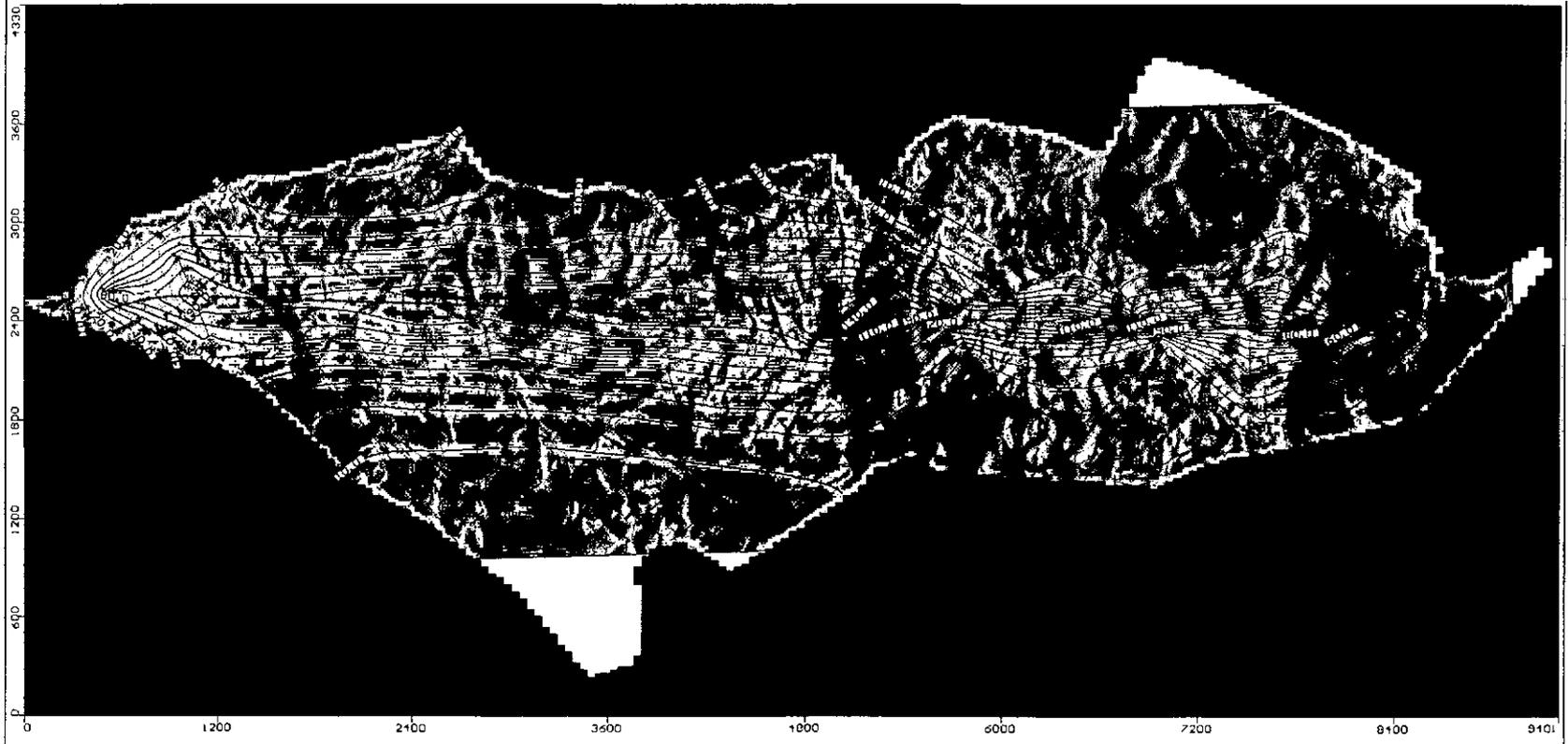


Figura 17. Abatimiento, 20 años después de comenzada la excavación

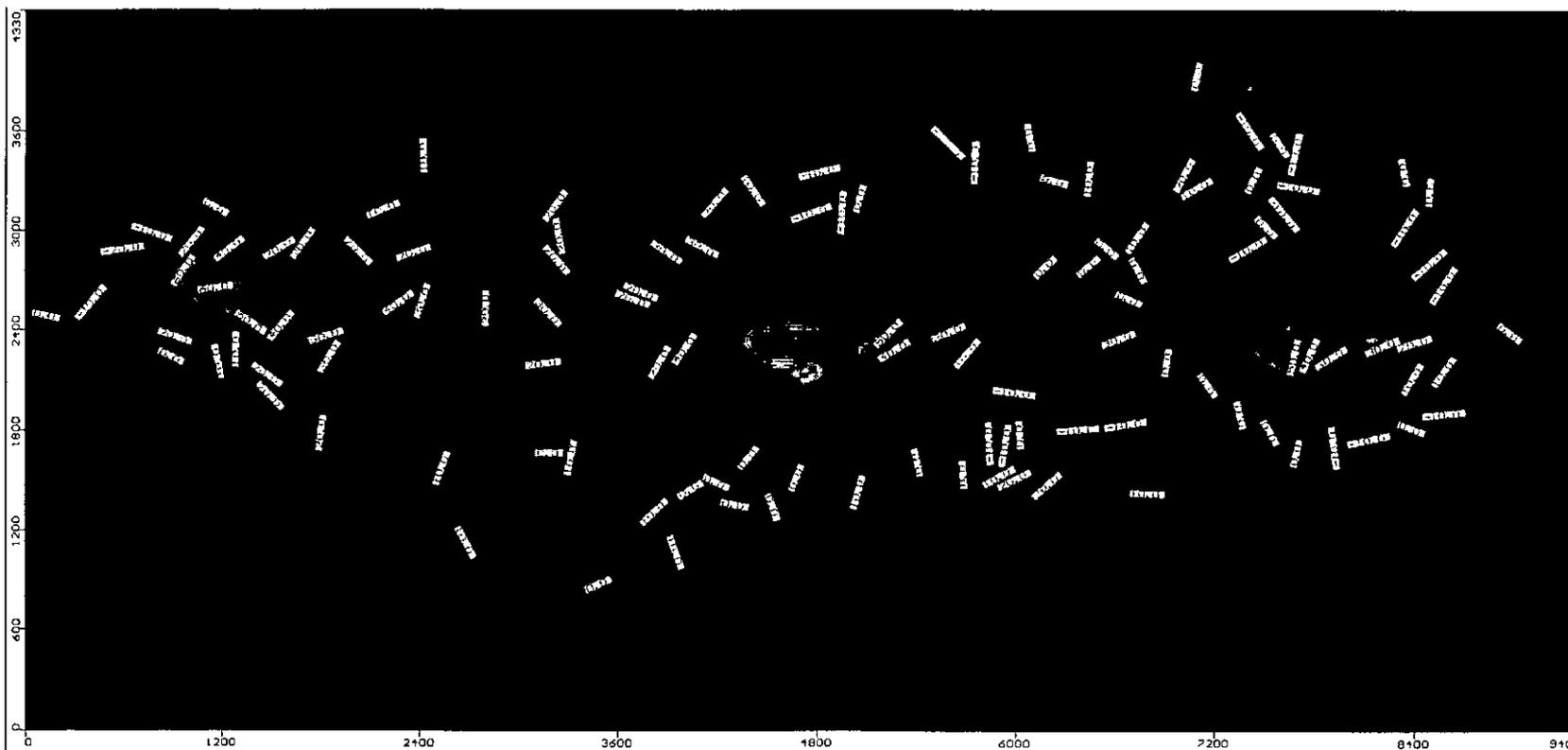


Figura 18. Variación de la posición del nivel freático 5 años después de iniciada la excavación

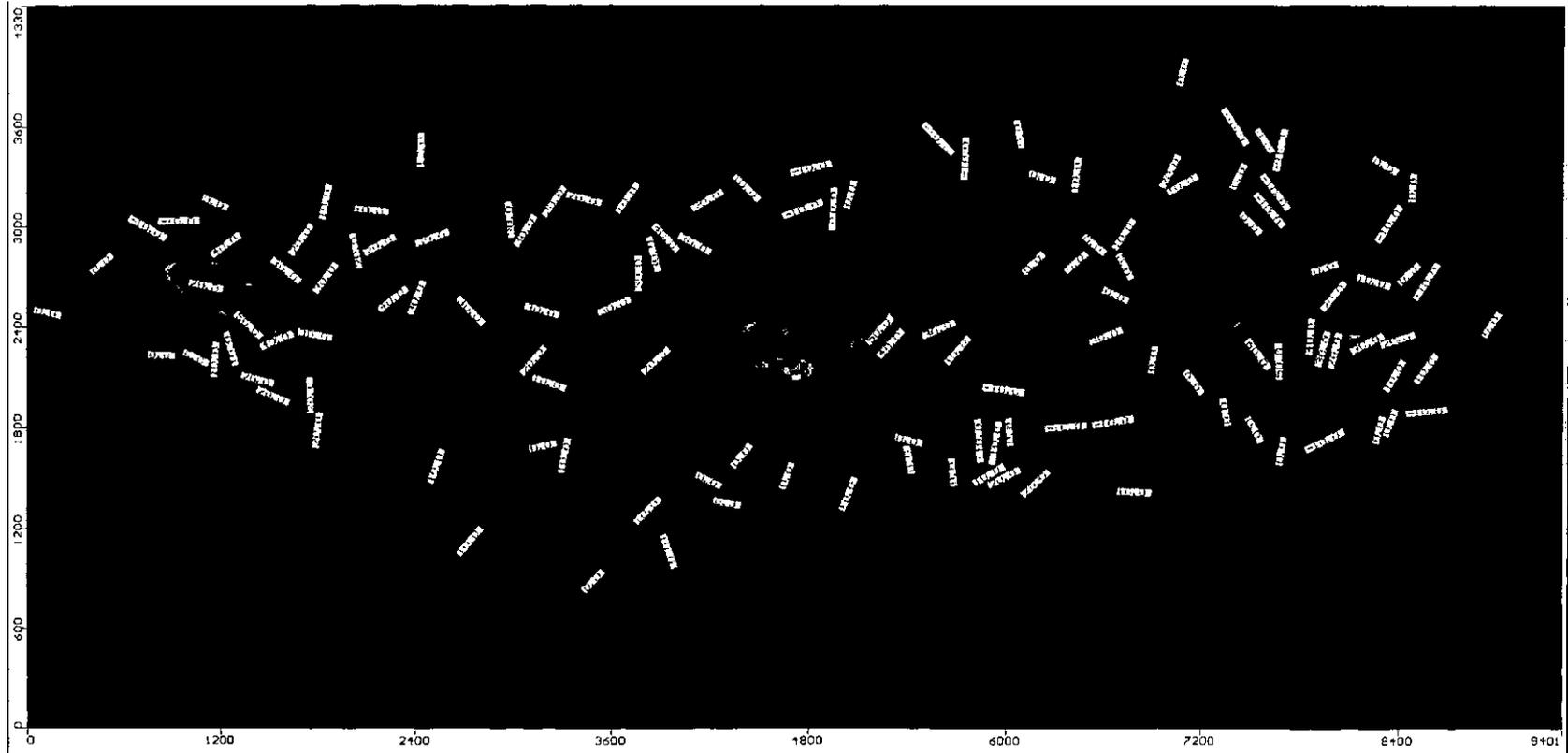


Figura 19. Variación de la posición del nivel freático 50 años después de iniciada la excavación

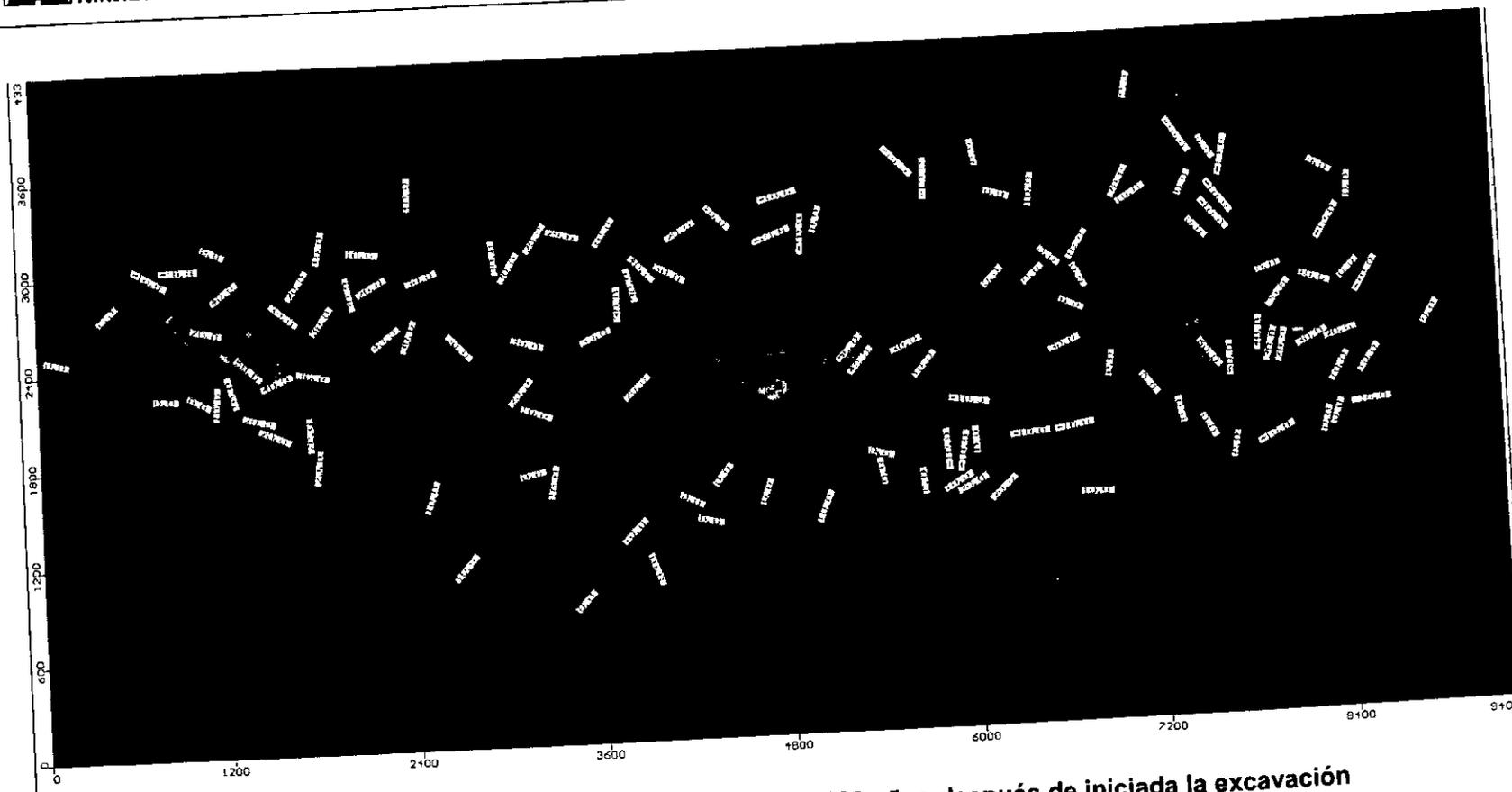


Figura 20. Variación de la posición del nivel freático 100 años después de iniciada la excavación

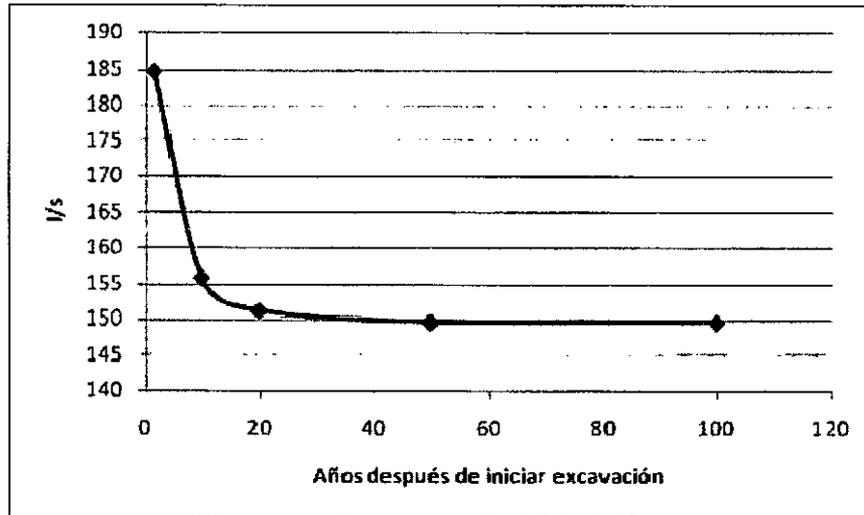


Figura 21. Caudal de infiltración en el túnel en función del tiempo

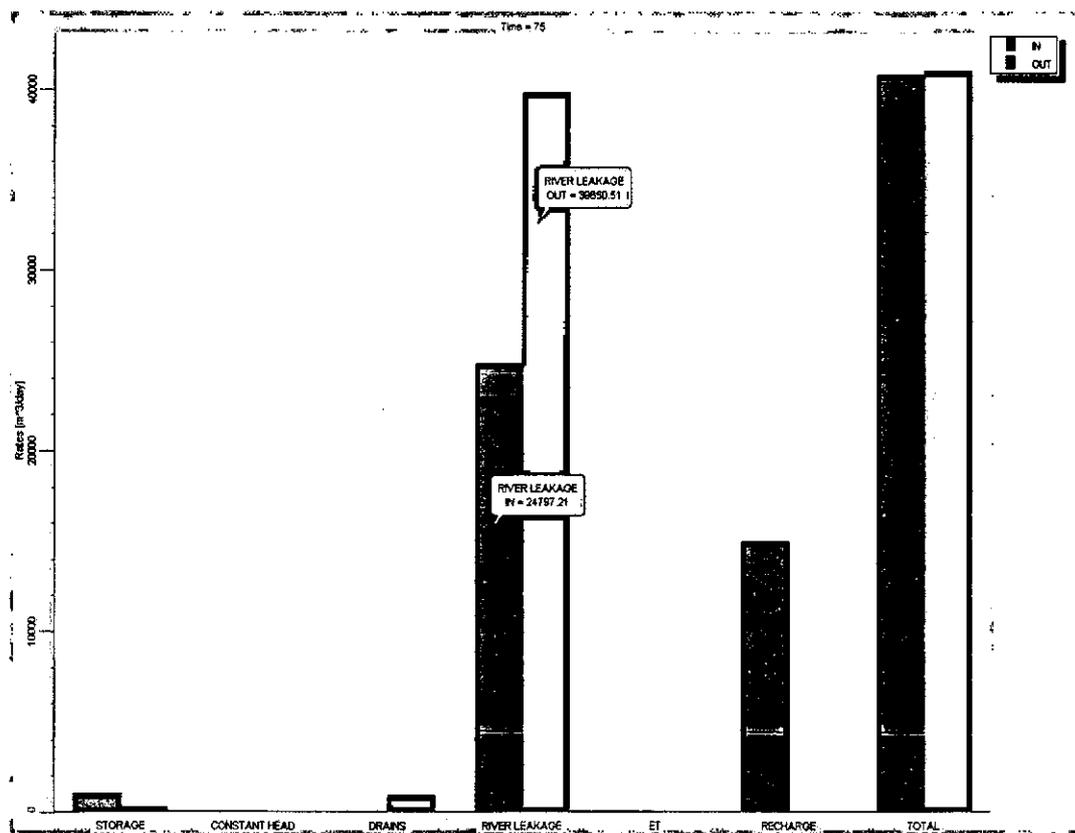


Figura 22. Balance regional de agua 75 días después de iniciada la excavación.

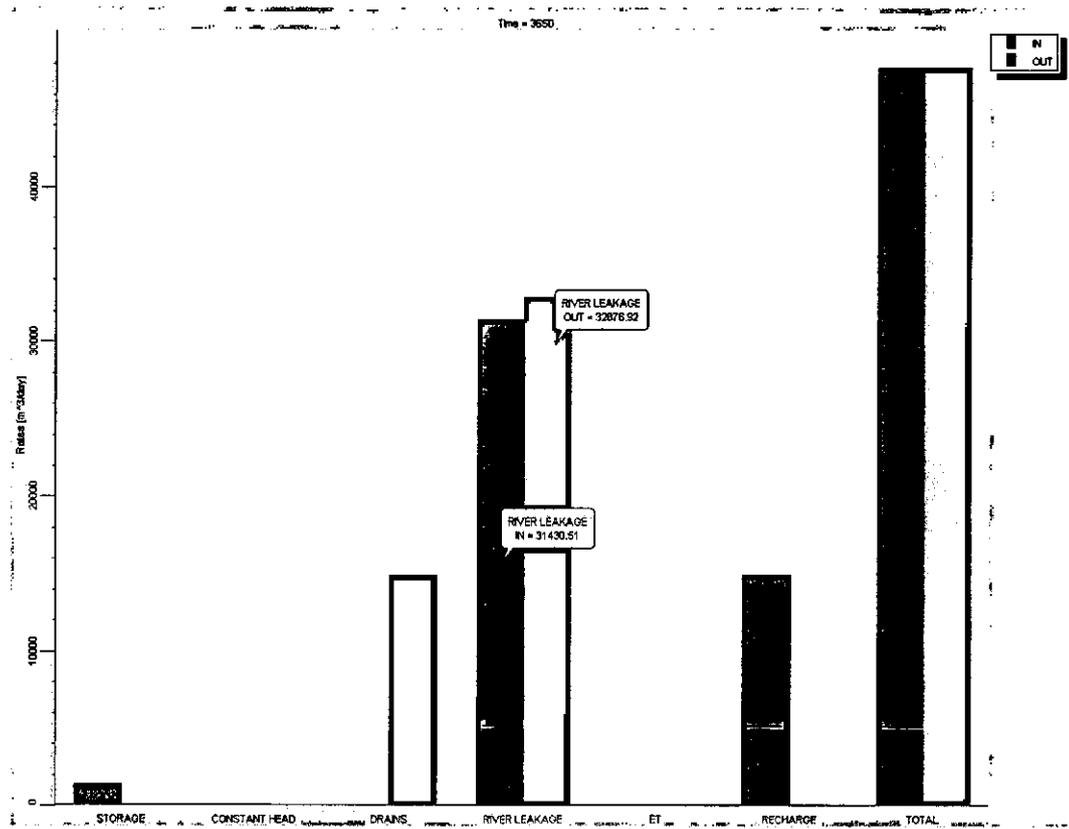


Figura 23. Balance regional de agua 10 años después de iniciada la excavación.

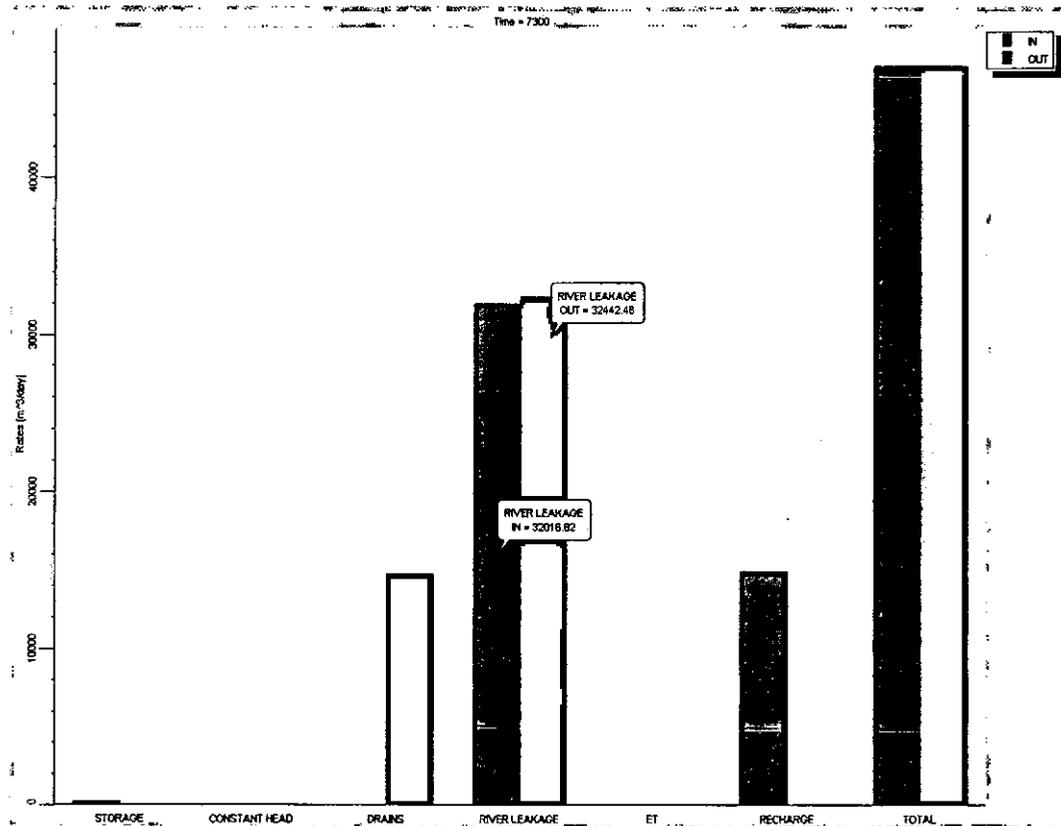


Figura 24. Balance regional de agua 20 años después de iniciada la excavación.

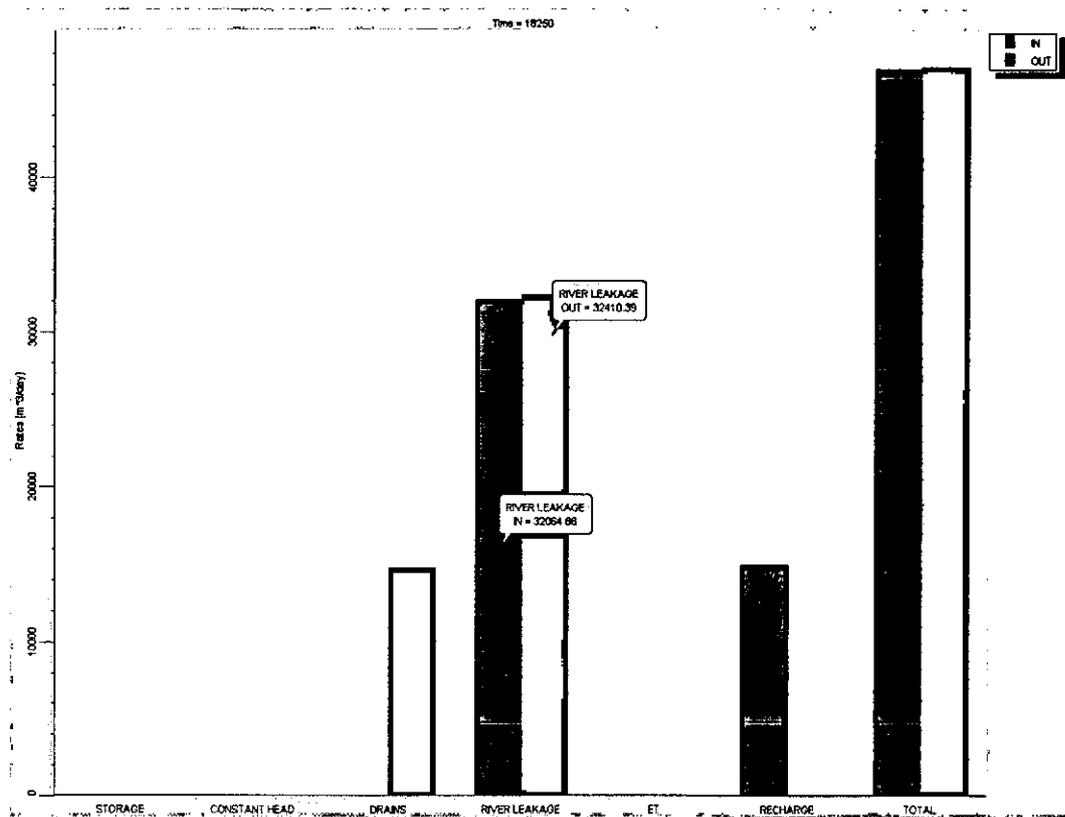


Figura 25. Balance regional de agua 50 años después de iniciada la excavación.



ENSAYOS DE PERMEABILIDAD "IN SITU" TIPO LEFRANC DE CABEZA VARIABLE

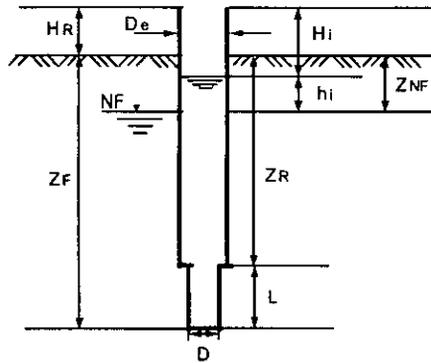
PROYECTO TÚNEL DE ORIENTE

PERFORACIÓN : AO-H-P-04

FECHA : 24-Ene-09

HORA : 2:00pm

DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL : limo arcilloso y arenoso

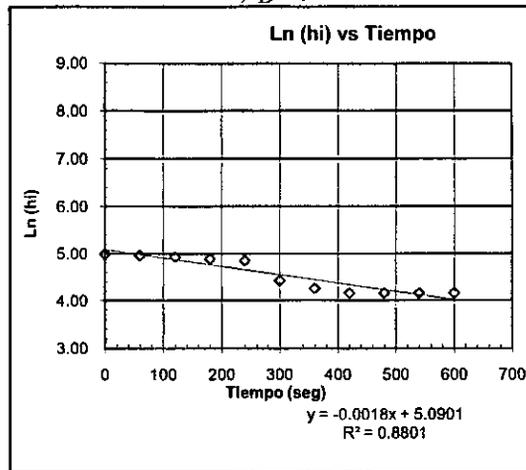


- HR (m) = ALTURA DE LA TUBERIA = 0.00
- ZF (m) = PROF. DE LA PERFORACIÓN = 5.10
- ZR (m) = PROF. DE LA TUBERIA = 3.10
- ZNF (m) = PROF. DEL NIVEL FREÁTICO = 1.50
- L (m) = LONGITUD SIN REVESTIMIENTO = 2.00
- De (cm) = DIÁMETRO INTERNO TUBERIA = 7.62
- D (cm) = DIÁMETRO DE LA PERFORACIÓN = 7.57
- Hi (cm) = PROF. DEL AGUA PARA EL TIEMPO ti
- hi (cm) = POTENCIAL HIDRÁULICO PARA EL TIEMPO ti

$$\text{COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD } k = \frac{\pi D_e^2}{4C(t_2 - t_1)} \text{Ln} \left(\frac{h_2}{h_1} \right)$$

$$\text{COEFICIENTE DE FORMA } C = \begin{cases} \frac{2\pi L}{\text{Ln}(2L/D)} & \text{Para } L/D > 4 \\ \frac{2\pi L}{\text{Ln}(L/D + \sqrt{1 + (L/D)^2})} & \text{Para } L/D < 4 \end{cases}$$

Tiempo (seg)	Hi (cm)	hi (cm)	Ln (hi)
0	0.0	150.0	5.011
60	5.0	145.0	4.977
120	10.0	140.0	4.942
180	15.0	135.0	4.905
240	20.0	130.0	4.868
300	65.0	85.0	4.443
360	78.0	72.0	4.277
420	85.0	65.0	4.174
480	85.0	65.0	4.174
540	85.0	65.0	4.174
600	85.0	65.0	4.174



RESULTADOS DE LA REGRESIÓN

ECUACIÓN RECTA	COEF. CORRELACIÓN	PENDIENTE M (seg ⁻¹)
y = -0,0018x + 5.0901	R ² = 0.8801	1.80E-03

COEFICIENTE DE FORMA C = 316.751 cm

COEF. DE PERMEABILIDAD $k = \frac{\pi D_e^2}{4C} M = 2.59E-04 \text{ cm/seg}$

COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD k = 2.59E-06 m/seg



ENSAYOS DE PERMEABILIDAD "IN SITU" TIPO LEFRANC DE CABEZA VARIABLE

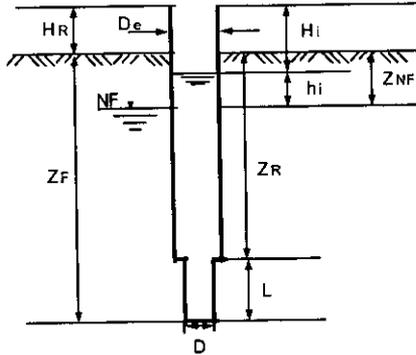
PROYECTO TÚNEL DE ORIENTE

PERFORACIÓN : AO-H-P-04

DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL : limo arcilloso y arenoso

FECHA : 24-Ene-09

HORA : 2:00pm

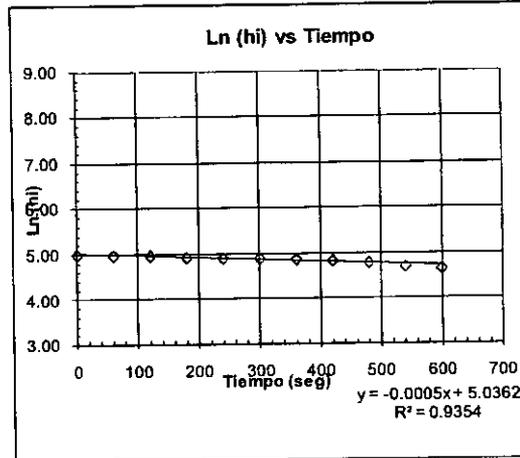


- H_R (m) = ALTURA DE LA TUBERÍA = 0.00
- Z_F (m) = PROF. DE LA PERFORACIÓN = 5.10
- Z_R (m) = PROF. DE LA TUBERÍA = 3.10
- Z_{NF} (m) = PROF. DEL NIVEL FREÁTICO = 1.50
- L (m) = LONGITUD SIN REVESTIMIENTO = 2.00
- D_e (cm) = DIÁMETRO INTERNO TUBERÍA = 7.62
- D (cm) = DIÁMETRO DE LA PERFORACIÓN = 7.57
- H (cm) = PROF. DEL AGUA PARA EL TIEMPO t
- h_i (cm) = POTENCIAL HIDRÁULICO PARA EL TIEMPO t

$$\text{COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD } k = \frac{\pi D_e^2}{4C(t_2 - t_1)} \ln\left(\frac{h_2}{h_1}\right)$$

$$\text{COEFICIENTE DE FORMA } C = \begin{cases} \frac{2\pi L}{\ln(2L/D)} & \text{Para } L/D > 4 \\ \frac{2\pi L}{\ln(L/D + \sqrt{1 + (L/D)^2})} & \text{Para } L/D < 4 \end{cases}$$

Tiempo (seg)	H (cm)	h _i (cm)	Ln (h _i)
0	0.0	150.0	5.011
60	3.0	147.0	4.990
120	5.0	145.0	4.977
180	10.0	140.0	4.942
240	13.0	137.0	4.920
300	15.0	135.0	4.905
360	17.0	133.0	4.890
420	22.0	128.0	4.852
480	27.0	123.0	4.812
540	36.0	114.0	4.736
600	42.0	108.0	4.682



RESULTADOS DE LA REGRESIÓN

ECUACIÓN RECTA	COEF. CORRELACIÓN	PENDIENTE M (seg ⁻¹)
y = -0.0005x + 5.0362	R² = 0.9354	5.00E-04

COEFICIENTE DE FORMA C = 316.751 cm

COEF. DE PERMEABILIDAD k = $\frac{\pi D_e^2}{4C} M = 7.20E-05$ cm/seg

COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD k = 7.20E-07 m/seg



ENSAYOS DE PERMEABILIDAD "IN SITU" TIPO LEFRANC DE CABEZA VARIABLE

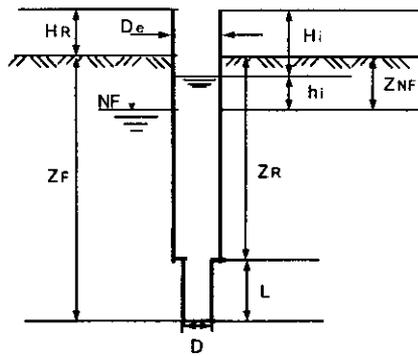
PROYECTO TÚNEL DE ORIENTE

PERFORACIÓN : AO-H-P-04

FECHA : 26-Ene-09

HORA : 11:00am

DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL : limo arcilloso y arenoso

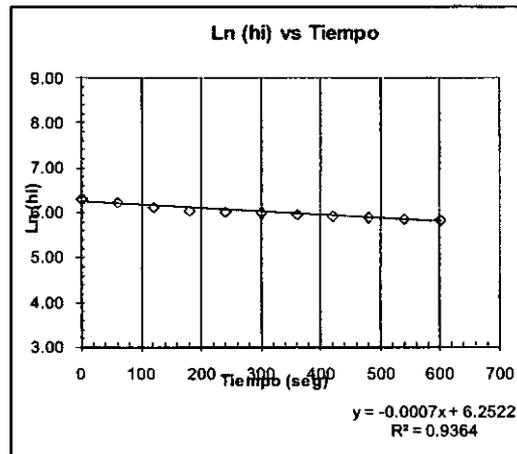


- HR (m) = ALTURA DE LA TUBERIA = 0.00
- ZF (m) = PROF. DE LA PERFORACIÓN = 20.45
- ZR (m) = PROF. DE LA TUBERIA = 17.45
- ZNF (m) = PROF. DEL NIVEL FREÁTICO = 5.55
- L (m) = LONGITUD SIN REVESTIMIENTO = 3.00
- De (cm) = DIÁMETRO INTERNO TUBERIA = 7.62
- D (cm) = DIÁMETRO DE LA PERFORACIÓN = 7.57
- H1 (cm) = PROF. DEL AGUA PARA EL TIEMPO t1
- hi (cm) = POTENCIAL HIDRÁULICO PARA EL TIEMPO ti

$$\text{COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD } k = \frac{\pi D_c^2}{4C(t_2 - t_1)} \ln\left(\frac{h_2}{h_1}\right)$$

$$\text{COEFICIENTE DE FORMA } C = \begin{cases} \frac{2\pi L}{\ln(2L/D)} & \text{Para } L/D > 4 \\ \frac{2\pi L}{\ln(L/D + \sqrt{1 + (L/D)^2})} & \text{Para } L/D < 4 \end{cases}$$

Tiempo (seg)	H (cm)	hi (cm)	Ln (hi)
0	0.0	555.0	6.319
60	40.0	515.0	6.244
120	90.0	465.0	6.142
180	125.0	430.0	6.064
240	136.0	419.0	6.038
300	141.0	414.0	6.026
360	162.0	393.0	5.974
420	175.0	380.0	5.940
480	183.0	372.0	5.919
540	197.0	358.0	5.881
600	205.0	350.0	5.858



RESULTADOS DE LA REGRESIÓN

ECUACIÓN RECTA	COEF. CORRELACIÓN	PENDIENTE M (seg ⁻¹)
y = -0.0007x + 6.2522	R ² = 0.9364	7.00E-04

COEFICIENTE DE FORMA C = 431.07 cm

COEF. DE PERMEABILIDAD k = $\frac{\pi D_c^2}{4C} M = 7.41E-05 \text{ cm/seg}$

COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD k = 7.41E-07 m/seg



ENSAYOS DE PERMEABILIDAD "IN SITU" TIPO LEFRANC DE CABEZA VARIABLE

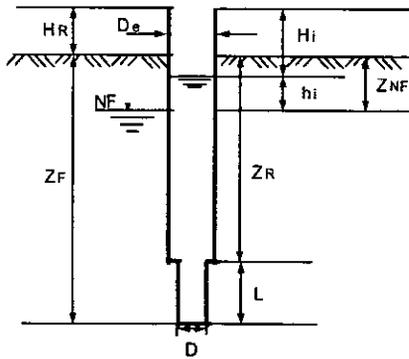
PROYECTO TÚNEL DE ORIENTE

PERFORACIÓN : AO-H-P-04

FECHA : 26-Ene-09

HORA : 11:00am

DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL : limo arcilloso y arenoso

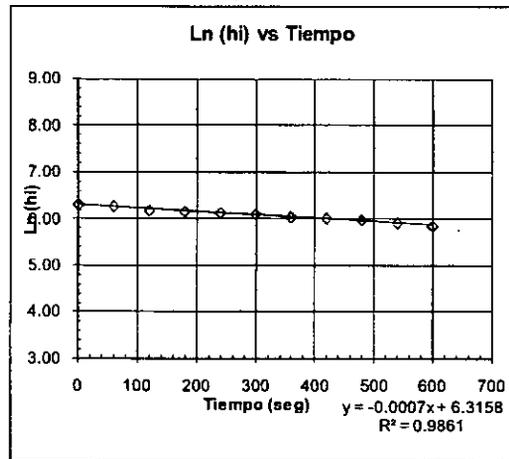


- H_r (m) = ALTURADE LA TUBERIA = 0.00
- Z_F (m) = PROF. DE LA PERFORACIÓN = 20.45
- Z_R (m) = PROF. DE LA TUBERIA = 17.45
- Z_{NF} (m) = PROF. DEL NIVEL FREÁTICO = 5.55
- L (m) = LONGITUD SIN REVESTIMIENTO = 3.00
- D_e (cm) = DIÁMETRO INTERNO TUBERIA = 7.62
- D (cm) = DIÁMETRO DE LA PERFORACIÓN = 7.57
- H_i (cm) = PROF. DEL AGUA PARA EL TIEMPO t_i
- h_i (cm) = POTENCIAL HIDRÁULICO PARA EL TIEMPO t_i

$$\text{COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD } k = \frac{\pi D_e^2}{4C(t_2 - t_1)} \text{Ln}\left(\frac{h_2}{h_1}\right)$$

$$\text{COEFICIENTE DE FORMA } \begin{cases} C = \frac{2\pi L}{\text{Ln}(2L/D)} & \text{Para } L/D > 4 \\ C = \frac{2\pi L}{\text{Ln}(L/D + \sqrt{1 + (L/D)^2})} & \text{Para } L/D < 4 \end{cases}$$

Tiempo (seg)	H (cm)	h _i (cm)	Ln (h _i)
0	0.0	555.0	6.319
60	17.0	538.0	6.288
120	65.0	490.0	6.194
180	73.0	482.0	6.178
240	84.0	471.0	6.155
300	99.0	456.0	6.122
360	127.0	428.0	6.059
420	139.0	416.0	6.031
480	156.0	399.0	5.989
540	179.0	376.0	5.930
600	200.0	355.0	5.872



RESULTADOS DE LA REGRESIÓN

ECUACIÓN RECTA	COEF. CORRELACIÓN	PENDIENTE M (seg ⁻¹)
y=-0.0007x+6.3158	R ² =0.9861	7.00E-04

COEFICIENTE DE FORMA C = 431.07 cm

COEF. DE PERMEABILIDAD k = $\frac{\pi D_e^2}{4C}$ M = 7.41E-05 cm/seg

COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD k = 7.41E-07 m/seg



ENSAYOS DE PERMEABILIDAD "IN SITU" TIPO LEFRANC DE CABEZA VARIABLE

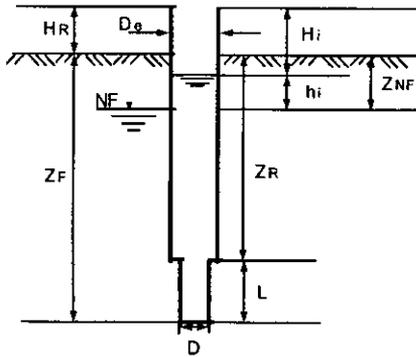
PROYECTO TÚNEL DE ORIENTE

PERFORACIÓN : AO-H-P-04

FECHA : 25-Ene-09

HORA : 07:30am

DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL : limo arcilloso y arenoso

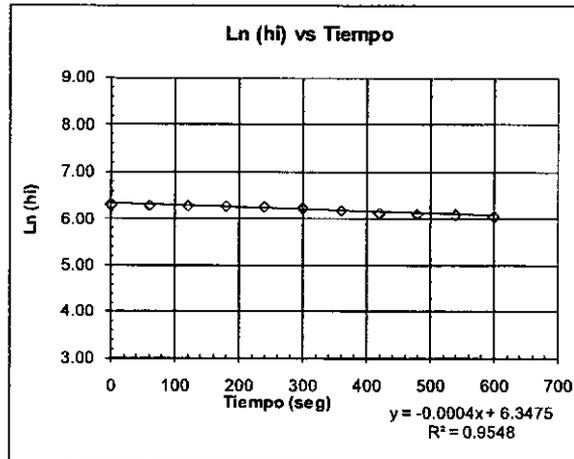


- H_r (m) = ALTURA DE LA TUBERÍA = 0.00
- Z_F (m) = PROF. DE LA PERFORACIÓN = 15.55
- Z_R (m) = PROF. DE LA TUBERÍA = 12.55
- Z_{NF} (m) = PROF. DEL NIVEL FREÁTICO = 5.55
- L (m) = LONGITUD SIN REVESTIMIENTO = 3.00
- D_e (cm) = DIÁMETRO INTERNO TUBERÍA = 7.62
- D (cm) = DIÁMETRO DE LA PERFORACIÓN = 7.57
- H_i (cm) = PROF. DEL AGUA PARA EL TIEMPO t
- h_i (cm) = POTENCIAL HIDRÁULICO PARA EL TIEMPO t

$$\text{COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD } k = \frac{\pi D_e^2}{4C(t_2 - t_1)} \ln\left(\frac{h_2}{h_1}\right)$$

$$\text{COEFICIENTE DE FORMA } C = \begin{cases} \frac{2\pi L}{\ln(2L/D)} & \text{Para } L/D > 4 \\ \frac{2\pi L}{\ln(L/D + \sqrt{1 + (L/D)^2})} & \text{Para } L/D < 4 \end{cases}$$

Tiempo (seg)	H (cm)	h _i (cm)	Ln (h _i)
0	0.0	555.0	6.319
60	7.0	548.0	6.306
120	13.0	542.0	6.295
180	18.0	537.0	6.286
240	27.0	528.0	6.269
300	40.0	515.0	6.244
360	64.0	491.0	6.196
420	86.0	469.0	6.151
480	102.0	453.0	6.116
540	107.0	448.0	6.105
600	122.0	433.0	6.071



RESULTADOS DE LA REGRESIÓN

ECUACIÓN RECTA	COEF. CORRELACIÓN	PENDIENTE M (seg ⁻¹)
y = -0.0004x + 6.3475	R ² = 0.9548	4.00E-04

COEFICIENTE DE FORMA C = 431.07 cm

COEF. DE PERMEABILIDAD k = $\frac{\pi D_e^2}{4C} M = 4.23E-05$ cm/seg

COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD k = 4.23E-07 m/seg



ENSAYOS DE PERMEABILIDAD "IN SITU" TIPO LEFRANC DE CABEZA VARIABLE

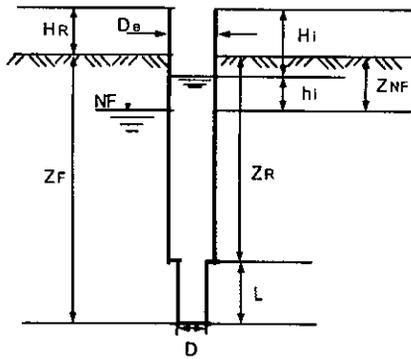
PROYECTO TÚNEL DE ORIENTE

PERFORACIÓN : AO-H-P-04

FECHA : 25-Ene-09

HORA : 07:30am

DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL : limo arcilloso y arenoso

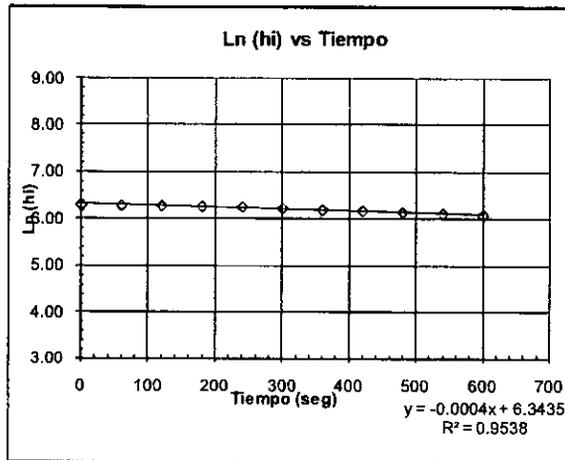


- H_R (m) = ALTURA DE LA TUBERÍA = 0.00
- Z_F (m) = PROF. DE LA PERFORACIÓN = 15.55
- Z_R (m) = PROF. DE LA TUBERÍA = 12.55
- Z_{NF} (m) = PROF. DEL NIVEL FREÁTICO = 5.55
- L (m) = LONGITUD SIN REVESTIMIENTO = 3.00
- D_e (cm) = DIÁMETRO INTERNO TUBERÍA = 7.62
- D (cm) = DIÁMETRO DE LA PERFORACIÓN = 7.57
- H_i (cm) = PROF. DEL AGUA PARA EL TIEMPO t_i
- h_i (cm) = POTENCIAL HIDRÁULICO PARA EL TIEMPO t_i

$$\text{COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD } k = \frac{\pi D_e^2}{4C(t_2 - t_1)} \ln\left(\frac{h_2}{h_1}\right)$$

$$\text{COEFICIENTE DE FORMA } \begin{cases} C = \frac{2\pi L}{\ln(2L/D)} & \text{Para } L/D > 4 \\ C = \frac{2\pi L}{\ln(L/D + \sqrt{1 + (L/D)^2})} & \text{Para } L/D < 4 \end{cases}$$

Tiempo (seg)	H (cm)	h _i (cm)	Ln (h _i)
0	0.0	555.0	6.319
60	6.0	549.0	6.308
120	10.0	545.0	6.301
180	14.0	541.0	6.293
240	21.0	534.0	6.280
300	35.0	520.0	6.254
360	53.0	502.0	6.219
420	62.0	493.0	6.201
480	77.0	478.0	6.170
540	93.0	462.0	6.136
600	105.0	450.0	6.109



RESULTADOS DE LA REGRESIÓN

ECUACIÓN RECTA	COEF. CORRELACIÓN	PENDIENTE M (seg ⁻¹)
y = -0.0004x + 6.3435	R² = 0.9538	4.00E-04

COEFICIENTE DE FORMA C = 431.07 cm

COEF. DE PERMEABILIDAD $k = \frac{\pi D_e^2}{4C} M = 4.23E-05$ cm/seg

COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD k = 4.23E-07 m/seg



ENSAYOS DE PERMEABILIDAD "IN SITU" TIPO LEFRANC DE CABEZA VARIABLE

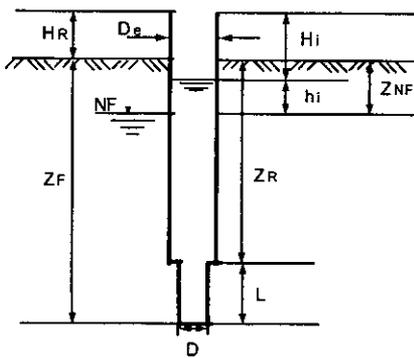
PROYECTO TÚNEL DE ORIENTE

PERFORACIÓN : AO-H-P-04

FECHA : 25-Ene-09

HORA : 07:30am

DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL : limo arcilloso y arenoso

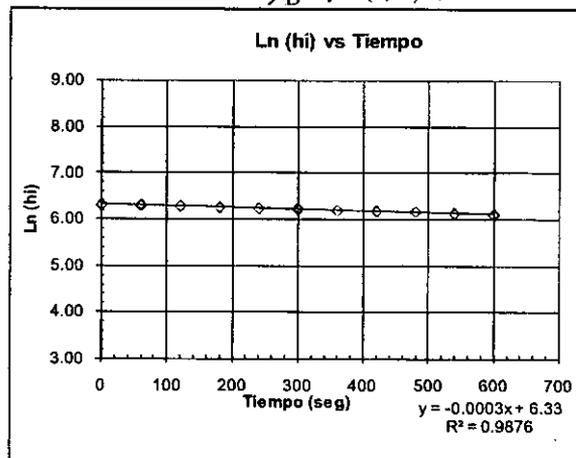


- Hr (m) = ALTURA DE LA TUBERIA = 0.00
- Zf (m) = PROF. DE LA PERFORACIÓN = 15.55
- ZR (m) = PROF. DE LA TUBERIA = 12.55
- ZNF (m) = PROF. DEL NIVEL FREÁTICO = 5.55
- L (m) = LONGITUD SIN REVESTIMIENTO = 3.00
- De (cm) = DIÁMETRO INTERNO TUBERIA = 7.62
- D (cm) = DIÁMETRO DE LA PERFORACIÓN = 7.57
- Hi (cm) = PROF. DEL AGUA PARA EL TIEMPO i
- hi (cm) = POTENCIAL HIDRÁULICO PARA EL TIEMPO i

$$\text{COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD } k = \frac{\pi D_e^2}{4C(t_2 - t_1)} \ln\left(\frac{h_2}{h_1}\right)$$

$$\text{COEFICIENTE DE FORMA } C = \begin{cases} \frac{2\pi L}{\ln(2L/D)} & \text{Para } L/D > 4 \\ \frac{2\pi L}{\ln(1/D + \sqrt{1 + (L/D)^2})} & \text{Para } L/D < 4 \end{cases}$$

Tiempo (seg)	H (cm)	hi (cm)	Ln (hi)
0	0.0	555.0	6.319
60	4.0	551.0	6.312
120	13.0	542.0	6.295
180	25.0	530.0	6.273
240	38.0	517.0	6.248
300	43.0	512.0	6.238
360	59.0	496.0	6.207
420	63.0	492.0	6.198
480	71.0	484.0	6.182
540	89.0	466.0	6.144
600	99.0	456.0	6.122



RESULTADOS DE LA REGRESIÓN

ECUACIÓN RECTA	COEF. CORRELACION	PENDIENTE M (seg ⁻¹)
y = -0.0003x + 6.33	R ² = 0.9876	3.00E-04

COEFICIENTE DE FORMA C = 431.07 cm

COEF. DE PERMEABILIDAD k = $\frac{\pi D_e^2}{4C} M = 3.17E-05 \text{ cm/seg}$

COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD k = 3.17E-07 m/seg



ENSAYOS DE PERMEABILIDAD "IN SITU" TIPO LEFRANC DE CABEZA VARIABLE

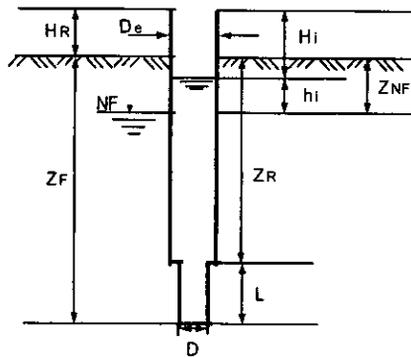
PROYECTO TÚNEL DE ORIENTE

PERFORACIÓN: AO-H-P-04

FECHA: 25-Ene-09

HORA: 07:30am

DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL: limo arcilloso y arenoso

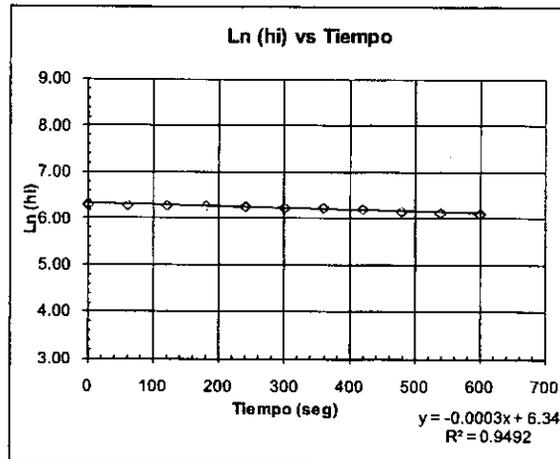


- HR (m) = ALTURA DE LA TUBERIA = 0.00
- ZF (m) = PROF. DE LA PERFORACIÓN = 15.55
- ZR (m) = PROF. DE LA TUBERIA = 12.55
- ZNF (m) = PROF. DEL NIVEL FREÁTICO = 5.55
- L (m) = LONGITUD SIN REVESTIMIENTO = 3.00
- D_s (cm) = DIÁMETRO INTERNO TUBERIA = 7.62
- D (cm) = DIÁMETRO DE LA PERFORACIÓN = 7.57
- H_i (cm) = PROF. DEL AGUA PARA EL TIEMPO *t*
- h_i (cm) = POTENCIAL HIDRÁULICO PARA EL TIEMPO *t*

$$\text{COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD } k = \frac{\pi D_s^2}{4C(t_2 - t_1)} \ln\left(\frac{h_2}{h_1}\right)$$

$$\text{COEFICIENTE DE FORMA } C = \begin{cases} \frac{2\pi L}{\ln(2L/D)} & \text{Para } L/D > 4 \\ \frac{2\pi L}{\ln(L/D + \sqrt{1 + (L/D)^2})} & \text{Para } L/D < 4 \end{cases}$$

Tiempo (seg)	H (cm)	h _i (cm)	Ln (h _i)
0	0.0	555.0	6.319
60	6.0	549.0	6.308
120	11.0	544.0	6.299
180	19.0	536.0	6.284
240	27.0	528.0	6.269
300	37.0	518.0	6.250
360	41.0	514.0	6.242
420	58.0	497.0	6.209
480	77.0	478.0	6.170
540	93.0	462.0	6.136
600	103.0	452.0	6.114



RESULTADOS DE LA REGRESIÓN

ECUACIÓN RECTA	COEF. CORRELACIÓN	PENDIENTE M (seg ⁻¹)
y=-0,0003x+6.34	R ² =0.9492	3.00E-04

COEFICIENTE DE FORMA C = 431.07 cm

COEF. DE PERMEABILIDAD $k = \frac{\pi D_s^2}{4C} M = 3.17E-05 \text{ cm/seg}$

COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD $k = 3.17E-07 \text{ m/seg}$



ENSAYOS DE PERMEABILIDAD "IN SITU" TIPO LEFRANC DE CABEZA VARIABLE

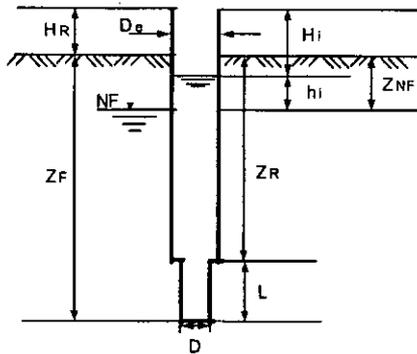
PROYECTO TÚNEL DE ORIENTE

PERFORACIÓN : AO-H-P-04

FECHA : 28-Ene-09

HORA : 03:00pm

DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL : limo arcilloso y arenoso

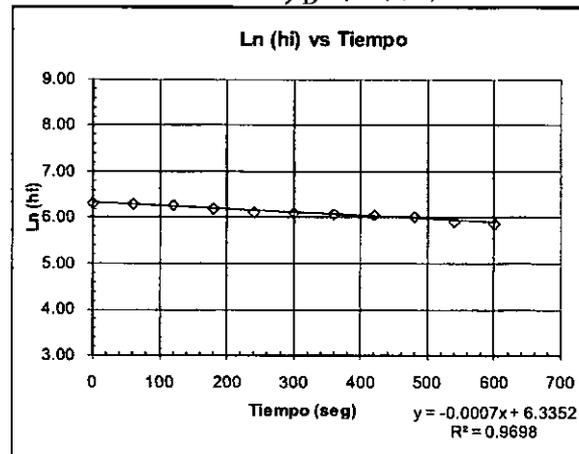


- H_R (m) = ALTURA DE LA TUBERÍA = 0.00
- Z_F (m) = PROF. DE LA PERFORACIÓN = 25.55
- Z_R (m) = PROF. DE LA TUBERÍA = 22.55
- Z_{NF} (m) = PROF. DEL NIVEL FREÁTICO = 5.55
- L (m) = LONGITUD SIN REVESTIMIENTO = 3.00
- D₀ (cm) = DIÁMETRO INTERNO TUBERÍA = 7.62
- D (cm) = DIÁMETRO DE LA PERFORACIÓN = 7.57
- H_i (cm) = PROF. DEL AGUA PARA EL TIEMPO *t_i*
- h_i (cm) = POTENCIAL HIDRÁULICO PARA EL TIEMPO *t_i*

$$\text{COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD } k = \frac{\pi D_e^2}{4C(t_2 - t_1)} \ln\left(\frac{h_2}{h_1}\right)$$

$$\text{COEFICIENTE DE FORMA } C = \begin{cases} \frac{2\pi L}{\ln(2L/D)} & \text{Para } L/D > 4 \\ \frac{2\pi L}{\ln(L/D + \sqrt{1 + (L/D)^2})} & \text{Para } L/D < 4 \end{cases}$$

Tiempo (seg)	H (cm)	h _i (cm)	Ln (h _i)
0	0.0	555.0	6.319
60	10.0	545.0	6.301
120	25.0	530.0	6.273
180	62.0	493.0	6.201
240	98.0	457.0	6.125
300	105.0	450.0	6.109
360	117.0	438.0	6.082
420	125.0	430.0	6.064
480	139.0	416.0	6.031
540	181.0	374.0	5.924
600	199.0	356.0	5.875



RESULTADOS DE LA REGRESIÓN

ECUACIÓN RECTA	COEF. CORRELACIÓN	PENDIENTE M (seg ⁻¹)
y = -0.0007x + 6.3352	R ² = 0.9698	7.00E-04

COEFICIENTE DE FORMA C = 431.07 cm

COEF. DE PERMEABILIDAD $k = \frac{\pi D_e^2}{4C} M = 7.41E-05 \text{ cm/seg}$

COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD k = 7.41E-07 m/seg



ENSAYOS DE PERMEABILIDAD "IN SITU" TIPO LEFRANC DE CABEZA VARIABLE

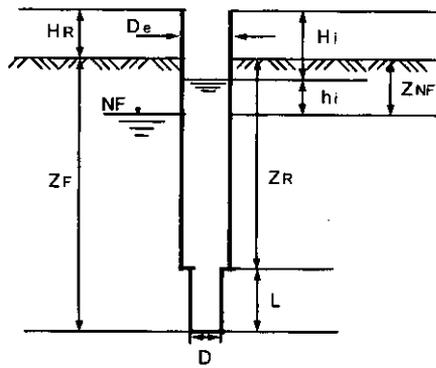
PROYECTO TÚNEL DE ORIENTE

PERFORACIÓN : AO-H-P-04

FECHA : 28-Ene-09

HORA : 03:00pm

DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL : limo arcilloso y arenoso

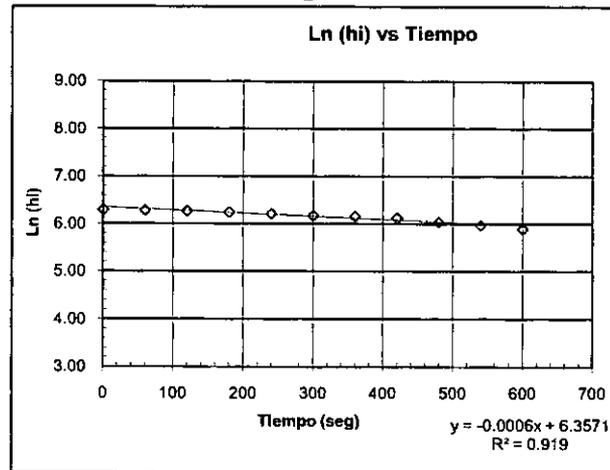


- HR (m) = ALTURA DE LA TUBERÍA = 0.00
- ZF (m) = PROF. DE LA PERFORACIÓN = 25.55
- ZR (m) = PROF. DE LA TUBERÍA = 22.55
- ZNF (m) = PROF. DEL NIVEL FREÁTICO = 5.55
- L (m) = LONGITUD SIN REVESTIMIENTO = 3.00
- De (cm) = DIÁMETRO INTERNO TUBERÍA = 7.62
- D (cm) = DIÁMETRO DE LA PERFORACIÓN = 7.57
- Hi (cm) = PROF. DEL AGUA PARA EL TIEMPO t_i
- hi (cm) = POTENCIAL HIDRÁULICO PARA EL TIEMPO t_i

$$\text{COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD } k = \frac{\pi D_e^2}{4C(t_2 - t_1)} \ln\left(\frac{h_2}{h_1}\right)$$

$$\text{COEFICIENTE DE FORMA } \begin{cases} C = \frac{2\pi L}{\ln(2L/D)} & \text{Para } L/D > 4 \\ C = \frac{2\pi L}{\ln(L/D + \sqrt{1 + (L/D)^2})} & \text{Para } L/D < 4 \end{cases}$$

Tiempo (seg)	Hi (cm)	hi (cm)	Ln (hi)
0	7.0	548.0	6.306
60	13.0	542.0	6.295
120	19.0	536.0	6.284
180	33.0	522.0	6.258
240	49.0	506.0	6.227
300	66.0	487.0	6.188
360	76.0	479.0	6.172
420	91.0	464.0	6.140
480	131.0	424.0	6.050
540	157.0	398.0	5.986
600	188.0	367.0	5.905



RESULTADOS DE LA REGRESIÓN

ECUACIÓN RECTA	COEF. CORRELACIÓN	PENDIENTE M (seg ⁻¹)
y = -0.0006x + 6.3571	R ² = 0.919	6.00E-04

COEFICIENTE DE FORMA C = 431.07 cm

COEF. DE PERMEABILIDAD k = $\frac{\pi D_e^2}{4C} M = 6.35E-05$ cm/seg

COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD k = 6.35E-07 m/seg



ENSAYOS DE PERMEABILIDAD "IN SITU" TIPO LEFRANC DE CABEZA VARIABLE

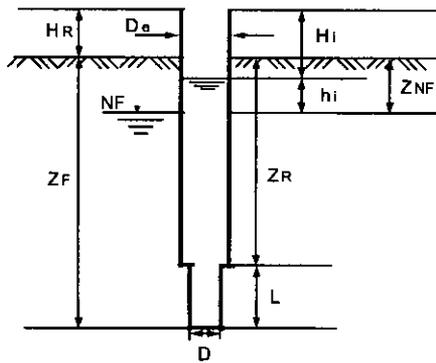
PROYECTO TÚNEL DE ORIENTE

PERFORACIÓN : AO-H-P-03

DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL : arena (no recuperó)

FECHA : 18-Ene-09

HORA :

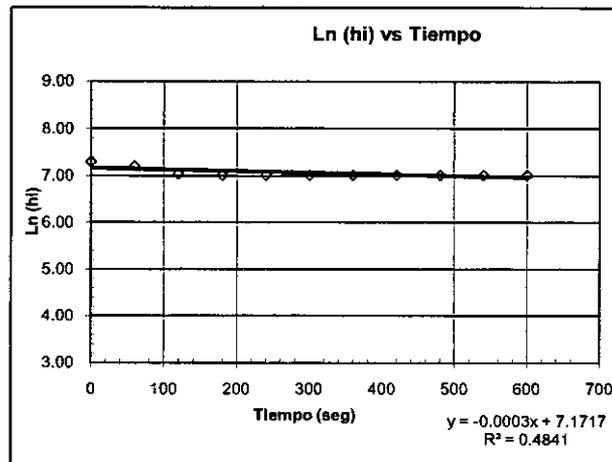


- HR (m) = ALTURA DE LA TUBERIA = 0.10
- ZF (m) = PROF. DE LA PERFORACIÓN = 5.10
- ZR (m) = PROF. DE LA TUBERIA = 3.10
- ZNF (m) = PROF. DEL NIVEL FREÁTICO = 14.80
- L (m) = LONGITUD SIN REVESTIMIENTO = 2.00
- De (cm) = DIÁMETRO INTERNO TUBERIA = 7.62
- D (cm) = DIÁMETRO DE LA PERFORACIÓN = 7.57
- Hi (cm) = PROF. DEL AGUA PARA EL TIEMPO t_i
- hi (cm) = POTENCIAL HIDRÁULICO PARA EL TIEMPO t_i

$$\text{COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD } k = \frac{\pi D_e^2}{4C(t_2 - t_1)} \text{Ln}\left(\frac{h_2}{h_1}\right)$$

$$\text{COEFICIENTE DE FORMA } \begin{cases} C = \frac{2\pi L}{\text{Ln}(2L/D)} & \text{Para } L/D > 4 \\ C = \frac{2\pi L}{\text{Ln}(L/D + \sqrt{1 + (L/D)^2})} & \text{Para } L/D < 4 \end{cases}$$

Tiempo (seg)	H _i (cm)	h _i (cm)	Ln (h _i)
0	0.0	1490.0	7.307
60	130.0	1360.0	7.215
120	340.0	1150.0	7.048
180	365.0	1125.0	7.026
240	365.0	1125.0	7.026
300	365.0	1125.0	7.026
360	365.0	1125.0	7.026
420	365.0	1125.0	7.026
480	365.0	1125.0	7.026
540	365.0	1125.0	7.026
600	365.0	1125.0	7.026



RESULTADOS DE LA REGRESIÓN

ECUACIÓN RECTA	COEF. CORRELACIÓN	PENDIENTE M (seg ⁻¹)
y=-0.0003x+7.1717	R ² =0.4841	3.00E-04

COEFICIENTE DE FORMA C = 316.751 cm

COEF. DE PERMEABILIDAD $k = \frac{\pi D_e^2}{4C} M = 4.32E-05$ cm/seg

COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD k = 4.32E-07 m/seg



ENSAYOS DE PERMEABILIDAD "IN SITU" TIPO LEFRANC DE CABEZA VARIABLE

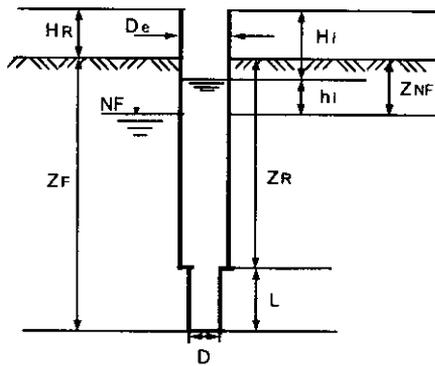
PROYECTO TÚNEL DE ORIENTE

PERFORACIÓN : AO-H-P-03

FECHA : 18-Ene-09

HORA :

DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL : arena (no recuperó)

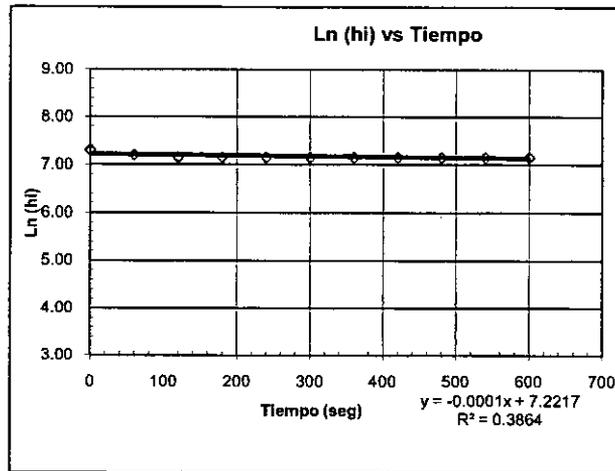


- HR (m) = ALTURA DE LA TUBERIA = 0.10
- ZF (m) = PROF. DE LA PERFORACIÓN = 5.10
- ZR (m) = PROF. DE LA TUBERIA = 3.10
- ZNF (m) = PROF. DEL NIVEL FREÁTICO = 14.80
- L (m) = LONGITUD SIN REVESTIMIENTO = 2.00
- De (cm) = DIÁMETRO INTERNO TUBERIA = 7.62
- D (cm) = DIÁMETRO DE LA PERFORACIÓN = 7.57
- Hi (cm) = PROF. DEL AGUA PARA EL TIEMPO ti
- hi (cm) = POTENCIAL HIDRÁULICO PARA EL TIEMPO ti

$$\text{COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD } k = \frac{\pi D_e^2}{4C(t_2 - t_1)} \text{Ln}\left(\frac{h_2}{h_1}\right)$$

$$\text{COEFICIENTE DE FORMA } \begin{cases} C = \frac{2\pi L}{\text{Ln}(2L/D)} & \text{Para } L/D > 4 \\ C = \frac{2\pi L}{\text{Ln}(L/D + \sqrt{1 + (L/D)^2})} & \text{Para } L/D < 4 \end{cases}$$

Tiempo (seg)	Hi (cm)	hi (cm)	Ln (hi)
0	0.0	1490.0	7.307
60	135.0	1355.0	7.212
120	200.0	1290.0	7.162
180	200.0	1290.0	7.162
240	200.0	1290.0	7.162
300	200.0	1290.0	7.162
360	200.0	1290.0	7.162
420	200.0	1290.0	7.162
480	200.0	1290.0	7.162
540	200.0	1290.0	7.162
600	200.0	1290.0	7.162



RESULTADOS DE LA REGRESIÓN

ECUACIÓN RECTA	COEF. CORRELACIÓN	PENDIENTE M (seg ⁻¹)
y = -0,0001x + 7,2217	R ² = 0,3864	1.00E-04

COEFICIENTE DE FORMA C = 316.751 cm

COEF. DE PERMEABILIDAD $k = \frac{\pi D_e^2}{4C} M = 1.44E-05$ cm/seg

COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD k = 1.44E-07 m/seg



ENSAYOS DE PERMEABILIDAD "IN SITU" TIPO LEFRANC DE CABEZA VARIABLE

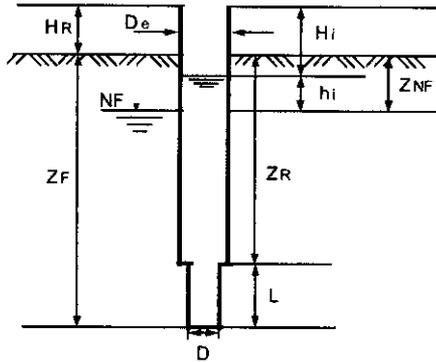
PROYECTO TÚNEL DE ORIENTE

PERFORACIÓN : AO-H-P-03

DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL : arena (no recuperó)

FECHA : 19-Ene-09

HORA :

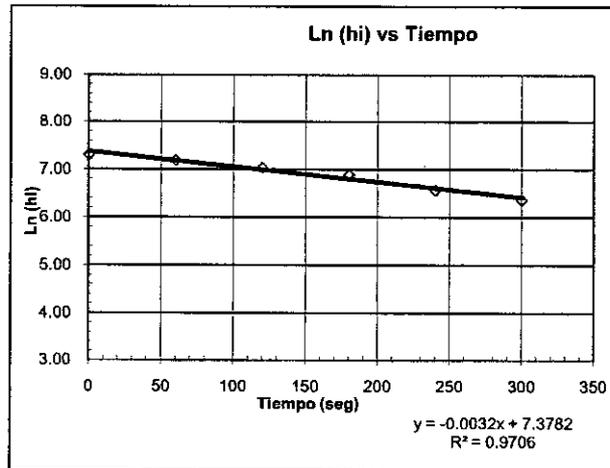


- Hr (m) = ALTURA DE LA TUBERIA = 0.15
- ZF (m) = PROF. DE LA PERFORACIÓN = 10.05
- ZR (m) = PROF. DE LA TUBERIA = 7.00
- ZNF (m) = PROF. DEL NIVEL FREÁTICO = 14.80
- L (m) = LONGITUD SIN REVESTIMIENTO = 3.05
- De (cm) = DIÁMETRO INTERNO TUBERIA = 7.62
- D (cm) = DIÁMETRO DE LA PERFORACIÓN = 7.57
- Hi (cm) = PROF. DEL AGUA PARA EL TIEMPO ti
- hi (cm) = POTENCIAL HIDRÁULICO PARA EL TIEMPO ti

$$\text{COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD } k = \frac{\pi D_c^2}{4C(t_2 - t_1)} \ln\left(\frac{h_2}{h_1}\right)$$

$$\text{COEFICIENTE DE FORMA } \begin{cases} C = \frac{2\pi L}{\ln(2L/D)} & \text{Para } L/D > 4 \\ C = \frac{2\pi L}{\ln(L/D + \sqrt{1 + (L/D)^2})} & \text{Para } L/D < 4 \end{cases}$$

Tiempo (seg)	Hi (cm)	hi (cm)	Ln (hi)
0	0.0	1495.0	7.310
60	158.0	1337.0	7.198
120	350.0	1145.0	7.043
180	507.0	988.0	6.896
240	780.0	715.0	6.572
300	910.0	585.0	6.372



RESULTADOS DE LA REGRESIÓN

ECUACIÓN RECTA	COEF. CORRELACIÓN	PENDIENTE M (seg ⁻¹)
y = -0.0032x + 7.3782	R ² = 0.9706	3.20E-03

COEFICIENTE DE FORMA C = 436.6041 cm

COEF. DE PERMEABILIDAD k = $\frac{\pi D_c^2}{4C} M = 3.34E-04$ cm/seg

COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD k = 3.34E-06 m/seg



ENSAYOS DE PERMEABILIDAD "IN SITU" TIPO LEFRANC DE CABEZA VARIABLE

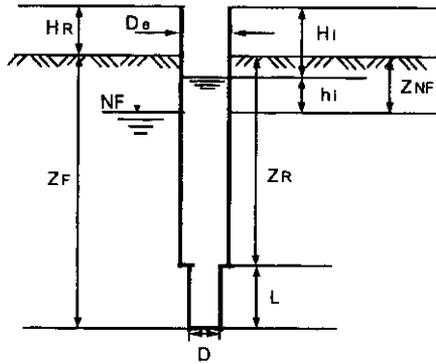
PROYECTO TÚNEL DE ORIENTE

PERFORACIÓN : AO-H-P-03

DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL : limo arcilloso y arenoso

FECHA : 19-Ene-09

HORA :

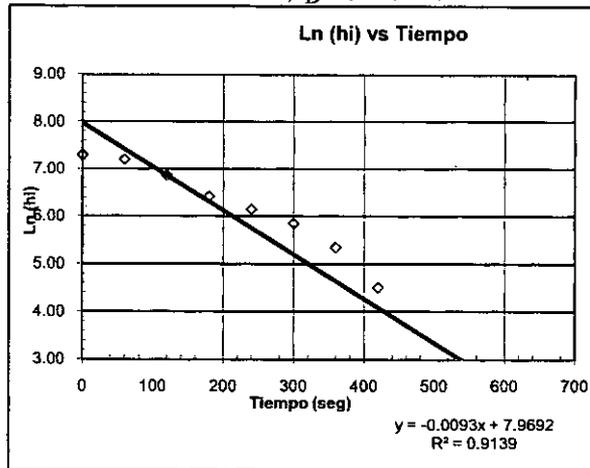


- H_R (m) = ALTURA DE LA TUBERIA = 0.12
- Z_F (m) = PROF. DE LA PERFORACIÓN = 15.30
- Z_R (m) = PROF. DE LA TUBERIA = 11.80
- Z_{NF} (m) = PROF. DEL NIVEL FREÁTICO = 14.80
- L (m) = LONGITUD SIN REVESTIMIENTO = 3.50
- D_e (cm) = DIÁMETRO INTERNO TUBERIA = 7.62
- D (cm) = DIÁMETRO DE LA PERFORACIÓN = 7.57
- H_i (cm) = PROF. DEL AGUA PARA EL TIEMPO t₁
- h_i (cm) = POTENCIAL HIDRÁULICO PARA EL TIEMPO t₂

$$\text{COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD } k = \frac{\pi D_e^2}{4C(t_2 - t_1)} \text{Ln}\left(\frac{h_2}{h_1}\right)$$

$$\text{COEFICIENTE DE FORMA } \begin{cases} C = \frac{2\pi L}{\text{Ln}(2L/D)} & \text{Para } L/D > 4 \\ C = \frac{2\pi L}{\text{Ln}(L/D + \sqrt{1 + (L/D)^2})} & \text{Para } L/D < 4 \end{cases}$$

Tiempo (seg)	H _i (cm)	h _i (cm)	Ln (h _i)
0	0.0	1491.8	7.308
60	130.0	1361.8	7.217
120	520.0	971.8	6.879
180	870.0	621.8	6.433
240	1020.0	471.8	6.157
300	1140.0	351.8	5.863
360	1280.0	211.8	5.356
420	1400.0	91.8	4.520
480	1480.0	11.8	2.468
540	1480.0	11.8	2.468
600	1480.0	11.8	2.468



RESULTADOS DE LA REGRESIÓN

ECUACIÓN RECTA	COEF. CORRELACIÓN	PENDIENTE M (seg ⁻¹)
y=-0.0093x+7.9692	R ² =0.9139	9.30E-03

COEFICIENTE DE FORMA C = 485.7896 cm

COEF. DE PERMEABILIDAD $k = \frac{\pi D_e^2}{4C} M = 8.73E-04$ cm/seg

COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD k = 8.73E-06 m/seg



ENSAYOS DE PERMEABILIDAD "IN SITU" TIPO LEFRANC DE CABEZA VARIABLE

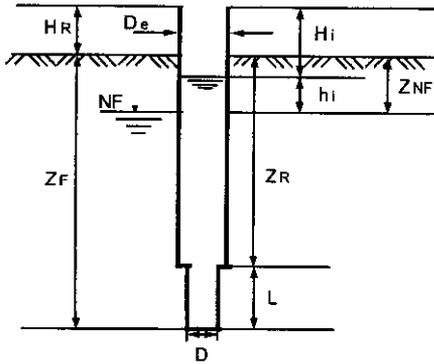
PROYECTO TÚNEL DE ORIENTE

PERFORACIÓN : AO-H-P-03

DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL : Arena (no recuperó)

FECHA : 20-Ene-09

HORA :

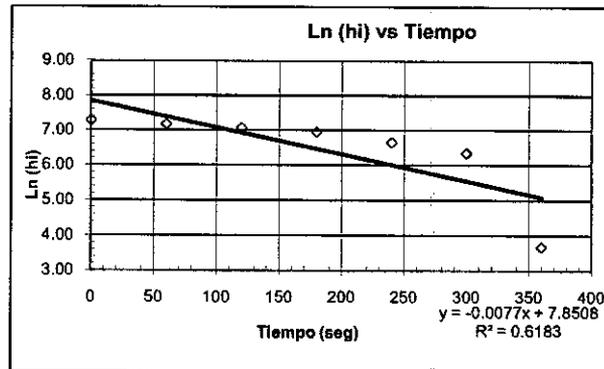


- HR (m) = ALTURA DE LA TUBERIA = 0.00
- ZF (m) = PROF. DE LA PERFORACIÓN = 25.80
- ZR (m) = PROF. DE LA TUBERIA = 0.00
- ZNF (m) = PROF. DEL NIVEL FREÁTICO = 14.80
- L (m) = LONGITUD SIN REVESTIMIENTO = 25.80
- De (cm) = DIÁMETRO INTERNO TUBERIA = 7.62
- D (cm) = DIÁMETRO DE LA PERFORACIÓN = 7.57
- Hi (cm) = PROF. DEL AGUA PARA EL TIEMPO t₁
- hi (cm) = POTENCIAL HIDRÁULICO PARA EL TIEMPO t₂

$$\text{COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD } k = \frac{\pi D_e^2}{4C(t_2 - t_1)} \text{Ln}\left(\frac{h_2}{h_1}\right)$$

$$\text{COEFICIENTE DE FORMA } \begin{cases} C = \frac{2\pi L}{\text{Ln}(2L/D)} & \text{Para } L/D > 4 \\ C = \frac{2\pi L}{\text{Ln}(t/D + \sqrt{1 + (L/D)^2})} & \text{Para } L/D < 4 \end{cases}$$

Tiempo (seg)	Hi (cm)	hi (cm)	Ln (hi)
0	0.0	1480.0	7.300
60	150.0	1330.0	7.193
120	280.0	1200.0	7.090
180	420.0	1060.0	6.966
240	690.0	790.0	6.672
300	900.0	580.0	6.363
360	1440.0	40.0	3.689



RESULTADOS DE LA REGRESIÓN

ECUACIÓN RECTA	COEF. CORRELACIÓN	PENDIENTE M (seg ⁻¹)
y=-0.0077x+7.8508	R ² =0.6183	7.70E-03

COEFICIENTE DE FORMA C = 2484.577 cm

COEF. DE PERMEABILIDAD k = $\frac{\pi D_e^2}{4C} M = 1.41E-04$ cm/seg

COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD k = 1.41E-06 m/seg



ENSAYOS DE PERMEABILIDAD "IN SITU" TIPO LEFRANC DE CABEZA VARIABLE

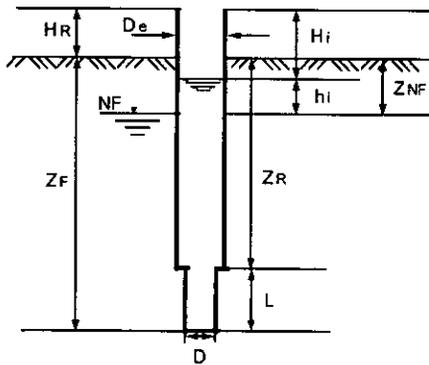
PROYECTO TÚNEL DE ORIENTE

PERFORACIÓN : AO-H-P-03

FECHA : 24-Ene-09

HORA : 2:00pm

DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL : limo arcilloso y arenoso

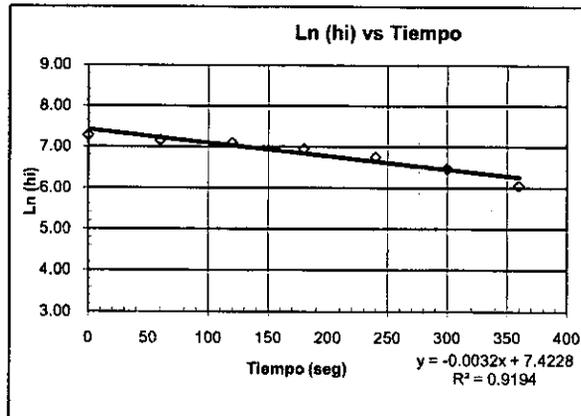


- HR (m) = ALTURA DE LA TUBERIA = 0.00
- ZF (m) = PROF. DE LA PERFORACIÓN = 30.30
- ZR (m) = PROF. DE LA TUBERIA = 27.30
- ZNF (m) = PROF. DEL NIVEL FREÁTICO = 14.80
- L (m) = LONGITUD SIN REVESTIMIENTO = 3.00
- De (cm) = DIÁMETRO INTERNO TUBERIA = 7.62
- D (cm) = DIÁMETRO DE LA PERFORACIÓN = 7.57
- Hi (cm) = PROF. DEL AGUA PARA EL TIEMPO ti
- hi (cm) = POTENCIAL HIDRÁULICO PARA EL TIEMPO ti

$$\text{COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD } k = \frac{\pi D_e^2}{4C(t_2 - t_1)} \text{Ln} \left(\frac{h_2}{h_1} \right)$$

$$\text{COEFICIENTE DE FORMA } \begin{cases} C = \frac{2\pi L}{\text{Ln}(2L/D)} & \text{Para } L/D > 4 \\ C = \frac{2\pi L}{\text{Ln}(L/D + \sqrt{1 + (L/D)^2})} & \text{Para } L/D < 4 \end{cases}$$

Tiempo (seg)	Hi (cm)	hi (cm)	Ln (hi)
0	0.0	1480.0	7.300
60	170.0	1310.0	7.178
120	250.0	1230.0	7.115
180	420.0	1060.0	6.966
240	610.0	870.0	6.768
300	830.0	650.0	6.477
360	1050.0	430.0	6.064
420	1210.0	270.0	5.598
480	1380.0	100.0	4.605



RESULTADOS DE LA REGRESIÓN

ECUACIÓN RECTA	COEF. CORRELACIÓN	PENDIENTE M (seg ⁻¹)
y=-0,0032x+7,4228	R ² =0.9194	3.20E-02

COEFICIENTE DE FORMA C = 431.07 cm

COEF. DE PERMEABILIDAD $k = \frac{\pi D_e^2}{4C} M = 3.39E-03 \text{ cm/seg}$

COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD k = 3.39E-05 m/seg

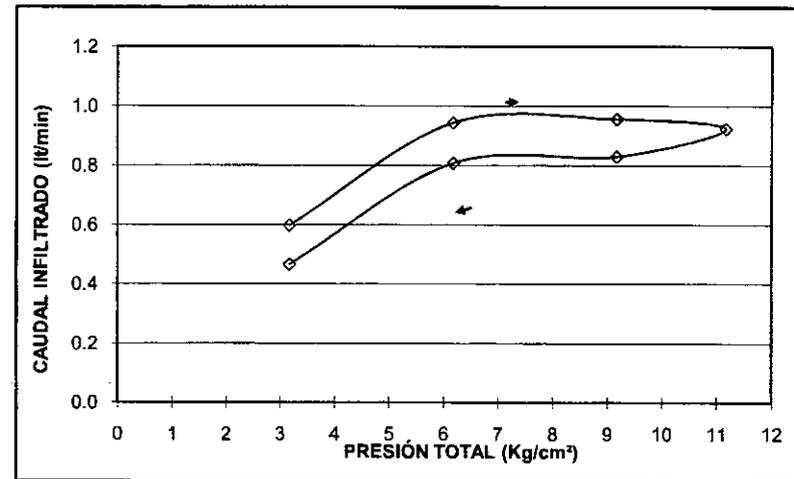
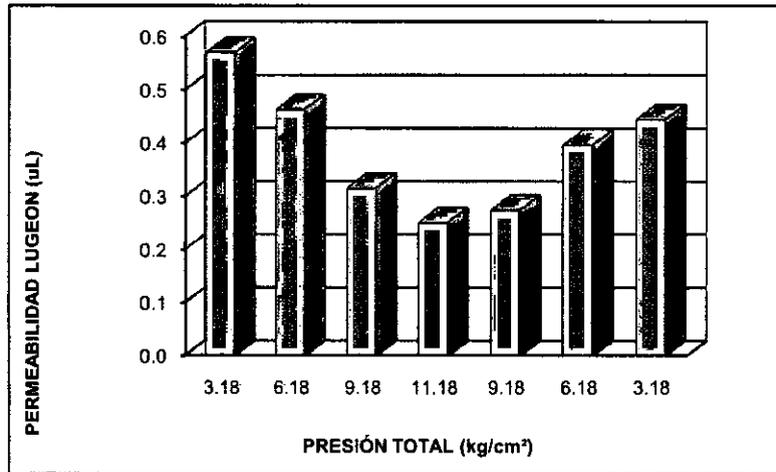
ENSAYOS DE PERMEABILIDAD "IN SITU" TIPO LUGEON

PERFORACIÓN : AO-TS-P-2
DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL : Anfibolita

FECHA DE EJECUCIÓN DEL ENSAYO : abril 4 de 2009
HORA INICIAL / HORA FINAL : 1:50pm/3:34pm

INCLINACIÓN DE LA PERFORACIÓN $\beta = 0.00^\circ$
 ALTURA DEL MANÓMETRO $h_m = 0.60$ m
 PROFUNDIDAD DEL OBTURADOR $Z_o = 136.60$ m
 PROFUNDIDAD DEL ENSAYO $Z_F = 139.90$ m
 PROFUNDIDAD DEL NIVEL FREÁTICO $Z_{NF} = 11.21$ m

PRESIÓN MANÓMETRO (P_m en kg/cm ²)	PRESIÓN TOTAL (P_T en kg/cm ²)	TIEMPO (t en min)	LECTURA INICIAL (L_i en lt)	LECTURA FINAL (L_f en lt)	CAUDAL INFILTRADO (Q_i en lt/min)	PERM. LUGEON (μ L)
2.00	3.18	10.0	562.00	567.98	0.60	0.57
5.00	6.18	10.0	571.00	580.44	0.94	0.46
8.00	9.18	10.0	582.90	592.46	0.96	0.32
10.00	11.18	10.0	600.00	609.24	0.92	0.25
8.00	9.18	10.0	610.00	618.30	0.83	0.27
5.00	6.18	10.0	619.10	627.18	0.81	0.40
2.00	3.18	10.0	627.70	632.36	0.47	0.44



INTERPRETACIÓN DEL ENSAYO :

VALOR REPRESENTATIVO DE LA PERMEABILIDAD LUGEON : 0.25 uL

ENSAYOS DE PERMEABILIDAD "IN SITU" TIPO LUGEON

PERFORACIÓN : AO-TS-P-2

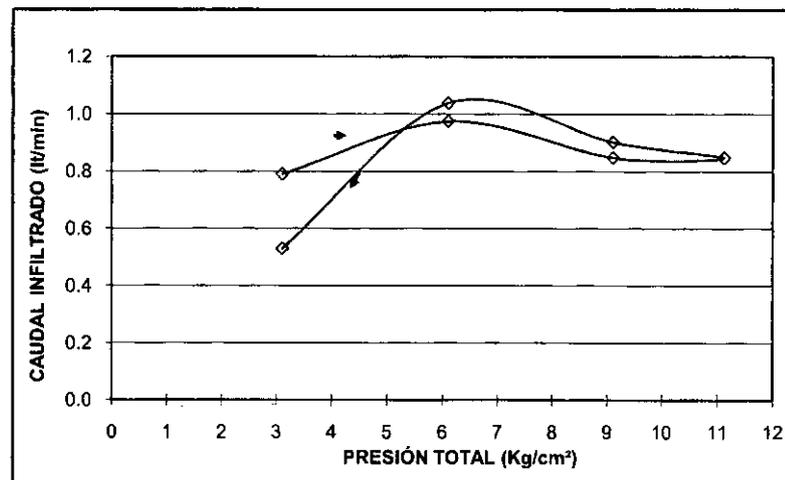
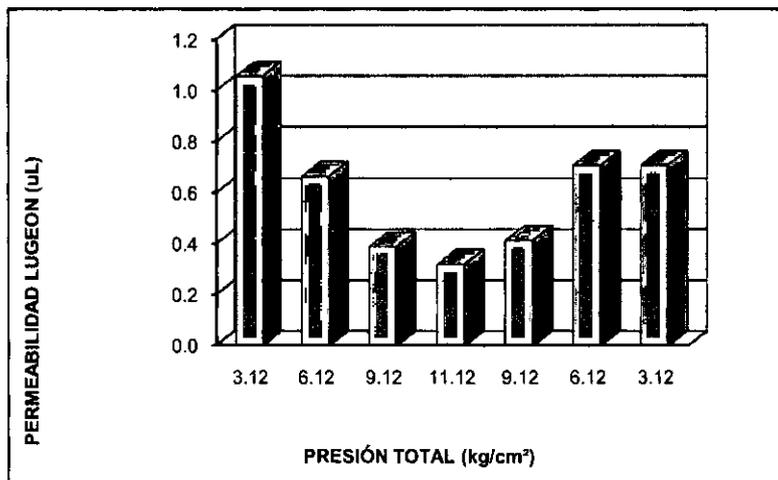
DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL : Anfibolita

FECHA DE EJECUCIÓN DEL ENSAYO : abril 3 de 2009

HORA INICIAL / HORA FINAL

INCLINACIÓN DE LA PERFORACIÓN $\beta = 0.00^\circ$
 ALTURA DEL MANÓMETRO $h_m = 0.60$ m
 PROFUNDIDAD DEL OBTURADOR $Z_o = 124.70$ m
 PROFUNDIDAD DEL ENSAYO $Z_F = 127.10$ m
 PROFUNDIDAD DEL NIVEL FREÁTICO $Z_{NF} = 10.60$ m

PRESIÓN MANÓMETRO (P_m en kg/cm ²)	PRESIÓN TOTAL (P_T en kg/cm ²)	TIEMPO (t en min)	LECTURA INICIAL (L_i en lt)	LECTURA FINAL (L_f en lt)	CAUDAL INFILTRADO (Q_i en lt/min)	PERM LUGEON (μ L)
2.00	3.12	10.0	370.00	377.90	0.79	1.06
5.00	6.12	10.0	383.00	392.74	0.97	0.66
8.00	9.12	10.0	397.22	405.70	0.85	0.39
10.00	11.12	10.0	414.00	422.48	0.85	0.32
8.00	9.12	10.0	424.00	433.02	0.90	0.41
5.00	6.12	10.0	434.50	444.88	1.04	0.71
2.00	3.12	10.0	444.20	449.50	0.53	0.71



INTERPRETACIÓN DEL ENSAYO :

VALOR REPRESENTATIVO DE LA PERMEABILIDAD LUGEON : 0.32 uL

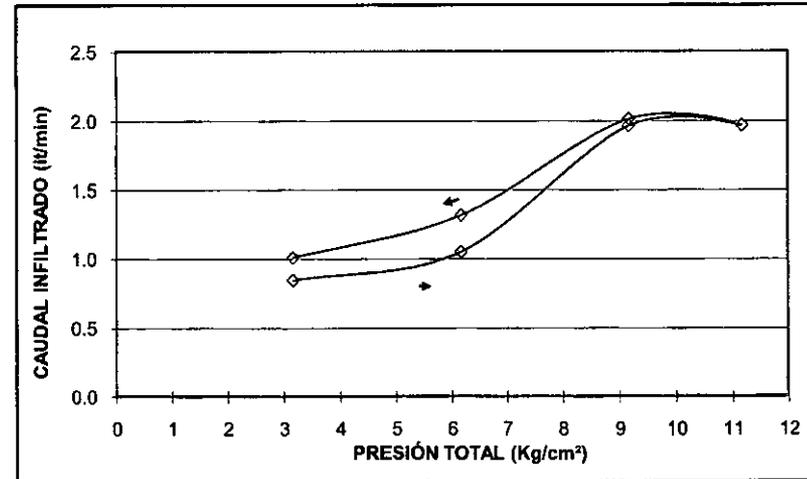
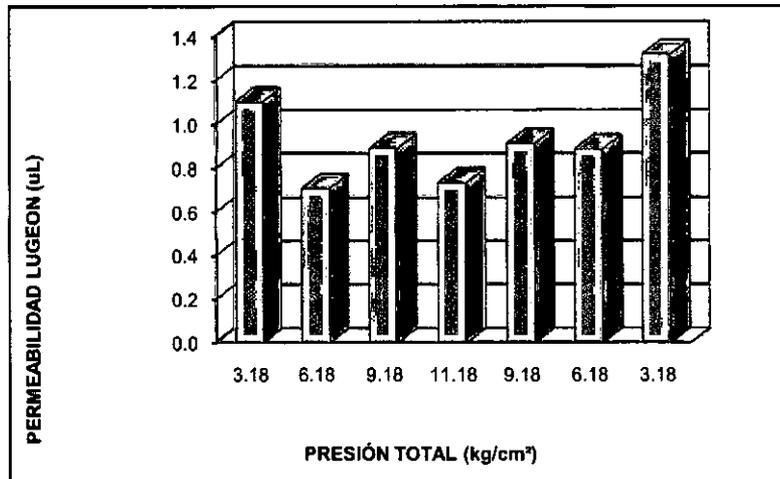
ENSAYOS DE PERMEABILIDAD "IN SITU" TIPO LUGEON

PERFORACIÓN : AO-TS-P-2
 DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL : Anfibolita

FECHA DE EJECUCIÓN DEL ENSAYO : abril 4 de 2009
 HORA INICIAL / HORA FINAL

INCLINACIÓN DE LA PERFORACIÓN $\beta = 0.00^\circ$
 ALTURA DEL MANÓMETRO $h_m = 0.60$ m
 PROFUNDIDAD DEL OBTURADOR $Z_o = 108.00$ m
 PROFUNDIDAD DEL ENSAYO $Z_F = 110.40$ m
 PROFUNDIDAD DEL NIVEL FREÁTICO $Z_{NF} = 11.21$ m

PRESIÓN MANÓMETRO (P_m en kg/cm ²)	PRESIÓN TOTAL (P_T en kg/cm ²)	TIEMPO (t en min)	LECTURA INICIAL (L_i en lt)	LECTURA FINAL (L_f en lt)	CAUDAL INFILTRADO (Q_i en lt/min)	PERM. LUGEON (μ L)
2.00	3.18	10.0	640.30	648.72	0.84	1.10
5.00	6.18	10.0	653.00	663.48	1.05	0.71
8.00	9.18	10.0	670.00	689.60	1.96	0.89
10.00	11.18	10.0	704.50	724.14	1.96	0.73
8.00	9.18	10.0	725.50	745.60	2.01	0.91
5.00	6.18	10.0	748.50	761.64	1.31	0.89
2.00	3.18	10.0	762.70	772.76	1.01	1.32



INTERPRETACIÓN DEL ENSAYO :

VALOR REPRESENTATIVO DE LA PERMEABILIDAD LUGEON : 0.73 μ L

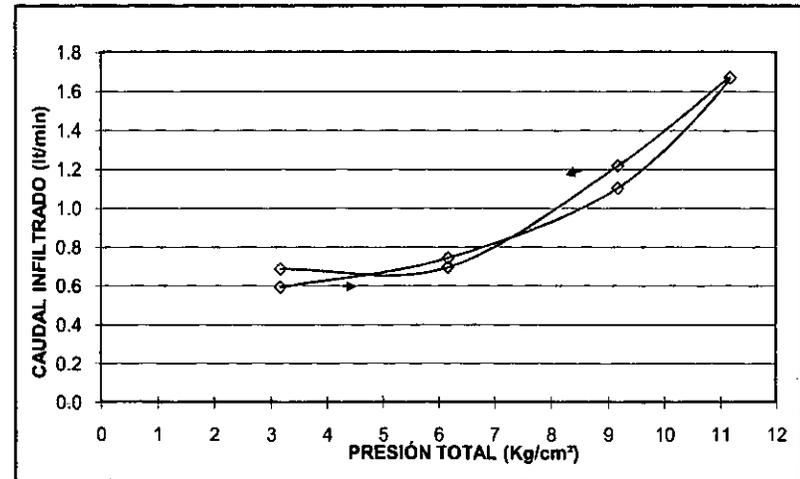
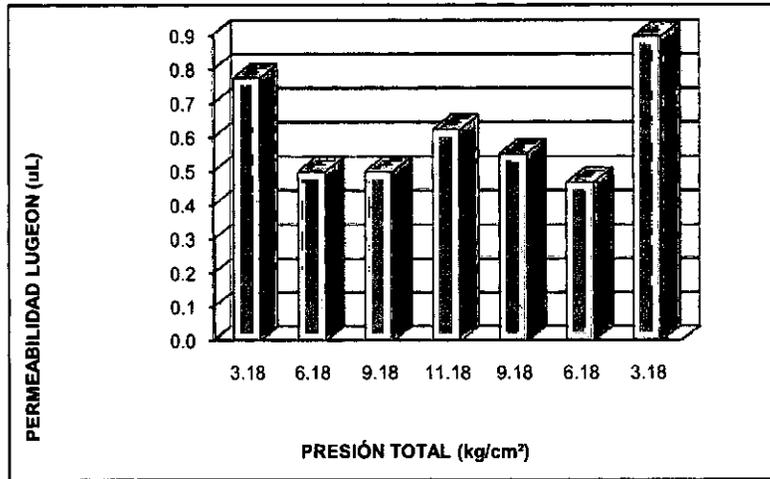
ENSAYOS DE PERMEABILIDAD "IN SITU" TIPO LUGEON

PERFORACIÓN : AO-TS-P-2
DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL : Anfibolita

FECHA DE EJECUCIÓN DEL ENSAYO abril 4 de 2009
HORA INICIAL / HORA FINAL

INCLINACIÓN DE LA PERFORACIÓN β = 0.00 °
ALTURA DEL MANÓMETRO h_m = 0.60 m
PROFUNDIDAD DEL OBTURADOR Z_o = 98.00 m
PROFUNDIDAD DEL ENSAYO Z_F = 100.40 m
PROFUNDIDAD DEL NIVEL FREÁTICO Z_{NF} = 11.21 m

PRESIÓN MANÓMETRO (P_m en kg/cm ²)	PRESIÓN TOTAL (P_T en kg/cm ²)	TIEMPO (t en min)	LECTURA INICIAL (L_i en lt)	LECTURA FINAL (L_f en lt)	CAUDAL INFILTRADO (Q_i en lt/min)	PERM. LUGEON (uL)
2.00	3.18	10.0	782.00	787.90	0.59	0.77
5.00	6.18	10.0	791.50	798.90	0.74	0.50
8.00	9.18	10.0	800.60	811.60	1.10	0.50
10.00	11.18	10.0	815.00	831.68	1.67	0.62
8.00	9.18	10.0	833.16	845.30	1.21	0.55
5.00	6.18	10.0	845.90	852.82	0.69	0.47
2.00	3.18	10.0	852.60	859.44	0.68	0.90



INTERPRETACIÓN DEL ENSAYO :

VALOR REPRESENTATIVO DE LA PERMEABILIDAD LUGEON 0.62 uL

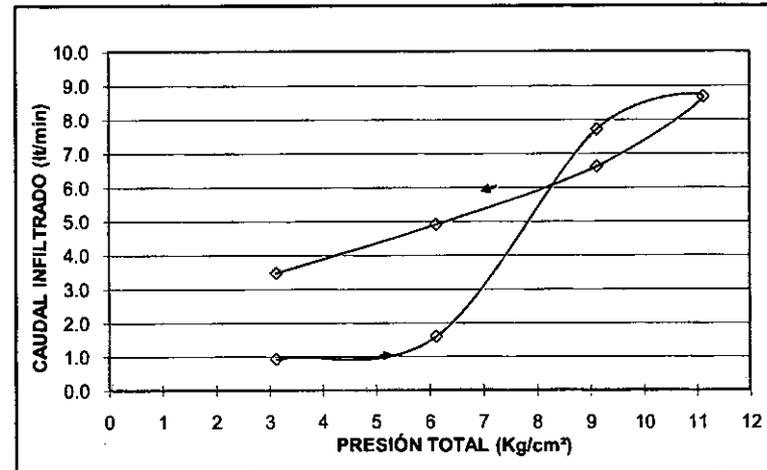
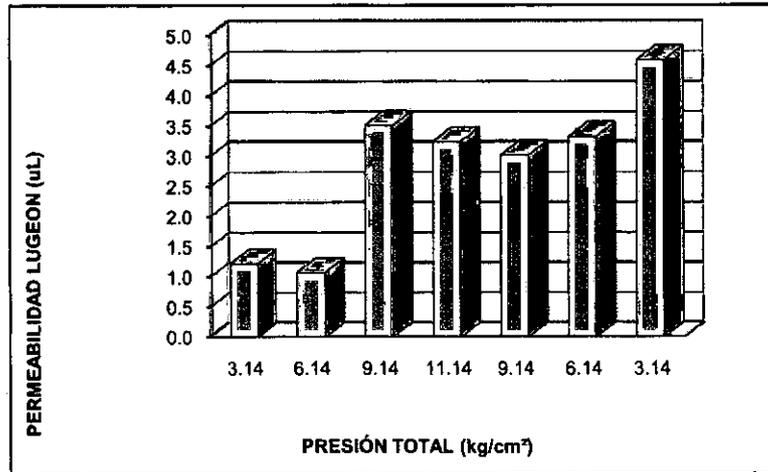
ENSAYOS DE PERMEABILIDAD "IN SITU" TIPO LUGEON

PERFORACIÓN : AO-TS-P-2
DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL : Anfibolita

FECHA DE EJECUCIÓN DEL ENSAYO abril 4 de 2009
HORA INICIAL / HORA FINAL

INCLINACIÓN DE LA PERFORACIÓN β = 0.00 °
ALTURA DEL MANÓMETRO h_m = 0.60 m
PROFUNDIDAD DEL OBTURADOR Z_o = 79.70 m
PROFUNDIDAD DEL ENSAYO Z_F = 82.10 m
PROFUNDIDAD DEL NIVEL FREÁTICO Z_{NF} = 10.80 m

PRESIÓN MANÓMETRO (P_m en kg/cm ²)	PRESIÓN TOTAL (P_T en kg/cm ²)	TIEMPO (t en min)	LECTURA INICIAL (L_i en lt)	LECTURA FINAL (L_f en lt)	CAUDAL INFILTRADO (Q_i en lt/min)	PERM. LUGEON (uL)
2.00	3.14	10.0	867.50	876.66	0.92	1.22
5.00	6.14	10.0	883.40	899.21	1.58	1.07
8.00	9.14	10.0	962.00	1039.00	7.70	3.51
10.00	11.14	10.0	61.00	147.58	8.66	3.24
8.00	9.14	10.0	153.00	219.06	6.61	3.01
5.00	6.14	10.0	223.00	271.92	4.89	3.32
2.00	3.14	10.0	275.60	310.18	3.46	4.59



INTERPRETACIÓN DEL ENSAYO :

VALOR REPRESENTATIVO DE LA PERMEABILIDAD LUGEON 3.01 uL

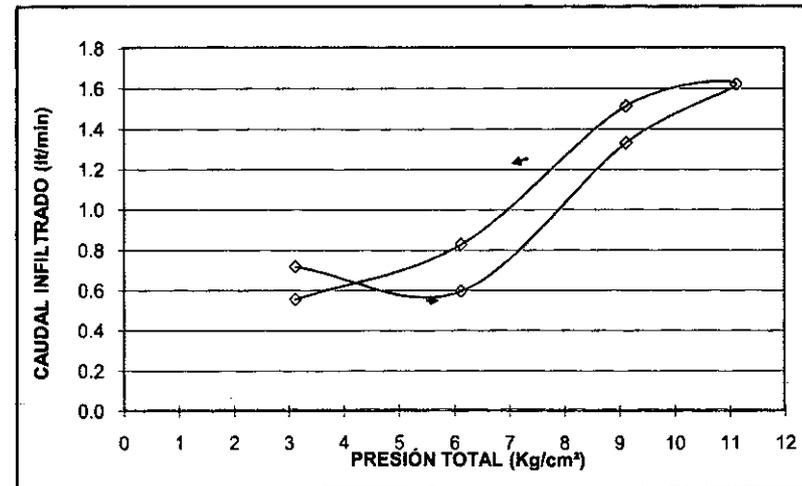
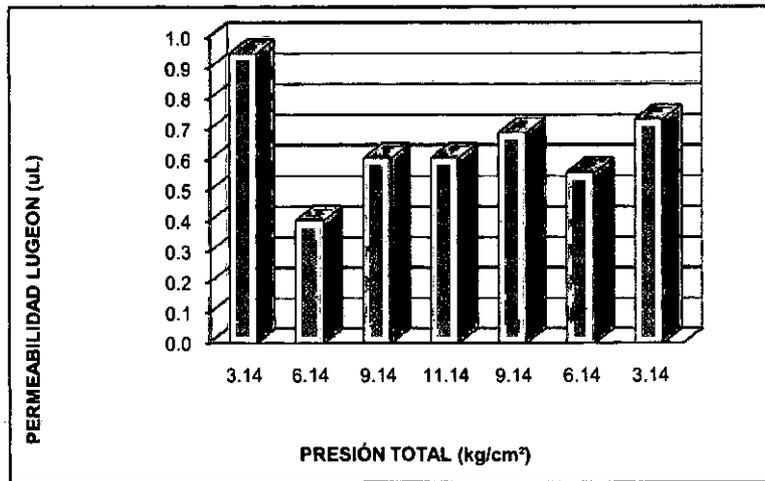
ENSAYOS DE PERMEABILIDAD "IN SITU" TIPO LUGEON

PERFORACIÓN : AO-TS-P-2
DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL : Anfibolita

FECHA DE EJECUCIÓN DEL ENSAYO : abril 6 de 2009
HORA INICIAL / HORA FINAL

INCLINACIÓN DE LA PERFORACIÓN $\beta = 0.00^\circ$
 ALTURA DEL MANÓMETRO $h_m = 0.60$ m
 PROFUNDIDAD DEL OBTURADOR $Z_o = 65.30$ m
 PROFUNDIDAD DEL ENSAYO $Z_F = 67.70$ m
 PROFUNDIDAD DEL NIVEL FREÁTICO $Z_{NF} = 10.80$ m

PRESIÓN MANÓMETRO (P_m en kg/cm ²)	PRESIÓN TOTAL (P_T en kg/cm ²)	TIEMPO (t en min)	LECTURA INICIAL (L_i en lt)	LECTURA FINAL (L_f en lt)	CAUDAL INFILTRADO (Q_i en lt/min)	PERM. LUGEON (μ L)
2.00	3.14	10.0	318.60	325.74	0.71	0.95
5.00	6.14	10.0	330.60	336.52	0.59	0.40
8.00	9.14	10.0	340.00	353.28	1.33	0.61
10.00	11.14	10.0	360.00	376.18	1.62	0.61
8.00	9.14	10.0	379.00	394.10	1.51	0.69
5.00	6.14	10.0	394.30	402.54	0.82	0.56
2.00	3.14	10.0	402.10	407.62	0.55	0.73



INTERPRETACIÓN DEL ENSAYO :

VALOR REPRESENTATIVO DE LA PERMEABILIDAD LUGEON : 0.40 μ L

**CORNARE
GESTION DOCUMENTAL
CONTROL DE ANEXOS**

RADICADO

EXPEDIENTE 19100610

TIPO DE ANEXO	MEDIO (Cd's/ Documento)	UNIDAD (folios- unidad)	OBSERVACIONES
CD'S			
DAA-DIAGNOSTICO AMBIENTAL DE ALTERNATIVAS			
ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL			
FOTOS			
INFORME DE INTERVENTORIA			
INFORME FINAL DE CONTRATACION			
LIBRO-EMPASTADOS			
LICITACIONES			
MANUALES			
MAPAS			
PLAN DE MANEJO AMBIENTAL			
PLAN DE MANEJO FORESTAL			
PLANOS	Document 50: total Tomo 3 de 3		
VIDEO			
OTRO			
OTRO			

Nombre Funcionario que recibe Teresita Giraldo

Firma: Teresita Giraldo