



UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

ESTUDIO HIDRÁULICO DE AGUAS SUBTERRÁNEAS DE LA ZONA DE  
MONTURAQUI, SALAR DE ATACAMA, CHILE

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

PEDRO IGNACIO BRAVO CASTRO

PROFESOR GUÍA:  
YARKO NIÑO CAMPOS

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:  
JUVENAL LETELIER VILLALÓN  
DIEGO ARAVENA NOEMI

SANTIAGO DE CHILE

2021

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR  
AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL  
POR: PEDRO BRAVO CASTRO  
FECHA: 8 DE AGOSTO DE 2021  
PROF. GUÍA: YARKO NIÑO CAMPOS

## ESTUDIO HIDRÁULICO DE AGUAS SUBTERRÁNEAS DE LA ZONA DE MONTURAQUI SALAR DE ATACAMA, CHILE

En la cuenca del Salar de Atacama existen cantidades importantes de cobre y litio a nivel mundial. El desarrollo de la minería ha traído consigo la demanda por el recurso hídrico en la zona. En la parte sur de la cuenca del Salar, Minera Escondida Limitada, la más grande del mundo en producción de cobre. Realizó durante 21 años una extracción de agua dulce por un caudal máximo de 1400 l/s, usando alrededor 24 pozos de producción. Además, Minera Zaldívar posee un caudal de 400 l/s en el sector Negrillar, al norte de Monturaqui. El acuífero Monturaqui-Negrillar-Tilopozo (MNT), hasta 2019 contaba con una explotación de agua dulce de 1800 l/s. El bombeo sostenido de agua subterránea a altas tasas ha provocado descensos de nivel de agua en los pozos del orden de 100 m en Monturaqui. Los efectos combinados de las extracciones de Monturaqui y Negrillar se han medido en pozos de monitoreo ubicados a varios kilómetros de Negrillar hacia Tilopozo. La extracción no planificada puede estar causando interferencias a largo plazo con los pozos de Tilopozo, donde hay lagunas poco profundas. Esto último puede cambiar el delicado equilibrio hídrico y afectar el ecosistema de humedales existente, lo que podría ser un problema ambiental importante. Este trabajo presenta un modelo geológico 3D del acuífero, utilizando el software Geomodeller. El modelo da un contexto geoespacial al análisis de las pruebas de bombeo, especialmente, condiciones de contorno y permeabilidades de las unidades geológicas. Se infiere la presencia de un acuífero confinado y un acuífero libre de menor magnitud. Estos están formados principalmente por arenas con diferentes porcentajes de cenizas del Mioceno-Plioceno. Las transmisividades varían entre 500 m<sup>2</sup>/d a 1000 m<sup>2</sup>/d. Los pozos tienen una profundidad promedio de 300 metros en Monturaqui, algunos llegando al basamento. El espesor saturado promedio es de 170 m del acuífero Monturaqui. La gran cantidad de agua almacenada en el acuífero MNT (Anderson et al., 2002) ha permitido sostener la fuerte extracción, ya que el flujo pasante se ha estimado en unos 600 l/s, de todas maneras, existen discrepancias entre el volumen de recarga y la descarga en la zona de Tilopozo, dando sustento a la hipótesis de una conexión hidrogeológica más allá del límite topográfico de la cuenca. Un correcto monitoreo del acuífero permitirá estudiar la recuperación de niveles estáticos y establecer nuevos criterios a la hora de otorgar derechos de explotación, enfocados en la sostenibilidad del recurso hídrico y el monitoreo preventivo. El acuífero de Monturaqui, está en estrecha relación con el arco volcánico de Negrillar. La presencia del volcán Socompa en la cabecera del acuífero condiciona las propiedades químicas y térmicas de las aguas.

# Agradecimientos

En primer lugar, quiero agradecer a los profesores Yarko Niño y Juvenal Letelier por su buena disposición y contribución en este proceso. Además, agradecer a las personas con las que compartí por más de un año, miércoles a miércoles, en las reuniones en torno al Salar de Atacama, Pablo Mendoza, Santiago Monserrat y Borja Mir. También agradezco a Diego Aravena por sumarse a este proceso y aportar con sus correcciones.

No puedo dejar de agradecer a todas las personas que conocí a lo largo de la carrera que respondieron todas mis dudas e inquietudes a la hora de realizar este trabajo.

A mi mamá, papá y hermana que me apoyaron desde el inicio en este largo camino universitario, procurando siempre que tuviese las mejores condiciones para poder llevar a cabo mis estudios. A mis amigos de La Ligua, que aún perduran y que fueron parte de mi proceso en el colegio y universidad, Patiko, Pelu, Brunis y Petas.

Los compañeros de plan común, con los que compartí largas jornadas, Beto, Chung, Messi, Diego y tantos otros. Los de geología, con los que viví las mejores experiencias en terreno, Thomas, Hevia y todos los de campo 1. Los de civil con quienes dentro de las dificultades de la carrera hacíamos ese espacio de distensión, Dani, Vale, Javi, Hormiga Sergito, Boris y Pía.

Al equipo de Handball de Beauchef, a todos y cada uno de los integrantes con quienes compartí dentro y fuera de la cancha. A toda el área de deportes, profesores y funcionarios.

# Tabla de contenido

Tabla de contenido.....	iii
Índice de figuras.....	v
1 Introducción.....	1
1.1 Motivación.....	1
1.2 Objetivos.....	2
1.2.1 Objetivo General.....	2
1.2.2 Objetivos Específicos.....	2
1.3 Contenido del informe.....	2
2 Revisión bibliográfica.....	4
2.1 Geología.....	4
2.2 Hidrogeología.....	9
2.3 Modelos geológicos 3D.....	15
2.3.1 Geomodeller 3D.....	16
2.4 Hidráulica de aguas subterráneas.....	17
2.4.1 Parámetros hidráulicos.....	17
2.4.2 Pruebas hidráulicas.....	18
3 Metodología.....	20
3.1 Datos de entrada Geomodeller.....	20
3.1.1 Geología sondajes.....	20
3.1.2 Datos estructurales.....	23
3.2 Construcción del modelo geológico preliminar.....	23
3.2.1 Modelo escala regional Monturaqui-Negrillar-Tilopozo.....	23
3.2.2 Modelo escala local sector pozos de explotación Monturaqui.....	24
3.3 Pruebas de bombeo.....	26
4 Resultados.....	28
4.1 Modelo Monturaqui-Negrillar-Tilopozo.....	28
4.2 Modelo Monturaqui.....	33

4.3	Pruebas de bombeo.....	35
4.3.1	Prueba de gasto constante Monturaqui .....	35
4.3.2	Prueba Bombeo Negrillar .....	47
4.3.3	Cálculo de transmisividad y conductividad hidráulica .....	49
4.4	Funcionamiento del sistema.....	53
4.4.1	Edad y origen de las aguas aportantes al acuífero MNT .....	53
4.4.2	Esquema de flujo.....	56
5	Discusión.....	57
6	Conclusiones .....	60
7	Bibliografía .....	61
	Anexos.....	64
	Anexo A Estratigrafía sondajes MPW sector de Monturaqui y Negrillar .....	64
	Anexo B Perfiles geológicos Monturaqui.....	82

# Índice de figuras

Figura 2-1. Unidades geomorfológicas sector sur del Salar de Atacama. Fuente: Modificado de Horacio J. Harrington (1962). .....	5
Figura 2-2. Deposición de sedimentos arenosos y de ignimbrita sobre la cuenca. El esquema muestra que la unidad principal del acuífero es la Formación Salin que relleno la cuenca formada a partir movimientos extensivos. Fuente: CFC Ingenieros (2018). .....	6
Figura 2-3. Avalancha Volcán Socompa. La avalancha es la que actualmente cubre toda la cuenca de Monturaqui, lo que impide observar fallas o lineamientos en superficie. Fuente: Kelfoun et al., (2007.) .....	7
Figura 2-4. Unión de la carta Geológica Toconao 1:250.000 (segmento superior) y Carta Geológica Antofagasta 1:500.000(segmento inferior). Además, se incluye la delimitación del acuífero MNT, este ha sido establecido por parte de DGA y es la que actualmente se utiliza para los Estudios de Impacto ambiental. Fuente: Elaboración Propia a partir Ramirez, et al., (1982) y Boric et al., (1987). .....	8
Figura 2-5. Hoja Toconao y geología estructural en la zona de Negrillar. Se observan fallas normales orientacion Norte-Sur. Fuente : Modificado de Ramírez et al., (1982). .....	9
Figura 2-6. Equipotenciales y condiciones de borde en acuífero Monturaqui-Negrillar-Tilopozo. Las entradas de flujo se producen principalmente en Monturaqui y el Sur de Negrillar desde la Zona Este, los aportes desde el oeste se consideran despreciables. Fuente: Anderson et al., (2002). .....	10
Figura 2-7. Localización de Socompa. (A) Ubicación del sistema acuífero MNT en América del Sur; (B) entorno hidrogeológico del sistema acuífero MNT. La extensión del sistema acuífero MNT está representada por la línea de puntos e incluye el Valle de Monturaqui, los Volcánicos Negrillar y las secciones de Tilopozo del sistema acuífero. El Humedal de Tilopozo constituye el punto de descarga de aguas subterráneas del acuífero MNT al Salar de Atacama. Las estrellas identifican los volcanes Socompa (6051 m), Salín, Pular y Aracar dentro del arco volcánico actual. Los salares están ubicados detrás y dentro del arco volcánico y el altiplano - no se muestran los pequeños salares. Los pozos de producción se muestran como círculos de colores, con colores que denotan el tipo de agua según la clasificación realizada en Rissmann 2015 .....	12
Figura 2-8. Clasificación de las aguas en base a su composición química. Fuente: Rissmann et al., (2015) .....	13
Figura 2-9 Modelo conceptual del origen y mezcla de fuentes de solutos con el sistema acuífero MNT. Masa fl gradiente ux para fase de vapor hidrotermal secundaria ef fl ux asociado con Volcano Socompa está sombreado en rojo con masa decreciente fl ux al acuífero meteorológico somero con la distancia del edi volcánico fi ce. El aproximado fl La trayectoria de una recarga salina poco profunda desde el exterior de la extensión topográfica del sistema	

acuífero está sombreada en azul. Las sales evaporíticas se mezclan con aguas subterráneas meteorológicas poco profundas que están fuertemente en fl influido por la fase de vapor de bajo nivel flux de hidrotermal fl fluidos de un sistema hidrotermal profundo asociado con el Volcán Socompa (aguas Tipo 2). La baja permeabilidad de Negrillar Volcánicas restringe la mezcla de la recarga evaporítica en fase líquida y estas aguas subterráneas de tipo 1 exhiben una firma de bicarbonato predominantemente periférica. El contorno punteado representa la extensión del sistema MNT. (Para la interpretación de las referencias al color en este fi leyenda de la figura, se remite al lector a la versión web de este artículo). Fuente: Rissmann et al., (2015)..... 14

Figura 2-10. Modelo de resistividad 3D bajo el volcán Socompa en el sector este (Argentina). Fuente: INGEIS (2018). De color rojo se enmarca las resistividades menores a 5 Ohm-m, lo que se considera anomalía de conductividad y se asocia a actividad geotermal. .... 15

Figura 2-11 a) Puntos de contactos litológicos y estructuras formando un campo potencial; b) contacto isolínea o litológico rastreado según el campo potencial. Fuente: Mcinerney et al. (2005). .... 16

Figura 2-12. Ejemplo de Gráfico de diagnóstico de una prueba de bombeo. Fuente: Petrowiqui, Diagnostic Plots (2021). .... 19

Figura 3-1.Sondajes disponibles para ambos modelos geológicos 3D. fuente: Elaboración propia con datos extraídos de Informes de Evaluación Ambiental presentador por Minera Escondida Ltda. y Compañía Minera Zaldívar Ltda. La mayor concentración de sondajes se encuentra en la zona de Monturaqui debido a la fuerte explotación de la zona y a la renovación de los pozos en operación, los pozos dados de baja han sido utilizados como pozos de monitoreo. .... 21

3-2. Figura Vista en planta de las secciones creadas y los pozos existentes como los pozos creados en las zonas sin información de sondajes..... 24

Figura 3-3. Mapa geológico de Golder y perfiles transversales usados para el modelo de Monturaqui. El polígono anaranjado corresponde a la zona modelada. Fuente: Proyecto Monturaqui Minera Escondida Ltda. (2017). En total son 4 los perfiles ingresados al modelo, A-A`, B-B`, C-C` y D-D`, los perfiles se muestran en Anexo, sobre las fallas nuevamente se dice bastante poco, se podría asumir que son fallas inferidas. El tema de las fallas es relevante en la hidrogeología, ya que estas permiten el flujo a velocidades distintas que el medio poroso. .... 25

Figura 3-4 .Pozos de producción. Propiedad de Minera Escondida Limitada. .... 26

Figura 4-1. Unidades consolidadas del acuífero MNT. Unidades Arco volcánico de Negrillar y Volcán Socompa formados durante el Pleistoceno. Basamento formado por rocas volcánicas en el Paleozoico. Sierra de Almeida formada durante el Triásico..... 29

Figura 4-2. Basamento de Golder (2017). En líneas generales el modelo de Golder se centra la creación de un basamento rocoso, tomando como input la información proveniente

de sondajes, de igual manera que el basamento propuesto en este trabajo se presenta una caída de este en el sector de Negrillar. El modelo en su totalidad considera límites impermeables con rellenos no consolidados, no modela otras unidades geológicas relevantes, como el Volcán Socompa. Fuente: Golder (2017) .....	29
Figura 4-3. Resultado final modelo geológico del sector sur de la cuenca del Salar de Atacama. Las imágenes superiores corresponden a las cartas geológicas unificadas y simplificadas con el fin de lograr un modelo geológico 3D. A la derecha se encuentra el modelo resultante, el cual presenta al núcleo del salar de manera simplificada. ....	31
Figura 4-4. Modelo borde sur del núcleo del Salar de Atacama. Se incluye la secuencia de precipitación que forma el núcleo del Salar de Atacama. ....	32
Figura 4-5. Corte transversal acuífero Monturaqui-Negrillar-Tilopozo. En color Marrón el Volcán Socompa, el basamento color morado y el acuífero constituido principalmente por la formación Salin (Amarillo) y la ignimbrita Tucucaro (color celeste).....	33
Figura 4-6. Modelo del Basamento, sondajes y Topografía. En Monturaqui existen una gran cantidad de sondajes, tanto de pozos de explotación de aguas subterráneas que han sido dado de baja y actualmente son pozos de observación y monitoreo, como los actuales pozos de producción (MPW).....	34
Figura 4-7. Modelo Final, escala vertical x6. Respecto al modelo anterior que incluía todo el acuífero, en este se incluye la formación Purilactis (color verde), unidad poco permeable. ....	34
Figura 4-8. Gráfico log-log prueba caudal constante 71.4 l/s, pozo MPW-02. ....	35
Figura 4-9. Curva superior: Gráfico log-log descenso vs tiempo. Curva inferior: Derivada del descenso en función del tiempo. MPW-02. ....	36
Figura 4-10. Gráfico log-log prueba caudal constante 94.2 l/s, pozo MPW-08.....	37
Figura 4-11. Gráfico log-log descenso vs tiempo. Curva inferior: Derivada del descenso en función del tiempo. MPW-08.....	37
Figura 4-12. Gráfico log-log prueba caudal constante 50.5 l/s, pozo MPW-10.....	38
Figura 4-13. Curva superior: Gráfico log-log descenso vs tiempo. Curva inferior: Derivada del descenso en función del tiempo MPW-10.....	38
Figura 4-14. Gráfico log-log prueba caudal constante 52.9 l/s, pozo MPW-11.....	38
Figura 4-15. Curva superior: Gráfico log-log descenso vs tiempo. Curva inferior: Derivada del descenso en función del tiempo MPW-11.....	39
Figura 4-16. Gráfico log-log prueba caudal constante 60.8 l/s, pozo MPW-12. ....	39
Figura 4-17. Curva superior: Gráfico log-log descenso vs tiempo. Curva inferior: Derivada del descenso en función del tiempo, MPW-12.....	40
Figura 4-18. Gráfico log-log prueba caudal constante 40.3 l/s, pozo MPW-13.....	40
Figura 4-19. Curva superior: Gráfico log-log descenso vs tiempo. Curva inferior: Derivada del descenso en función del tiempo, pozo MPW-13 .....	40
Figura 4-20. Gráfico log-log prueba caudal constante 80.2 l/s, pozo MPW-09.....	41

Figura 4-21. Curva superior: Gráfico log-log descenso vs tiempo. Curva inferior: Derivada del descenso en función del tiempo, pozo PW-09.....	41
Figura 4-22. Gráfico log-log prueba caudal constante 37.8 l/s, pozo MPW-14.....	42
Figura 4-23. Curva superior: Gráfico log-log descenso vs tiempo. Curva inferior: Derivada del descenso en función del tiempo, pozo MPW-14 .....	42
Figura 4-24. Gráfico log-log prueba caudal constante 31.9 l/s, pozo MPW-15.....	43
Figura 4-25 Curva superior: Gráfico log-log descenso vs tiempo. Curva inferior: Derivada del descenso en función del tiempo, pozo MPW-15. ....	43
Figura 4-26. Gráfico log-log prueba caudal constante 101.1 l/s, pozo MPW-16.....	43
Figura 4-27 Curva superior: Gráfico log-log descenso vs tiempo. Curva inferior: Derivada del descenso en función del tiempo, pozo MPW-16. ....	44
Figura 4-28. Gráfico log-log prueba caudal constante 72.1 l/s, pozo MPW-17.....	44
Figura 4-29 Curva superior: Gráfico log-log descenso vs tiempo. Curva inferior: Derivada del descenso en función del tiempo, pozo MPW-17. ....	44
Figura 4-30. Gráfico log-log prueba caudal constante 60.4 l/s, pozo MPW-18.....	45
Figura 4-31. Curva superior: Gráfico log-log descenso vs tiempo. Curva inferior: Derivada del descenso en función del tiempo, pozo MPW-18. ....	45
Figura 4-32. Gráfico log-log prueba caudal constante 78.1 l/s, pozo MPW-19. ....	45
Figura 4-33. Curva superior: Gráfico log-log descenso vs tiempo. Curva inferior: Derivada del descenso en función del tiempo, pozo MPW-19 .....	46
Figura 4-34. Gráfico log-log prueba caudal constante 64.2 l/s, pozo MPW-20. ....	46
Figura 4-35. Curva superior: Gráfico log-log descenso vs tiempo. Curva inferior: Derivada del descenso en función del tiempo, pozo MPW-20. ....	46
Figura 4-36. Ubicación de los pozos NEP-5 (bombeo) y NEX-5. Ambos pozos se encuentran al norte de Monturaqui y en a la zona sur de Negrillar .....	47
Figura 4-37. Grafico descenso versus tiempo y derivada del descenso.....	48
Figura 4-38. Hoja Toconao y prolongacion de las fallas hace la zona de Negrillar y Moonturaqui. Fuente : Ramirez, C. y Gardeweg M. (1982). ....	48
Figura 4-39. Comportamiento de los pozos en las pruebas de bombeo. ....	50
Figura 4-40. Propiedades de los pozos de explotación de Monturaqui. ....	51
Figura 4-41. Eficiencia de los Pozos de Bombeo.....	52
Figura 4-42. Pozos con analisis quimico e isotopico. Fuente: Compañía Minera Zaldivar (2018). ....	53
Figura 4-43. Esquema de flujo de aguas subterráneas. (1) La recarga producto de la precipitación en zonas altas infiltra en la formación Salin, la cual se extiende fuera de la topografía de la cuenca. (2) El flujo proveniente de las zonas altas interactúa con los salares andinos. (3) La existencia del arco volcánico Negrillar y en particular el volcán Socompa genera flujos termales hacia Monturaqui. (4) y (5) Recarga hacia Monturaqui planteado por Rissmann et al., (2015). Las aguas definidas como tipo 1 son las que recargan hacia el	

acuífero libre, cercano a la formación Purilactis (unidad color verde, de baja permeabilidad). Rissmann plantea la existencia de un flujo casi directo desde la zona alta del arco volcánico hacia el pozo MPW-09 en el centro del acuífero. (6) Flujo hacia Tilopozo (único punto de descarga del acuífero MNT), el flujo se dentro la Unidad Salin y la Ignimbrita Tucucaro hasta llegar al margen donde se juntan las aguas ultra salobres del salar con aguas menos salobres provenientes del flujo del Sur. .... 56

Figura 5-1. Pozos de Monturaqui con concentración de Solidos Disueltos Totales (SDT) sobre los 4000 mg/l, pozos químicamente similares a MPW-09. El origen de las aguas con altas concentraciones difiere de lo planteado por Rissmann et al. (2015). .... 58

## Índice de tablas

Tabla 3-1. Resumen de las unidades geológicas modeladas (Modelo Acuífero MNT) y la asociación a la Hoja Toconao ..... 21

Tabla 3-2. Resumen de las unidades geológicas modeladas (Modelo Acuífero Monturaqui) y la asociación a la Hoja Toconao ..... 22

Tabla 3-3. Información recopilada sobre los pozos de bombeo de MEL ..... 27

Tabla 4-1. Transmisividad y conductividad hidráulica calculada en base a las pruebas de recuperación ..... 49

Tabla 4-2. Resultado del análisis isotópico de las aguas de los pozos de Monturaqui y Negrillar. .... 54

# 1 Introducción

## 1.1 Motivación

La demanda mundial de Litio se encuentra en un constante crecimiento. Actualmente el consumo de litio para baterías destinadas al segmento de transporte es uno de los recursos minerales que presenta las mayores tasas de crecimiento anuales. Chile posee alrededor del 52% de las reservas mundiales de litio. Parte de éstas se encuentran en forma de salmueras contenidas en el Salar de Atacama. Este es una de las cuencas endorreicas salinas más conocidas del mundo, por acumular las principales reservas de litio y contener ecosistemas muy sensibles (Marazuela et al., 2019). La vulnerabilidad del Salar ha derivado en una serie de estudios tanto por parte del Estado de Chile, para la administración y evaluación de recursos hídricos subterráneos (DGA, 2012), como por diversos investigadores, abarcando desde la geología e hidrología, hasta su particular clima y las relaciones geoquímicas que originan el litio (Godfrey, 2013). La interacción de estos y más factores dan origen a los complejos procesos que forman el Salar de Atacama y sus ecosistemas.

Los recursos hídricos en el salar generan un gran interés económico. Actualmente hay dos minas de cobre (Zaldívar y Escondida) que han extraído agua dulce de la cuenca del salar de Atacama, Minera Escondida Limitada (MEL), desde principio de los 90 hasta el 2020 que seso su extracción en la totalidad de los pozos, de los cuales extraía una caudal promedio de 1400 l/s los últimos años. Además, la salmuera es extraída por dos empresas (SQM y Albemarle), donde para producir carbonato de litio requieren de un alto porcentaje de evaporación.

Este estudio forma parte de un proyecto del AMTC titulado “Ulimate change impacts on water resources in the Salar de Atacama: implications on mining activities”. Específicamente este trabajo de título se centrará en la zona de explotación de agua dulce, conocido como el acuífero Monturaqui-Negrillar-Tilopozo. Dicho sector está en la parte sur de la cuenca del Salar de Atacama, cuyas aguas descargan hacia el núcleo del salar, aflorando por contraste de densidades en Tilopozo. Esta área es de gran interés medio ambiental debido a la existencia de lagunas y de vegetación, la cuales son parte de las preocupaciones de las comunidades de pueblos Atacameños y la autoridad medio ambiental de Chile.

## 1.2 Objetivos

### 1.2.1 Objetivo General

Este trabajo de título tiene como objetivo general, generar un modelo geológico 3D que sirva como herramienta, tanto para estimar parámetros hidráulicos, estimar recursos hídricos y cálculo de propiedades a partir de datos medidos en terreno (temperatura, parámetros químicos, geofísicos, etc.). De manera conjunta tiene como objetivo el análisis de pruebas de bombeo realizadas por parte de las empresas mineras, presentadas como solicitudes de derechos de agua ante la Dirección General de Aguas. Finalizando con la generación de un bosquejo de un modelo conceptual del funcionamiento del sistema hidrogeológico

### 1.2.2 Objetivos Específicos

Los objetivos específicos se detallan a continuación:

1. Clasificar la información disponible proveniente de los sondajes. Establecer criterios de selección y agrupación en unidades, que serán modeladas en Geomodeller
2. Crear y aplicar una metodología en Geomodeller para modelar depósitos no consolidados a través de la separación por eventos de deposición y creación de pozos ficticios en zonas con menor número de muestreos.
3. Crear un modelo geológico 3D de la zona que recopile y utilice la mayor cantidad de información recopilada
4. Analizar y comprender los resultados de las pruebas de bombeo.

## 1.3 Contenido del informe

Los contenidos del trabajo de título se describen a continuación:

**Capítulo 1 “Introducción”:** En este capítulo se expone la motivación y objetivos del trabajo de título junto a la estructura de éste.

**Capítulo 2 “Revisión bibliográfica”:** Se presentan los antecedentes revisados con relación al tema del informe. En primer lugar, se describe la geología a grandes rasgos y como se formó la cuenca en el tiempo, sobre la hidrogeología de la zona, se muestra el funcionamiento del acuífero y las curvas equipotenciales. Luego, se presenta la importancia y uso de los modelos 3D a nivel de ingeniería, especialmente enfocado en el software Geomodeller.

Finalmente se hace una revisión de las pruebas de bombeo y diferentes metodologías para su análisis.

**Capítulo 3 “Metodología”:** Se describe la metodología utilizada en todas las etapas del estudio para cumplir los objetivos propuestos. En primer lugar, se describe como las distintas descripciones geológicas se unifican para la realización del modelo en Geomodeller, de igual manera con los sondajes verticales. Por último, mediante el software AquiferTest se analizarán las pruebas de bombeo.

**Capítulo 4 “Resultados”:** En este capítulo se presentan y analizan los resultados obtenidos del modelo y de las pruebas de bombeo. Se presentan las fortalezas del modelo creado y en donde se obtienen resultados que podrían ser sujetos de mejora. El análisis hidrogeológico incluye la utilización de ambas herramientas, tanto el modelo geológico 3D como las pruebas de bombeo a través de las pruebas diagnóstico.

**Capítulo 5 “Discusión”:** En esta sección se exponen los resultados obtenidos y como se relacionan con la información disponible de estudios anteriores y en qué aspectos este trabajo aporta nuevos conocimientos de la zona.

**Capítulo 6 “Conclusión”:** Se plantean el cumplimiento de los objetivos propuestos para este trabajo de título y se enuncian las principales conclusiones.

# 2 Revisión bibliográfica

## 2.1 Geología

La geología de la zona ha sido descrita tanto en publicaciones como en Estudios de Impacto Ambiental (EIA), la zona genera un gran interés debido a la actividad Minera como también la existencia de áreas protegidas por su importancia geológica, turística y ancestral (presencia de Pueblos Atacameños). En cuanto a los trabajos relevantes que se han levantado en la zona destacan las cartas geológicas de Toconao y Antofagasta, las cuales abarcan desde la zona sur del núcleo del salar, hasta el borde inferior de la cuenca. Las cartas geológicas son:

- Ramirez, C. y Gardeweg, M. (1982). Carta geológica de Chile. Escala 1:250.000. Hoja de Toconao.
- Boric, Díaz y Maksaev (1987). Geología y yacimientos metalíferos de la Región de Antofagasta. Hoja 2 de 2 (Sector Sur). Escala 1:500.000. Región de Antofagasta. Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN).

Sobre las publicaciones, destacan 4 descripciones relacionadas con la geología del norte de Chile, centrados en la Formación Purilactis y los depósitos Socompa, con especial relevancia en la zona de Monturaqui y Negrillar. El volcán Socompa tiene un rol relevante en la topografía del sur de Monturaqui, debido a las avalanchas provenientes desde el volcán y al espesor de los rellenos volcánicos. Los trabajos utilizados corresponden a los siguientes:

- Flint et al 1989: Geochronology of the Purilactis Formation, Northern Chile: an insight into late cretaceous/early tertiary basin dynamics of the central Andes.
- Charrier, R., & Reutter, K.-J. (1994): The Purilactis Group of Northern Chile: Boundary Between Arc and Backarc from Late Cretaceous to Eocene.
- Kelfoun et al, 2008: Topographic reflection of the Socompa debris avalanche, Chile. Bulletin of Volcanology.
- Horacio J. Harrington (1962). Geology of parts of Antofagasta and Atacama provinces, northern chiles. Houston, Texas. Bulletin of the American Association of Petroleum Geologists vol. 45. no. 2 (february. 1961). pp. 169-197.

El marco geológico regional presenta cuatro unidades morfológicas principales, correspondientes a la Cordillera de la Costa, Depresión Central, Cordillera de Domeyko y Cordillera de los Andes, destacando como elemento morfológico estructural la Cordillera de Domeyko, importante considerar el volcán Socompa en la zona de Monturaqui. Todas estas unidades se pueden ver en la Figura 2-1.

# GEOLOGICAL SKETCH MAP PART OF THE PROVINCES OF ANTOFAGASTA AND ATACAMA

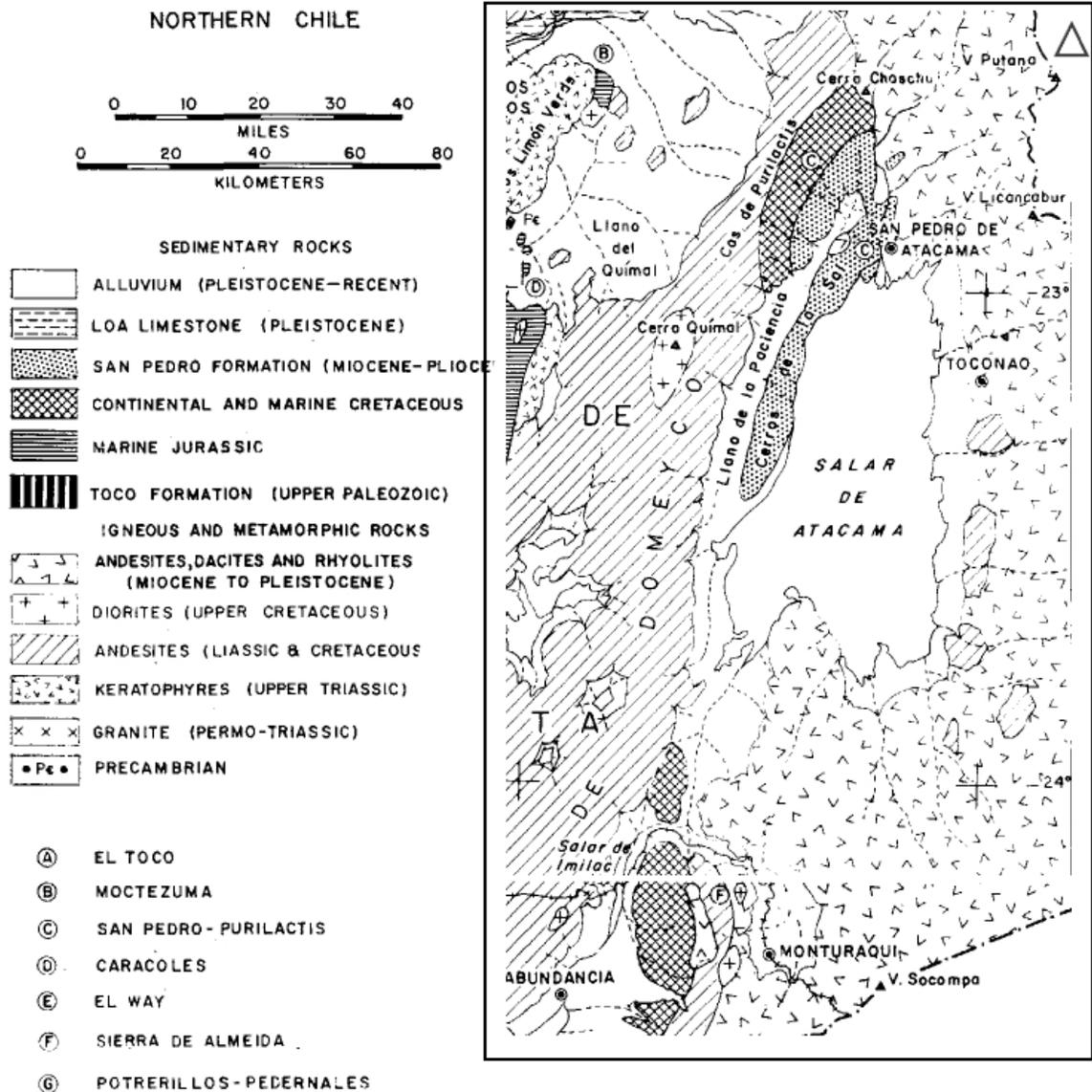


Figura 2-1. Unidades geomorfológicas sector sur del Salar de Atacama. Fuente: Modificado de Horacio J. Harrington (1962).

A continuación, se detallan cronológicamente las deposiciones de formaciones geológicas en la zona, la formación Purilactis, Estratos de Quebrada Salin, Ignimbrita Tucucaro y el volcanismo cuaternario.

La Formación Purilactis, de la Precordillera de Antofagasta, se depositó durante el Cretácico Superior-Paleoceno en una cuenca de antepaís desarrollada al este de la Cordillera de Domeyko, elevada durante un evento regional de deformación compresiva en el Cretácico 'medio'. El relleno de la Cuenca de Purilactis está formado por más de 3,5 km de rocas

sedimentarias continentales, que se organizan en varias secuencias, cuya granulometría aumenta hacia el techo ('coarsening-up sequences'). Estas son el resultado de la propagación hacia el este de sistemas de abanicos aluviales, probablemente relacionados con movimientos de fallas inversas (thrusts) en zonas más occidentales. (Flint et al 1989).

Posterior a la deposición de la formación Purilactis se produce la formación de Sierra Almeida. La Sierra Almeida es una cordillera longitudinal de unas 25 millas de largo y 10 de ancho. A lo largo del este bordea la "Cordillera Principal" entre Monturaqui y el Salar de Imilac. Cerca de la frontera argentina presenta una elevación de 10,165 pies, mientras que las alturas máximas son entre 14,100 y 14,400 pies. La Sierra de Almeida es famosa en Chile por las lutitas negras altamente bituminosas expuestas en una localidad conocida como Pular, que se encuentra en uno de los valles longitudinales a lo largo del flanco occidental de las montañas. Pular es el nombre de un enorme volcán al noreste de Monturaqui.

Tras la deposición de la Formación Purilactis, durante el Eoceno-Oligoceno, una gran falla de dirección general norte sur, ubicada en el margen oriental de Sierra de Almeida, produjo el hundimiento de todo el bloque oriental. Por otra parte, otra gran falla de dirección general noroeste, que pasa por la ladera poniente del cerro Salín, habría levantado el bloque ubicado al oriente de este, permitiendo la formación de una depresión intermedia, que originó una gran cuenca cerrada o semicerrada, con dirección general de drenaje hacia el norte. Este graben fue rellenado por sedimentos denominados Estratos de Quebrada Salín, unidad relevante en este estudio ya que esta constituye principalmente el acuífero Monturaqui. Interdigitada o suprayeciendo a los Estratos de Quebrada Salín, se desarrolló la unidad denominada Ignimbrita Tucucaro (Figura 2-2) (GFC Ingenieros, 2018).

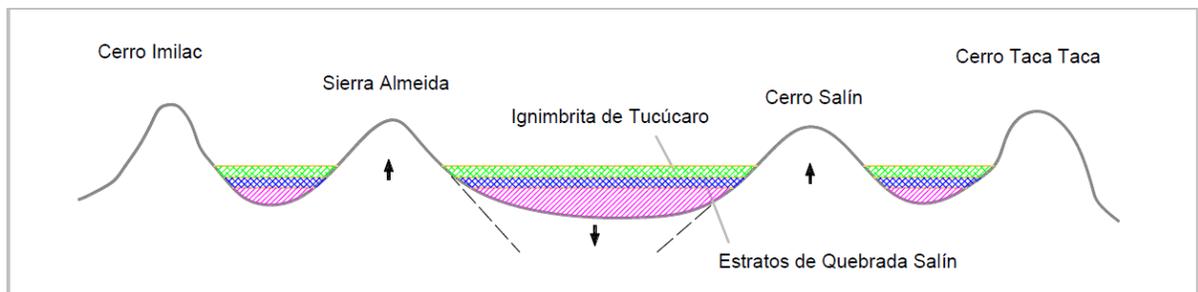


Figura 2-2. Deposición de sedimentos arenosos y de ignimbrita sobre la cuenca. El esquema muestra que la unidad principal del acuífero es la Formación Salin que relleno la cuenca formada a partir movimientos extensivos. Fuente: CFC Ingenieros (2018).

En lo que respecta a la tectónica, se produjeron grandes fallamientos, con movimiento de bloques, lo que habría originado dos graben (pampas Tilopozo y Quílvar) y un horst intermedio (Lomas de Tilocálar). Sobre el relleno sedimentario proveniente de los estratos de de Quebrada Salín se depositaron grandes espesores de material proveniente del

volcanismo cuaternario, que cubrieron prácticamente toda el área. El material proveniente del volcán Socompa genero grandes cambios geomorfológicos en la zona sur de Monturaqui. La avalancha formada por el colapso del sector del estratovolcán Socompa se extendió 40 km a través de una cuenca preexistente, formando una lámina de ~ 50 m de espesor medio. A medida que la avalancha incidió en los márgenes oeste y norte de la cuenca, se reflejó hacia atrás, formando un flujo secundario que continuó viajando 15 km por una pendiente suave en un ángulo oblicuo al flujo primario, preservándose el frente de la ola de retorno. (Kelfoun et al., 2007).

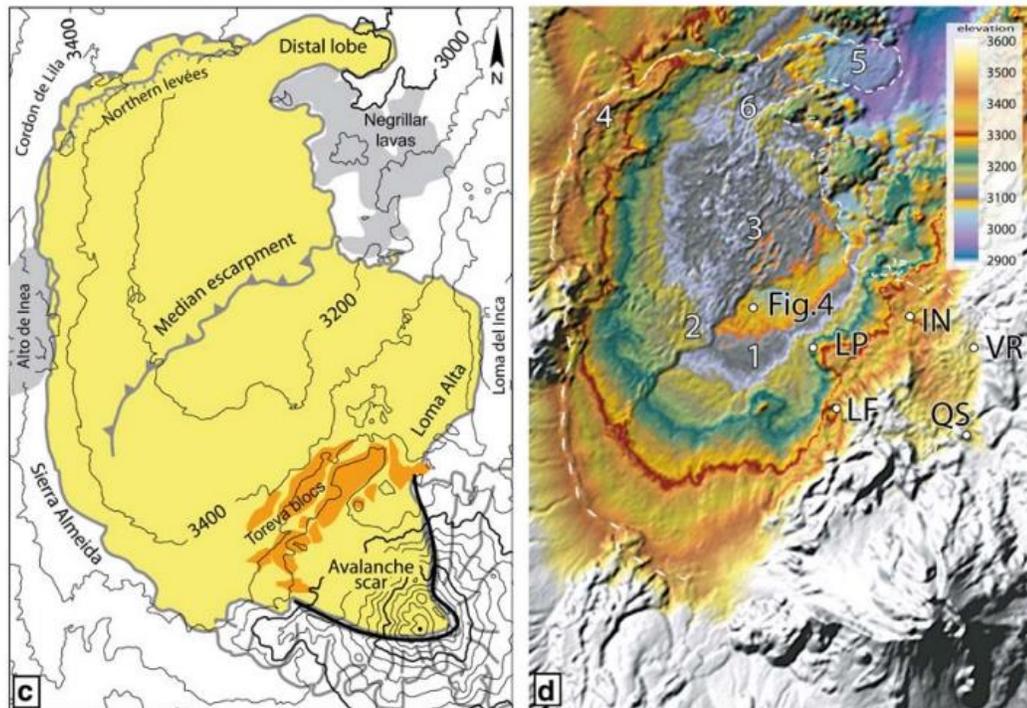


Figura 2-3. Avalancha Volcán Socompa. La avalancha es la que actualmente cubre toda la cuenca de Monturaqui, lo que impide observar fallas o lineamientos en superficie. Fuente: Kelfoun et al., (2007.)

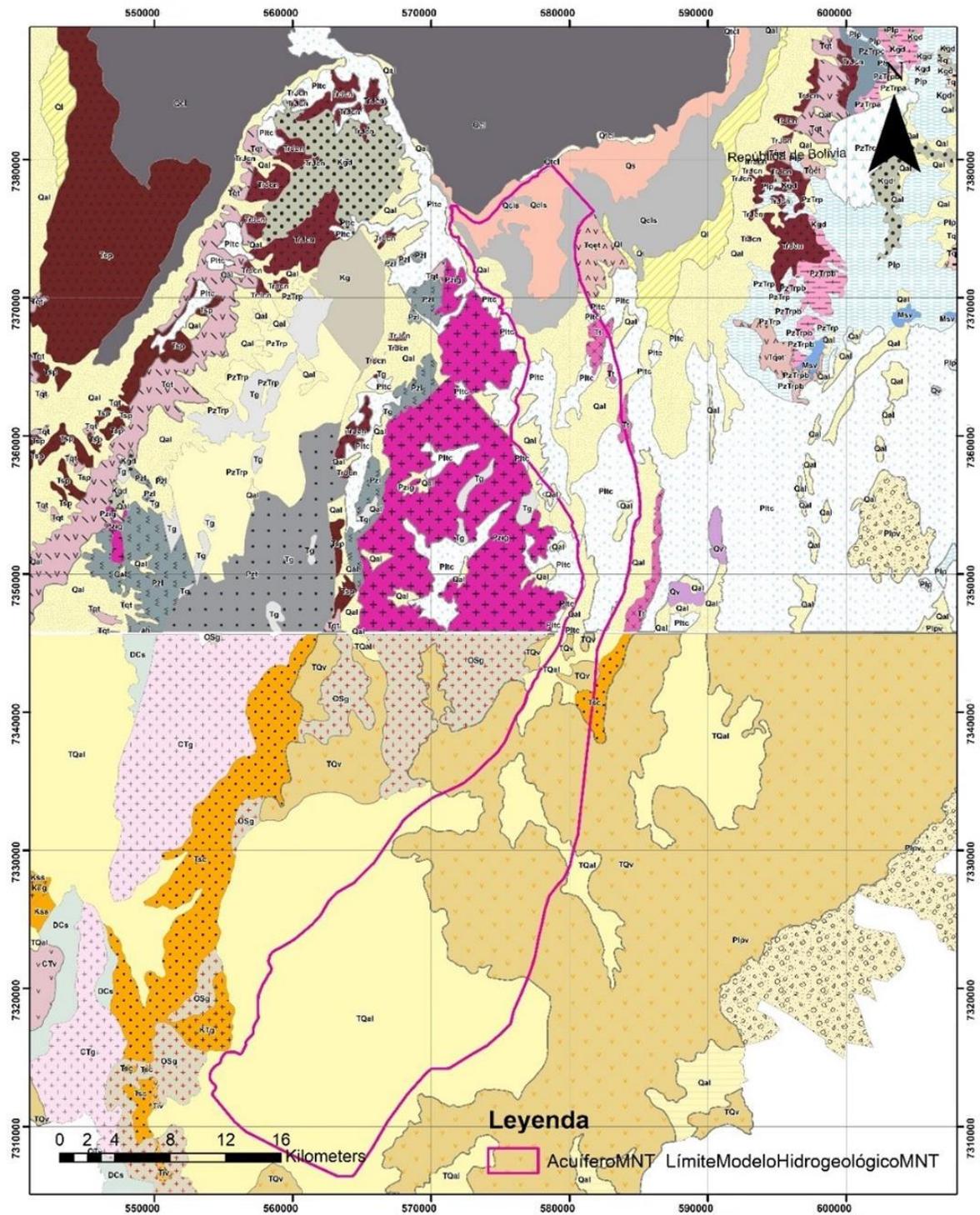


Figura 2-4. Unión de la carta Geológica Toconao 1:250.000 (segmento superior) y Carta Geológica Antofagasta 1:500.000(segmento inferior). Además, se incluye la delimitación del acuífero MNT, este ha sido establecido por parte de DGA y es la que actualmente se utiliza para los Estudios de Impacto ambiental. Fuente: Elaboración Propia a partir Ramirez, et al., (1982) y Boric et al., (1987).

## 2.2 Hidrogeología

La hidrogeología de la zona ha sido bastante estudiada, llegando a ciertos consensos que se resumen a continuación, el cual describe rasgos generales del acuífero MNT y su funcionamiento. Los principales trabajos revisados son:

- Anderson et al., 2002. Sustainable groundwater development in arid, high Andean basins. Geological Society, London, Special Publications 2002, v.193.p133-144.
- Rissmann et al., 2015. The origin of solutes within the groundwaters of a high Andean aquifer. Chemical Geology Volume 396, 9 March 2015, Pages 164-181

El acuífero Monturaqui-Negrillar-Tilopozo (MNT) se encuentra al pie de los Andes en II Región de Chile. Ocupa un canal estructural aproximadamente de 60 km de largo, con elevaciones superficiales desde unos 3200 m.s.n.m. en la zona sur (Monturaqui), cayendo a unos 2300 m.s.n.m. en el norte (humedal de Tilopozo), donde el acuífero descarga al sureste del margen del Salar de Atacama. El acuífero está cubierto en el área de Monturaqui por extensos depósitos de cenizas y escombros resultantes de la violenta erupción y el colapso parcial del Volcán Socoma entre 10.000 y 500 años atrás (Francis et al., 1985).

Del párrafo anterior destaca la frase “canal estructural de unos 60 km de largo”, la geología estructural de la zona centro norte del acuífero MNT se obtiene de la Hoja Toconao, las fallas mapeadas en esta corresponden a fallas normales norte-sur.

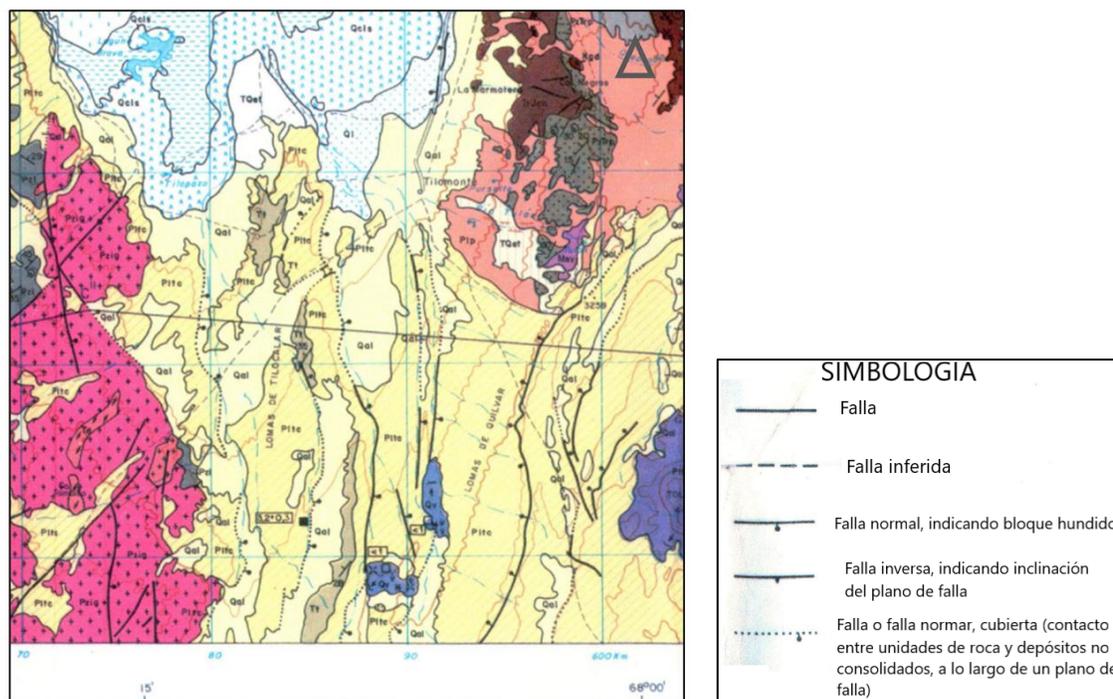


Figura 2-5. Hoja Toconao y geología estructural en la zona de Negrillar. Se observan fallas normales orientacion Norte-Sur. Fuente : Modificado de Ramírez et al., (1982).

Las direcciones de flujo se muestran en la Figura 2-6, extraída de Anderson, en donde los principales aportes de agua ingresan al acuífero en la zona sur y conjunto con aportes laterales.

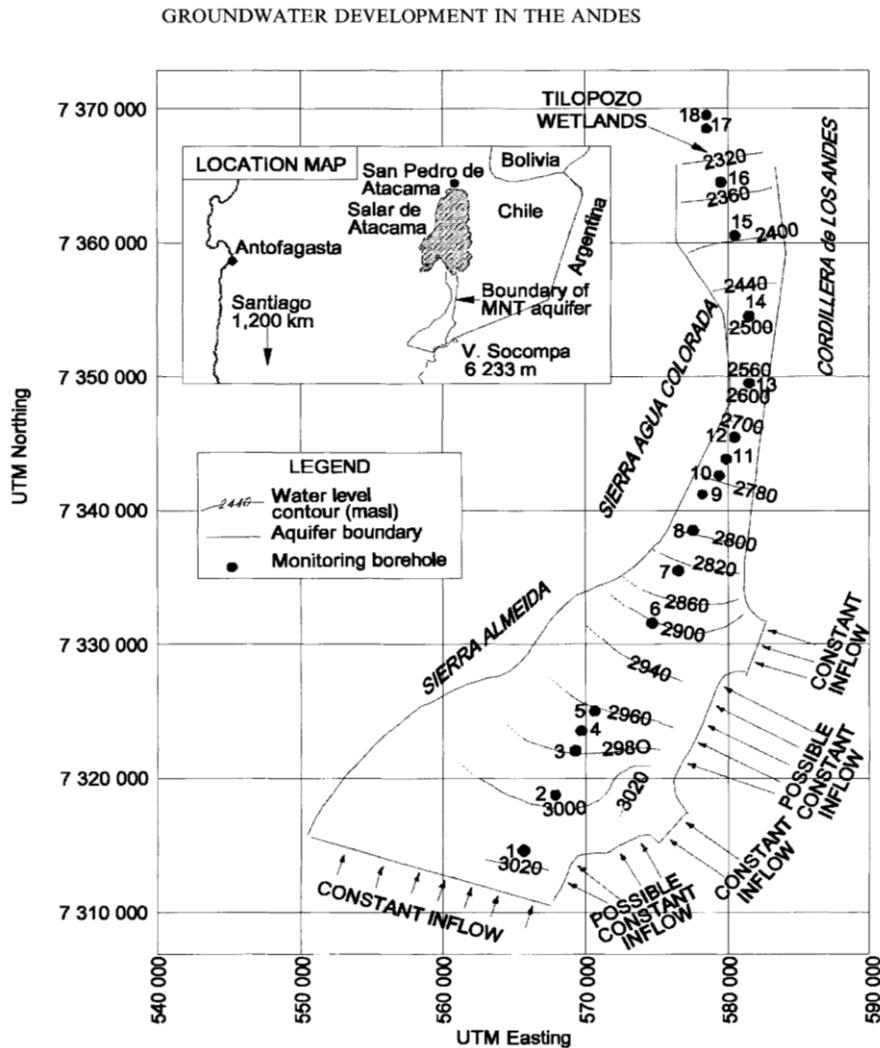


Figura 2-6. Equipotenciales y condiciones de borde en acuífero Monturaqui-Negrillar-Tilopocho. Las entradas de flujo se producen principalmente en Monturaqui y el Sur de Negrillar desde la Zona Este, los aportes desde el oeste se consideran despreciables. Fuente: Anderson et al., (2002).

Los resultados muestran que los valores de transmisividad del acuífero oscilan entre 500 y 2500 m<sup>2</sup>/d en Monturaqui, y entre 3000 y 4500 m<sup>2</sup>/d en pendiente en Negrillar. Datos limitados en el área de Tilopocho indica una transmisividad de alrededor de 1500 m<sup>2</sup>/d. Los valores de conductividad hidráulica oscilan entre 1,6 y 10 m/d en toda la longitud de la cuenca. Los valores de almacenamiento confinado son de alrededor de 1x10<sup>-3</sup>, mientras que el rendimiento específico se ha estimado en alrededor del 10%. La determinación empírica del rendimiento específico solo será posible después de un bombeo prolongado. (Anderson et al., 2002).

Mediante el uso de la ley de Darcy sugiere un flujo de alrededor de 400 l/s en la zona de Monturaqui, aumentando a alrededor de 900 l/s en el Negrillar y áreas de Tilopozo. Esto implica que alrededor del 40% de la afluencia ocurre en el área de Monturaqui, alrededor del 60% entre Monturaqui y Negrillar, y ninguno al norte de Negrillar (Anderson et al., 2002).

Siguiendo la línea del párrafo anterior, se sugiere que la descarga total de agua subterránea es entre 400 y 900 l/s para el acuífero MNT. Existe una discrepancia significativa entre estimaciones del flujo de agua subterránea por recarga estimación de 2500 l/s y flujo y estimación de descarga. Una posible explicación para esto son las entradas de agua subterránea desde fuera de la cuenca topográfica del Cuenca MNT. Se sabe que la Formación Salin se extiende hacia el este a gran altura, y es posible que esto pueda representar una extensión de la cuenca de captación de agua subterránea fuera de la topo-captación gráfica. Este fenómeno se ve el norte de Chile, donde se encuentran acuíferos más antiguos invadidos por rocas volcánicas posteriores, formando puntos locales de altos topográficos (Anderson et al., 2002).

Los aportes laterales hacia el acuífero son estudiados con mayor profundidad en el trabajo de Rissmann et al., (2015), habla sobre la geoquímica de la zona sur del acuífero MNT, específicamente de Monturaqui y una parte de Negrillar. Rissmann suma otro componente de investigación que son los flujos termales producto de la actividad volcánica de la zona, a continuación, en la Figura 2-7 se observa la definición y separación que hace Rissmann del acuífero MNT.

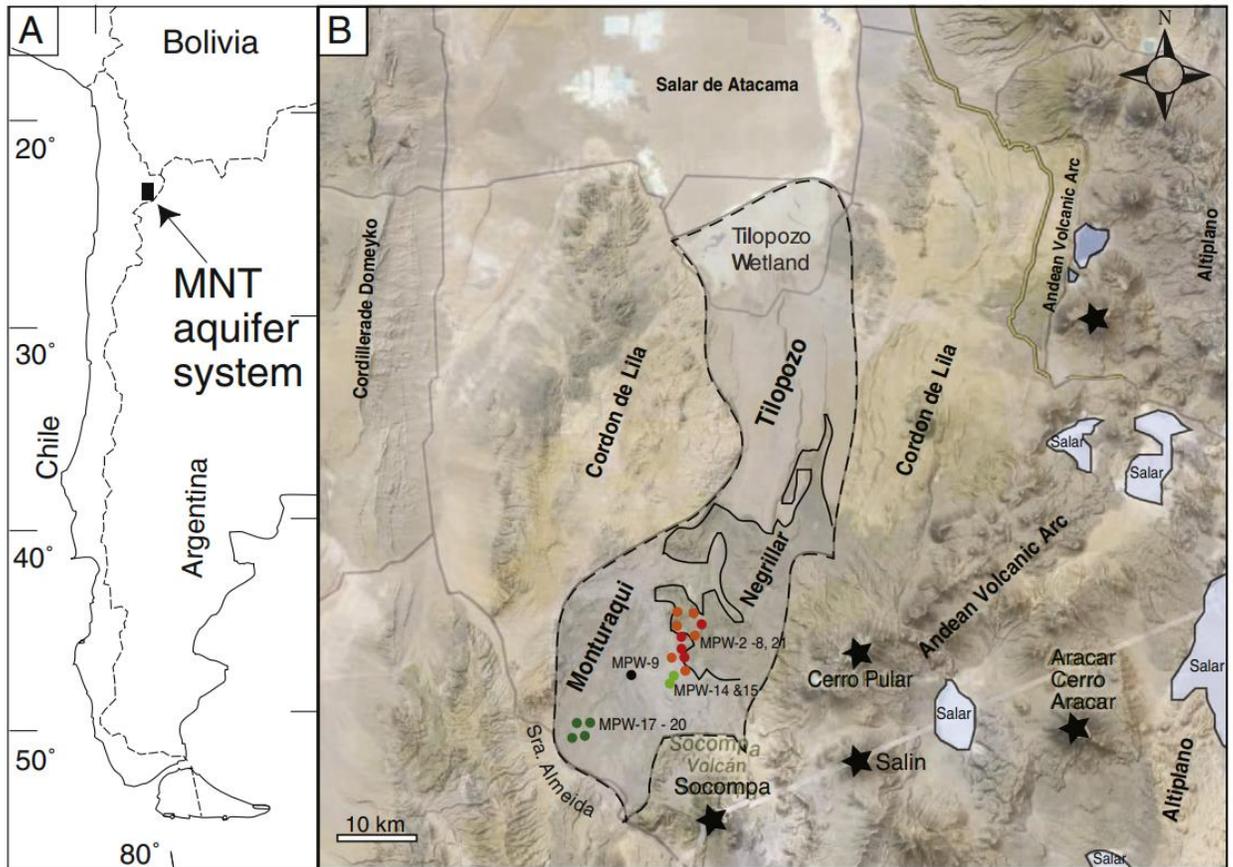


Figura 2-7. Localización de Socompa. (A) Ubicación del sistema acuífero MNT en América del Sur; (B) entorno hidrogeológico del sistema acuífero MNT. La extensión del sistema acuífero MNT está representada por la línea de puntos e incluye el Valle de Monturaqui, los Volcánicos Negrillar y las secciones de Tilopozo del sistema acuífero. El Humedal de Tilopozo constituye el punto de descarga de aguas subterráneas del acuífero MNT al Salar de Atacama. Las estrellas identifican los volcanes Socompa (6051 m), Salín, Pular y Aracar dentro del arco volcánico actual. Los salares están ubicados detrás y dentro del arco volcánico y el altiplano - no se muestran los pequeños salares. Los pozos de producción se muestran como círculos de colores, con colores que denotan el tipo de agua según la clasificación realizada en Rissmann 2015.

El modelo conceptual presentado propone que fuga basal de salmueras evaporíticas de los salares activos, dentro del arco alto altiplano/volcánico, son activamente arrastrados por el flujo de agua subterránea subregional y transportados al sistema acuífero MNT donde se mezclan con solutos derivados de la interacción hidrotermal secundaria gas-agua-roca. El trabajo proporciona detalles sobre el origen y los procesos que controlan la composición de solutos de las afluencias de aguas subterráneas al Salar de Atacama en el desierto de Atacama, el cual es volcánicamente activo e hiperárido, y pueden ser de importancia para los modelos conceptuales de evolución de salmuera evaporítica, reciclaje de salmueras evaporíticas e hidrotermalismo en regiones áridas.

Además, Rissmann realiza una clasificación de las aguas en base a los elementos mayores, menores, parámetros fisicoquímicos e isotopía. Para ello realiza análisis estadístico en clúster

de pozos, estos corresponden a los pozos MPW, los cuales son propiedad de Minera Escondida Ltda. y los mismos realizaron la extracción de agua desde el acuífero hasta el año 2019 por un caudal de 1400 l/s en la etapa final. La clasificación se realiza por métodos estadísticos, el resultado se muestra en el diagrama de la Figura 2-8. Destaca que todas las aguas son catalogadas como “térmicas” con temperaturas entre 27 y 35 °C.

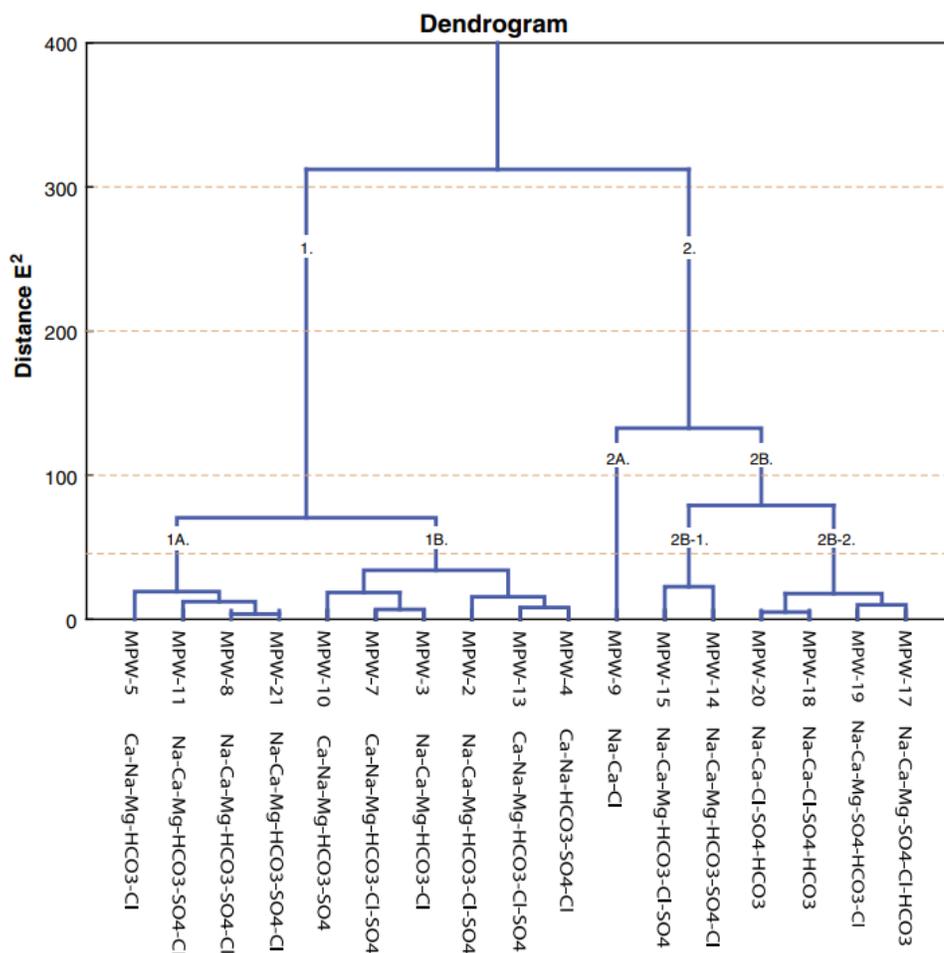


Figura 2-8. Clasificación de las aguas en base a su composición química. Fuente: Rissmann et al., (2015).

Para el acuífero de MNT se propone un modelo conceptual que habla de las fuentes de solutos y la evolución hidroquímica de las aguas subterráneas de MNT (Figura 2-9). En términos generales, la evidencia a escala local y regional apoya la hipótesis de mezcla entre: (i) aguas subterráneas meteóricas influenciadas por la desgasificación difusa de los componentes de la fase de vapor de nivel subyacente (Volcano Socompa), y: (ii) una salmuera evaporítica, oxidante y alcalina que probablemente se origina dentro del arco volcánico.

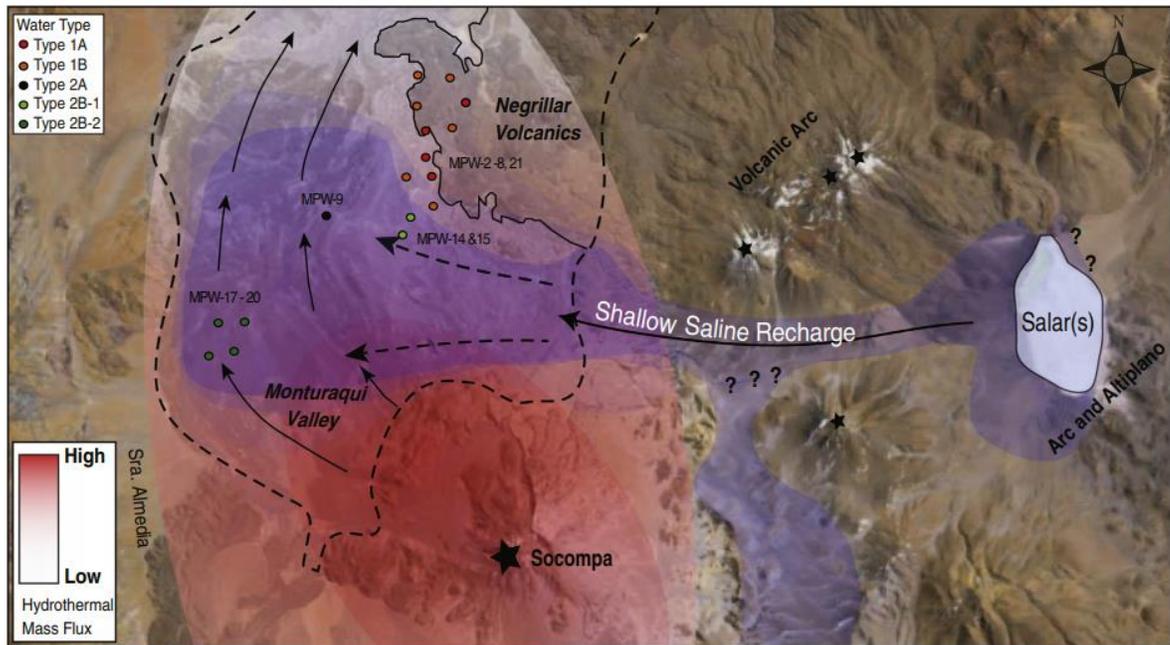


Figura 2-9. Modelo conceptual del origen y mezcla de fuentes de solutos con el sistema acuífero MNT. Gradiente de flujo de secundario de fase de vapor hidrotermal asociado con el volcán Socompa está sombreado en rojo. La ruta de flujo aproximada de una recarga salina poco profunda desde el exterior a la extensión topográfica del sistema acuífero está sombreada en azul. Las sales evaporíticas se mezclan con aguas subterráneas meteóricas poco profundas que están fuertemente influenciadas por fluidos hidrotermales de un sistema hidrotermal profundo asociado con el Volcán Socompa (aguas Tipo 2). La baja permeabilidad de los volcanes de Negrillar restringe la mezcla de la recarga evaporítica en fase líquida y estas aguas subterráneas de tipo 1 exhiben una firma de bicarbonato predominantemente periférica. El contorno punteado representa la extensión de la MNT sistema. Fuente: Rissmann et al., (2015).

En el estudio realizado por la Universidad de Buenos Aires, a través de su instituto de Geocronología y Geología Isotópica, cuyo objetivo fue intentar determinar la presencia de actividad geotermal a partir de las anomalías de resistividad obtenidas con datos magnetotellúricos (MT). Para ello se midieron 34 estaciones distribuidas uniformemente entre la Quebrada del Agua y la Laguna Socompa. Los datos obtenidos se procesaron y se invirtieron para obtener un modelo 3D que permita determinar la posible continuidad de las zonas anómalas. (INGEIS, 2018).

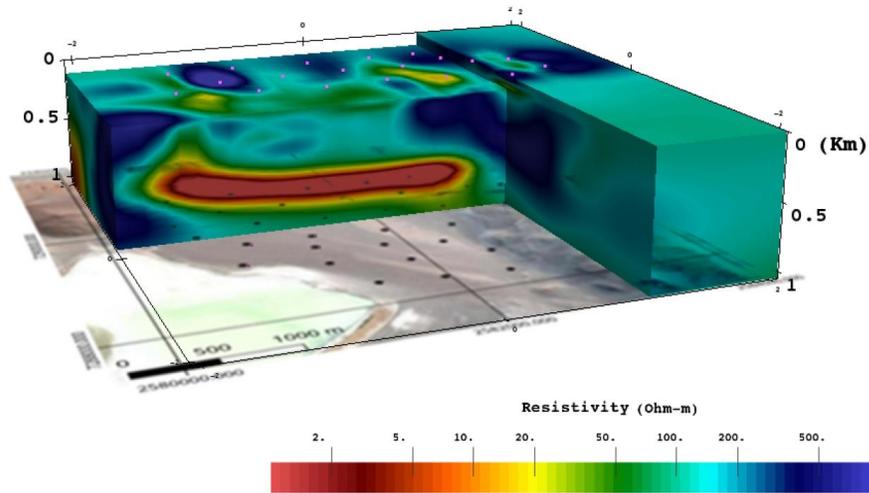


Figura 2-10. Modelo de resistividad 3D bajo el volcán Socompa en el sector este (Argentina). De color rojo se enmarca las resistividades menores a 5 Ohm-m, lo que se considera anomalía de conductividad y se asocia a actividad geotermal. Fuente: INGEIS (2018).

## 2.3 Modelos geológicos 3D

Los modelos geológicos tridimensionales (3D) son representaciones digitales de formaciones subterráneas y sus características asociadas. Recientemente, ha crecido la apreciación de su utilidad para varias disciplinas y han proliferado las herramientas de software que permiten su construcción. Han contribuido al desarrollo de catálogos mejorados de ubicación de terremotos, proyectos de excavación y túneles. También están apoyando evaluaciones continuas de sitios de almacenamiento de desechos radiactivos. En hidrogeología han facilitado las estimaciones de recursos de agua subterránea, permitiendo la caracterización de las geometrías de los acuíferos, rutas de flujo y áreas de captación. Proporcionando una base para el modelado numérico relacionado con la Hidrogeología (Thornton et al., 2018).

Varios son los softwares que realizan este tipo de modelado implícito, Leapfrog, GOCAD, Geomodeller, etc. Los principales beneficios de este tipo de modelización son la posibilidad de imponer condiciones geológicas en el programa informático, la interpolación simultánea de contactos litológicos y datos estructurales, y la rápida actualización del modelo en caso de adquisición de nuevos datos (Thornton et al., 2018).

## 2.3.1 Geomodeller 3D

GeoModeller es una herramienta de software para el modelado geológico 3D. Para la construcción de modelos geológicos 3D complejos, de estado estacionario, y la realización de modelado geofísico inverso y directo a partir de geología 3D sólida.

Una suposición importante a partir de la estacionariedad es que cualquier tendencia en la variabilidad espacial de la geología puede eliminarse o transformarse. El objetivo de eliminar la tendencia de la "geología" es lograr un estado en el que cualquier variable restante sea esencialmente aleatoria y la "geología" sea estacionaria.

Esto permite realizar cokriging en el marco de un modelo de función aleatoria. Formalmente, se supone que la función matemática utilizada para modelar la geología  $T(x)$  es una función aleatoria con una derivada polinomial y una covarianza estacionaria  $K(h)$ .

El método más utilizado en el modelado implícito es el del campo de interpolación potencial, muy discutido por Lajaunie et al., (1997); Cowan et al., (2003); Chilès et al., (2004); Mcinerney et al., (2005) y Calcagno et al., (2008). Los contactos litológicos y los datos estructurales se interpolan en funciones de cokriging para producir un campo escalar 3D, o campo potencial, en el que los datos de contacto de cada unidad geológica se insertan en la misma superficie equipotencial del campo. Los datos estructurales son ortogonales a un plano tangencial local para el campo potencial y definen su orientación usando un gradiente o derivada de la función escalar (Figura 2-11) De esta manera, un contacto geológico (o un plano de falla) puede tratarse matemáticamente como una isosuperficie, mientras que la falla es una discontinuidad de un campo escalar definido en un espacio 3D, llamado campo potencial. En matemáticas, una superficie implícita es una superficie en un espacio euclidiano definido por una ecuación diferencial parcial (el espacio euclidiano está determinado por tres coordenadas: X, Y, Z). Se pueden combinar varios campos potenciales en el mismo modelo para, por ejemplo, reconstruir series geológicas complejas con relaciones erosivas y/o concordantes (de Almeida, 2020).

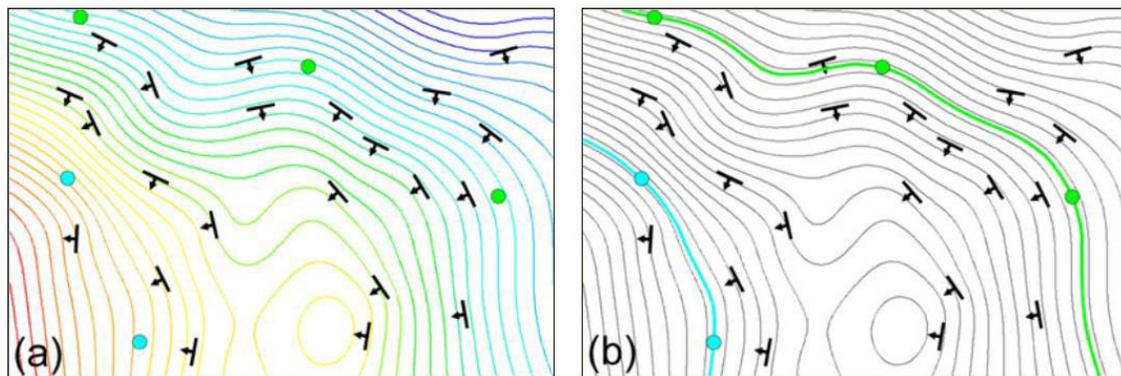


Figura 2-11 a) Puntos de contactos litológicos y estructuras formando un campo potencial; b) contacto isolínea o litológico rastreado según el campo potencial. Fuente: Mcinerney et al. (2005).

## 2.4 Hidráulica de aguas subterráneas

### 2.4.1 Parámetros hidráulicos

La caracterización de acuíferos es un aspecto fundamental en la problemática de la extracción y aprovechamiento de aguas, tanto para el consumo humano como para la industria. La permeabilidad es de gran importancia en la caracterización de acuíferos, este ejerce control primario sobre el flujo de agua subterránea, y sus valores varían en varios órdenes de magnitud en los sistemas acuíferos. La heterogeneidad de la geología es lo que hace que las propiedades, como la permeabilidad hidráulica, varíen espacialmente, incluso dentro de una formación geológica. (Maliva, 2016).

#### 2.4.1.1 Porosidad y permeabilidad

La porosidad se define como el espacio abierto en una roca dividido por el volumen total de roca. Es expresado como fracción decimal o como porcentaje. La porosidad efectiva consiste en espacios porosos que están conectados y sirven como canales a través del cual fluye el agua (excluyendo los poros aislados). La porosidad efectiva típicamente es menor que porosidad total y tal vez sólo una pequeña fracción de la porosidad total en rocas en las que la mayoría de los poros no están interconectados. La porosidad efectiva es similar, pero no sinónimo de rendimiento específico, ya que se relaciona con el flujo de agua en una roca saturada o sedimento, mientras que el rendimiento específico está relacionado con el drenaje vertical del agua, convirtiéndose en sedimento insaturado o roca.

Una relación básica en sedimentos granulares y rocas. (por ejemplo, arenas y areniscas) es el tamaño de los poros y, por lo tanto, la permeabilidad, generalmente aumenta a medida que aumenta el tamaño del grano (teniendo en cuenta la clasificación). Distribución del tamaño de grano se puede utilizar para estimar la permeabilidad y la conductividad hidráulica de sedimentos. Aunque la permeabilidad se correlaciona con el tamaño de grano y poro.

La permeabilidad está controlada principalmente por el tamaño de la garganta de los poros que conectan los poros en lugar del tamaño de los poros mismos. Las gargantas de los poros son las constricciones que conectan los poros contiguos a través de los cuales fluye el agua.

## 2.4.2 Pruebas hidráulicas

### 2.4.2.1 Análisis pruebas de caudal constante

Las pruebas de bombeo de acuíferos son un componente integral de la caracterización de acuíferos porque proporcionan datos cuantitativos sobre las propiedades hidráulicas, como la transmisividad, la capacidad de almacenamiento y la conductividad hidráulica vertical (fuga) de estratos confinantes. Pruebas de rendimiento de acuíferos, también denominadas pruebas de bombeo implican el bombeo a caudales conocidos y medición de los cambios correspondientes en los niveles de agua en el bombeo y pozos de observación.

En este trabajo de título se utilizan las pruebas de bombeo realizadas por parte de la empresa Minera Escondida Ltda. para la solicitud de derechos de aguas, lamentablemente ninguna cuenta con pozos de observación. En la zona de Negrillar se cuenta con una prueba de bombeo de 9 días de duración con pozo de observación, realizada por Compañía Minera Zaldívar.

El análisis de una prueba de bombeo en conjunto con conocimiento de la geología de la zona ya sea de cartas geológicas, geofísica o información stratigráfica de los mismos sondajes, permiten una correcta interpretación y una gran ayuda en la creación de un modelo conceptual.

Existe un gran número de métodos analíticos para interpretar los datos de pruebas de bombeo en diferentes condiciones del acuífero. Una cuestión clave es que todos los métodos analíticos se basan en presunciones sobre las condiciones del acuífero y el pozo. Las desviaciones de las condiciones asumidas pueden afectar las estimaciones para los parámetros hidráulicos del acuífero. Las condiciones reales del acuífero invariablemente se apartan de las condiciones ideales asumidas, sin embargo, los métodos analíticos pueden todavía ofrecer estimaciones útiles, ya que su precisión a menudo sigue siendo satisfactoria. (Maliva, 2016).

### 2.4.2.2 Graficas pruebas diagnóstico

La gráfica de diagnóstico es una gráfica logarítmica del cambio de presión y la derivada de presión (eje vertical) de una prueba de presión transitoria frente al tiempo transcurrido (eje horizontal). Los primeros estudios se aplicaron a las pruebas de pozos tanto de petróleo como de gas, dichas teorías se aplican también al recurso hídrico en acuíferos.

La Figura 2-12 muestra un ejemplo de gráfico de diagnóstico. El gráfico de diagnóstico se puede dividir en tres regiones de tiempo: temprano, medio y tardío. En la sección de los momentos más tempranos, dominan los efectos de pozo y próximos al pozo. Estos efectos incluyen el almacenamiento del pozo, el daño de la formación, la penetración parcial, la

redistribución de fases y la estimulación (fracturas hidráulicas o acidificación). En la región del tiempo medio, un depósito tendrá lugar una acción infinita. Para un yacimiento homogéneo, la derivada de presión será horizontal durante esta región de tiempo. Los datos en esta región conducen a las estimaciones más precisas de la permeabilidad de la formación. En los últimos tiempos de una prueba (la región de tiempo tardío), los efectos de límite dominan las formas curvas. Los tipos de límites que pueden afectar la respuesta a la presión incluyen fallas de sellado, depósitos cerrados y contactos de gas / agua, gas / petróleo y aceite / agua. Aquí se analizan varios regímenes de flujo comunes y los gráficos de diagnóstico asociados con estos regímenes de flujo.

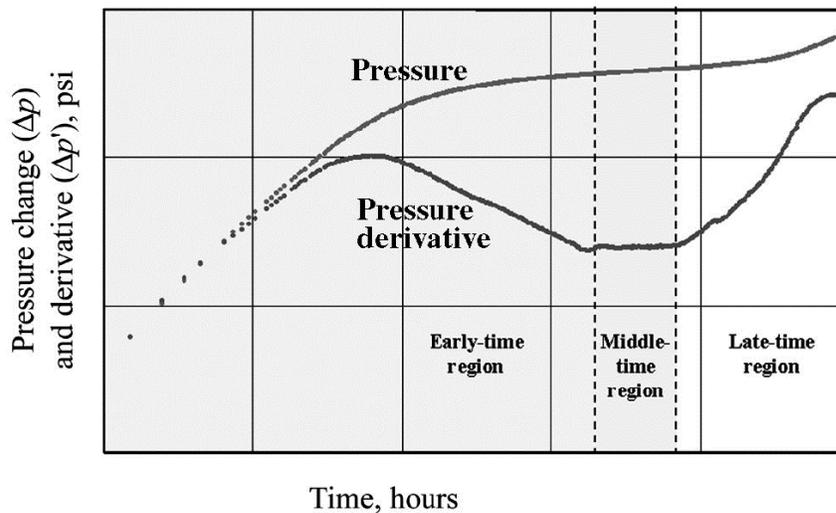


Figura 2-12. Ejemplo de Gráfico de diagnóstico de una prueba de bombeo. Fuente: Petrowiki, Diagnostic Plots (2021).

## 3 Metodología

### 3.1 Datos de entrada Geomodeller

El área de estudio incluye desde el sector sur del Salar de Atacama (Borde sur del núcleo), hasta el sector sur de Monturaqui. Este sector engloba más territorio que el del acuífero MNT, pero se eligió considerando el poder ingresar la mayor cantidad de información disponible que le de sustento al modelo.

El ingreso de datos para realizar modelos en Geomodeller pueden ser en variados tipos de extensiones, en este caso se ingresan datos de orientación de estructuras geológicas y datos de contactos. Estos pueden venir tanto de observaciones en superficie, por ejemplo, a través de mapas geológicos junto con la topografía del sector o a través de sondajes verticales.

#### 3.1.1 Geología sondajes

En el Salar de Atacama existe una gran cantidad de sondajes, en la zona de estudio (parte sur del Salar de Atacama) la gran mayoría son de Minera Escondida Ltda, seguido por Minera Zaldívar. En la Figura 3-1 se muestran 124 sondajes, los cuales tienen información estratigráfica con el detalle suficiente en su descripción, permitiendo una correcta clasificación (por ejemplo, diferenciar entre depósitos formados por arenas y depósitos formados por arenas con arcillas). Es importante destacar que los sondajes varían en profundidad, desde aproximadamente los 5 metros, en la zona de Tilopozo, hasta los 350 metros en promedio en la zona de Monturaqui. Existen pozos que destacan en su profundidad como es el caso del pozo NED-2, de unos 900 metros de profundidad en la zona de Negrillar.

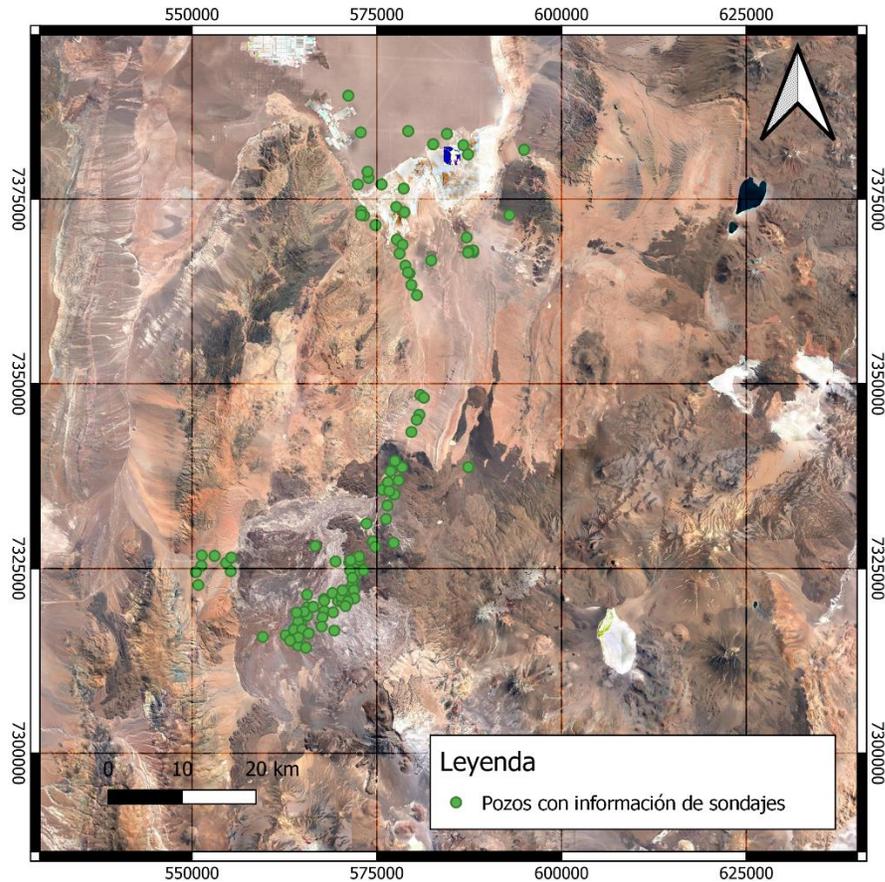


Figura 3-1. Sondajes disponibles para ambos modelos geológicos 3D. fuente: Elaboración propia con datos extraídos de Informes de Evaluación Ambiental presentador por Minera Escondida Ltda. y Compañía Minera Zaldívar Ltda. La mayor concentración de sondajes se encuentra en la zona de Monturaqui debido a la fuerte explotación de la zona y a la renovación de los pozos en operación, los pozos dados de baja han sido utilizados como pozos de monitoreo.

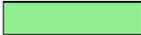
Tabla 3-1. Resumen de las unidades geológicas modeladas (Modelo Acuífero MNT) y la asociación a la Hoja Toconao.

Unidad	Descripción	Asociación a Carta Geológica	Simbología
A1,A2,A3,Qal	Estas 3 unidades corresponden al mismo tipo de geología, Gravas y arenas. Qal ocupa la mayor cantidad de volumen y es la principal. A1, A2 y A3, se crean para representar la intercalación con otros tipos de depósitos no consolidados.	TQal	
Qcl	Asociado principalmente a la costra salina	Qcls (H. Toconao)	

Unidad	Descripción	Asociación a Carta Geológica	Simbología
Q	Asociado al conjunto de los depósitos salinos, formadores del salar.	Qs, Qcl, Qs, Qtcl, Qsl, Ql (H.Toconao)	
I1, I2, Ql	Limos salinos indiferenciados y Arcillas.	Ql (H. Toconao)	
Pltc	Depósitos volcánicos, tobas, ignimbritas principalmente.	Pltc (H. Toconao)	
R	Distintos tipos de roca, sedimentaria principalmente, con diverso porcentaje de fracturamiento.	No se especifica, Posible Basamento.	
Tqet	Calizas arenosas.	Tqet (H. Toconao)	
Plpv	Asociado a domos volcánicos, al este domo Volcán Socompa	Plpv (H. Toconao)	
I	Sierra Almeida y Sierra Agua Colorada	Pzig (H.Toconao)	

Tabla 3-2. Resumen de las unidades geológicas modeladas (Modelo Acuífero Monturaqui) y la asociación a la Hoja Toconao.

Unidad	Descripción	Asociación a Carta Geológica	Simbología
Qvac	Depósitos de avalancha de detritos desde volcán Socompa	TQal	
Qv	Flujos de lava constituidos por andesitas y dacitas vítreas que originan potentes coladas (30 a 50 m)	TQv	
Pit	Toba moderadamente soldada	Pltc	
MPqs	Constituido por gravas pobremente estratificadas con lentes de arena gruesa, clastos casi exclusivamente volcánicos neógenos, con niveles arenosos, ignimbritas y depósitos piroclásticos	TQv	
MPqsi	Depósitos heterogéneos, polimícticos y no consolidados a semi consolidados, compuestos por la intercalación de gravas limosas, gravas arenosas, arenas limosas y limos de manera aleatoria	TQv	
Mv	Volcanes intensamente erosionados y relictos de coladas aisladas	TQv	

Unidad	Descripción	Asociación a Carta Geológica	Simbología
Trp	Brechas volcanoclasticas	Basamento poco permeable	
Cp	Formación Purilactis	-	

### 3.1.2 Datos estructurales

Los datos estructurales corresponden al rumbo y manto tanto de las unidades geológicas, como también de las fallas. Los datos se ingresan al programa en la notación Dip/DipDirection.

La presencia de fallas normales, inversas o de rumbo no se han abarcado en detalle en los estudios, especialmente en la zona de Monturaqui. Se tiene el mapeo de las cartas geológicas en el caso del modelo de mayor escala, pero la zona se ha visto afectada tectónicamente con gran intensidad y los depósitos volcánicos producto de coladas o colapsos han cubierto la zona, impidiendo un análisis en superficie. En la zona de Negrillar hacia el norte, incluyendo el núcleo del salar, existen mayores antecedentes sobre la gran presencia de fallas inversas.

## 3.2 Construcción del modelo geológico preliminar

### 3.2.1 Modelo escala regional Monturaqui-Negrillar-Tilopozo

Para la creación del modelo, lo primero es traspasar la información que será ingresada al programa Geomodeller3D a un formato compatible con este, la geología proveniente de las cartas geológicas se ingresa en formato shape, el cual es una representación vectorial desarrollado por ESRI (Environmental System Research Institute). También es fundamental para el programa contar con datos estructurales, estos se ingresan en notaciones de planos Dip/DipDirection. Finalmente se ingresan los datos de los sondajes, el programa cuenta con una herramienta específica para esto, “Drilhole”, para ello se deben generar planillas que cuenten con la posición espacial del pozo, la longitud en profundidad y la ubicación de cada tipo de litología.

Se crean perfiles transversales, un mallado del modelo, recordando que Geomodeller no interpola directamente los sondajes, sino la proyección de estos en las secciones creadas (Figura 3-2). Luego en la mayoría de los vértices se crean “sondajes imaginarios” los cuales ayudan a tener noción de la estructura geológica que debería estar presente en ese sector. Se

crean perfiles horizontales algunos cada 5000 m y otros cada 10000 m en la vertical, perfiles verticales cada 5000m en la horizontal.

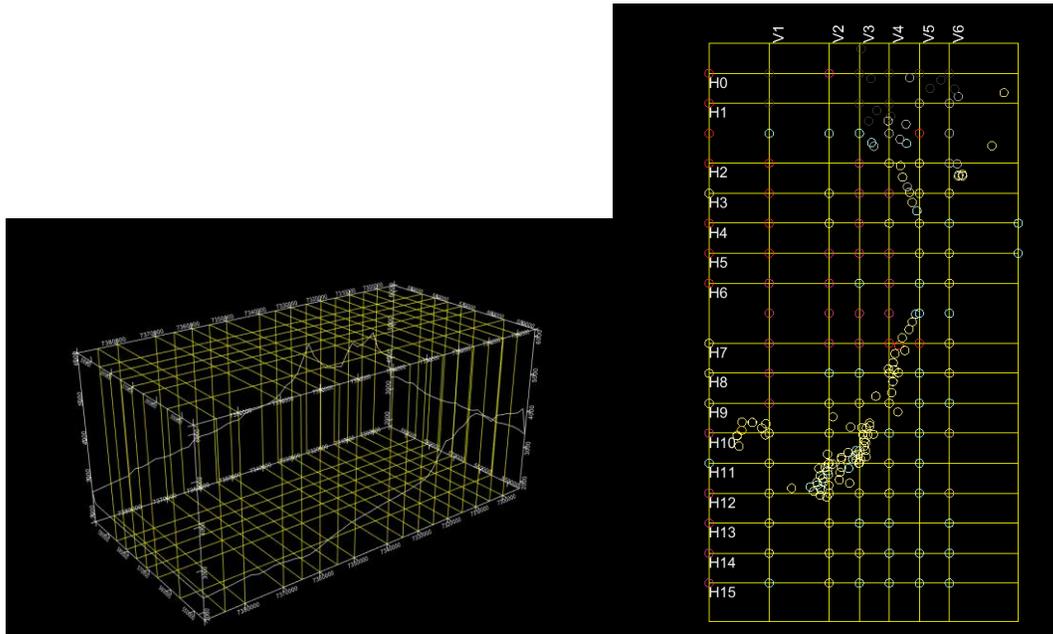


Figura 3-2. Vista en planta de las secciones creadas y los pozos existentes como los pozos creados en las zonas sin información de sondajes.

### 3.2.2 Modelo escala local sector pozos de explotación

#### Monturaqui

Este modelo se crea en el contexto de la explotación del recurso hídrico en la zona de Monturaqui realizada por Minera Escondida Ltda. Las unidades geológicas son las definidas por Golder en 2017 (Figura 3-3). Primero se ingresaron los datos de los sondajes, luego con esa información se validaron los perfiles realizados por Golder. Estos perfiles geológicos han servido de base para todos los estudios de la zona desde el 2017. Los Perfiles poseen una extensión mayor a la zona modelada, por lo que se cortaron y georreferenciaron para ser ingresados a Geomodeller.

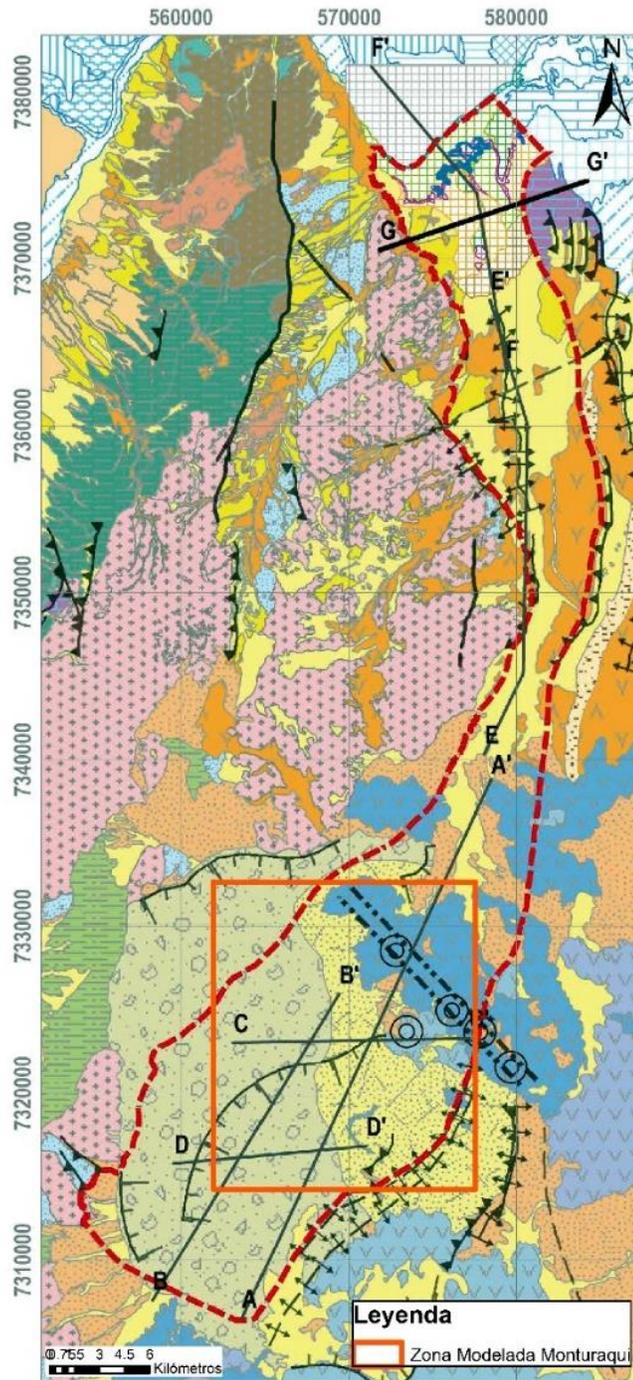


Figura 3-3. Mapa geológico de Golder y perfiles transversales usados para el modelo de Monturaqui. El polígono anaranjado corresponde a la zona modelada. Fuente: Proyecto Monturaqui Minera Escondida Ltda. (2017). En total son 4 los perfiles ingresados al modelo, A-A`, B-B`, C-C` y D-D`, los perfiles se muestran en Anexo, sobre las fallas nuevamente se dice bastante poco, se podría asumir que son fallas inferidas. El tema de las fallas es relevante en la hidrogeología, ya que estas permiten el flujo a velocidades distintas que el medio poroso.

### 3.3 Pruebas de bombeo

Se cuenta con las pruebas de bombeo extraídas de los expedientes de solicitud de derechos de aguas por parte de la Minera Escondida Ltda. La totalidad de los pozos de bombeo se observa en la Figura 3-4, de estos se cuenta con la información de 14 Pozos, la información existente de cada uno se detalla en la Tabla 3-3.

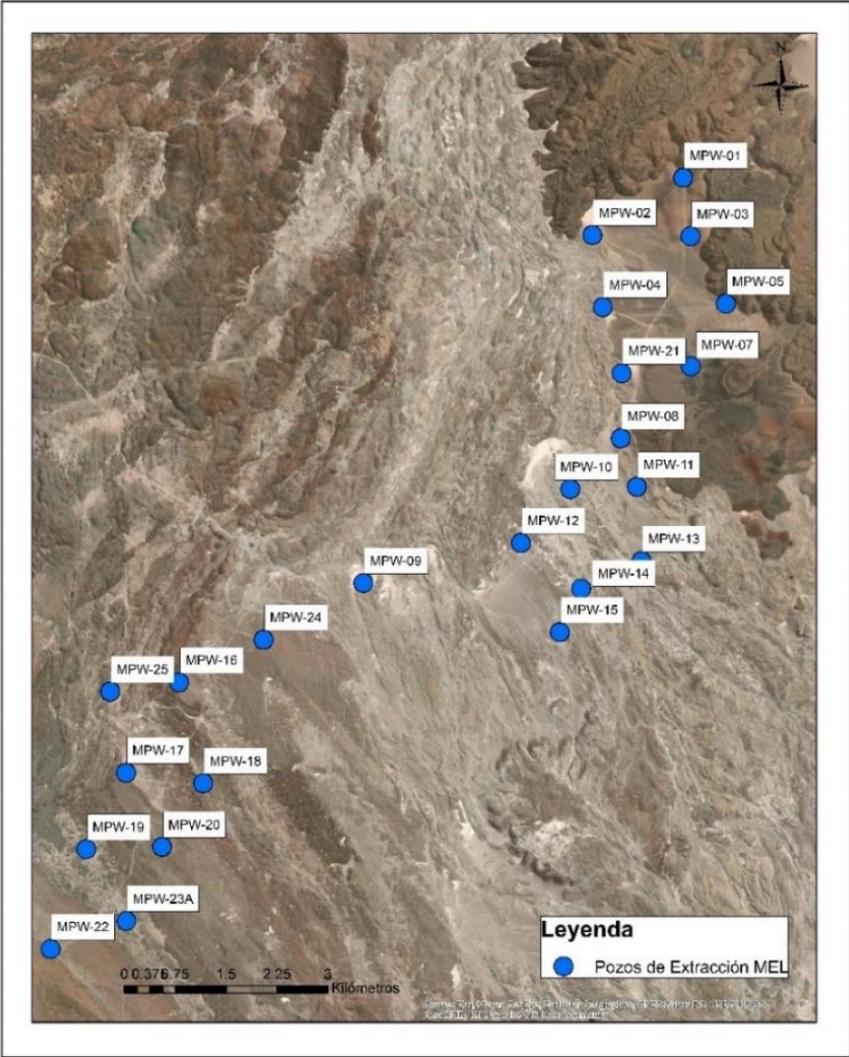


Figura 3-4 .Pozos de producción. Propiedad de Minera Escondida Limitada.

Tabla 3-3. Información recopilada sobre los pozos de bombeo de MEL

Nombre	Pozo de Observación	Prueba Caudal Constante	Prueba de Recuperación	Prueba Caudal Variable	Fecha de Realización
MPW-02	No	Si (2)	Si (1)	Si (1)	Mar 1996
MPW-05	No	Si (1)	Si (1)	Si (1)	Mar 1996
MPW-08	No	Si (2)	Si (1)	Si (1)	Nov 1995
MPW-09	No	Si (2)	Si (1)	Si (1)	Abr 1996
MPW-10	No	Si (1)	Si (1)	Si (1)	Mar 1996
MPW-11	No	Si (1)	Si (1)	Si (1)	Ene 1996
MPW-13	No	Si (1)	Si (1)	Si (1)	Feb 1996
MPW-14	No	Si (1)	Si (1)	Si (1)	Feb 1996
MPW-15	No	Si (1)	Si (1)	Si (1)	Feb 1996
MPW-17	No	Si (1)	Si (1)	Si (1)	Abr 1996
MPW-18	No	Si (2)	Si (1)	Si (1)	Nov 1995
MPW-19	No	Si (1)	Si (1)	Si (1)	Mar 1996
MPW-20	No	Si (2)	Si (1)	Si (1)	Ene 1996

Se analizan todas las pruebas disponibles, caudal constante, recuperación y caudal variable. Existen pozos que tienen dos pruebas de caudal constante de descarga, en estos casos la prueba de recuperación corresponde al caudal de menor valor. Al no existir pozos de observación para ninguna de las pruebas se torna imposible obtener un valor fiable de almacenamiento, por la misma razón las transmisividades se calculan con la prueba de recuperación. Para las pérdidas y eficiencias de cada pozo se utilizará las pruebas de caudal variable.

El software para determinar lo anterior es AquiferTest, ya que es una interfaz simple y permite además graficar las curvas diagnóstico para su interpretación.

## 4 Resultados

### 4.1 Modelo Monturaqui-Negrillar-Tilopozo

El modelo posee una discretización de 200x200x50m. En general, para el objetivo de investigación, la discretización es acorde. Por lo que el representar a cabalidad ciertos detalles de la geología en una discretización menor requiere más tiempo y recursos. El modelo permitirá a futuro en conjunto con los niveles de pozos, estudiar el almacenamiento del acuífero, ya que este valor es relevante debido a que la gran magnitud de agua almacenada estaría amortiguando los efectos de la extracción, el valor almacenado es de  $10^{10}$  m<sup>3</sup> (Anderson et al. 2014). Se estimó por Amphos21(2020) un valor de volumen de almacenamiento para Acuífero Monturaqui-Negrillar-Tilopozo (MNT) más Aluvial Borde Sur, un valor mínimo de  $5,782 \times 10^9$  m<sup>3</sup> y un valor máximo de  $1,0842 \times 10^{10}$  m<sup>3</sup>. Dicho valor se calculó a través de un modelo hidrogeológico 3D en Leapfrog,

A continuación se muestra las unidades modeladas (Figura 4-1). y la comparación con basamento modelado por Golder (Figura 4-2) . Las unidades I, R y Plpv, son las que forman los depósitos consolidados en los bordes del acuífero, siendo R el asociado a los diferentes tipos de rocas que forman el basamento . En total son 16 unidades modeladas, de las cuales se modelan 15 efectivas. Pltv se descartó porque solo un pozo mostraba esta formación en su descripción y en general no realizaba un aporte al modelo.

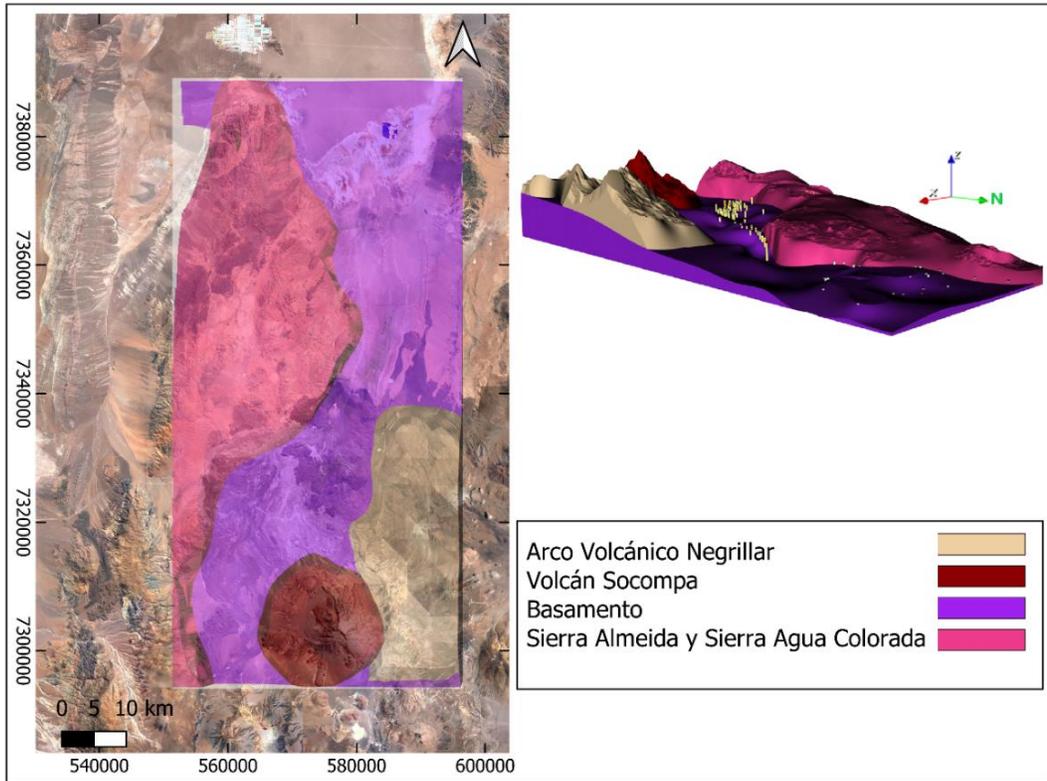


Figura 4-1. Unidades consolidadas del acuífero MNT. Unidades Arco volcánico de Negrillar y Volcán Socompa formados durante el Pleistoceno. Basamento formado por rocas volcánicas en el Paleozoico. Sierra de Almeida formada durante el Triásico.

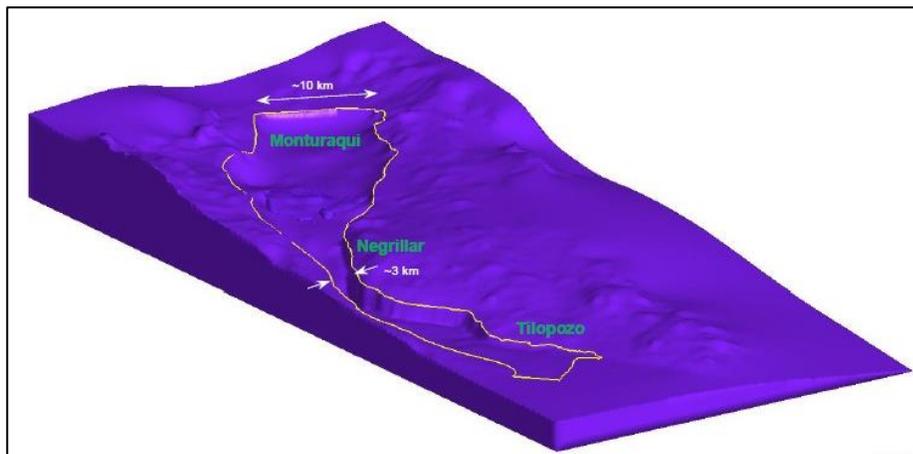


Figura 4-2. Basamento de Golder (2017). En líneas generales el modelo de Golder se centra la creación de un basamento rocoso, tomando como input la información proveniente de sondajes, de igual manera que el basamento propuesto en este trabajo se presenta una caída de este en el sector de Negrillar. El modelo en su totalidad considera límites impermeables con rellenos no consolidados, no modela otras unidades geológicas relevantes, como el Volcán Socompa. Fuente: Golder (2017).

En cuanto a las unidades no consolidadas, estas se distribuyen a lo largo y ancho de toda la cuenca, dominando en ciertos sectores los depósitos de ceniza y arcilla. En general la formación Salin, compuesta principalmente por arenas es la que domina en cuanto a extensión y volumen. En Monturaqui el relleno alcanza aproximadamente los 300 metros de espesor y en Negrillar, supera los 1000 metros. En la Figura 4-3 se observan las unidades que conforman el acuífero Monturaqui-Negrillar-Tilopozo.

El resultado final del modelo logra mostrar de buena manera el acuífero, tanto sus bordes, como la geometría en general. Para lograr modelar el núcleo del salar se utilizó una función del software que rellena los espacios de depresiones topográficas. Para corregir el error producto la compatibilidad del DEM con la grilla en la zona del núcleo se realizó un modelo de menor tamaño, con los mismos datos, pero una nueva grilla de menor tamaño de 50x50x25, obteniendo mejores resultados en esa zona (Figura 4-4).

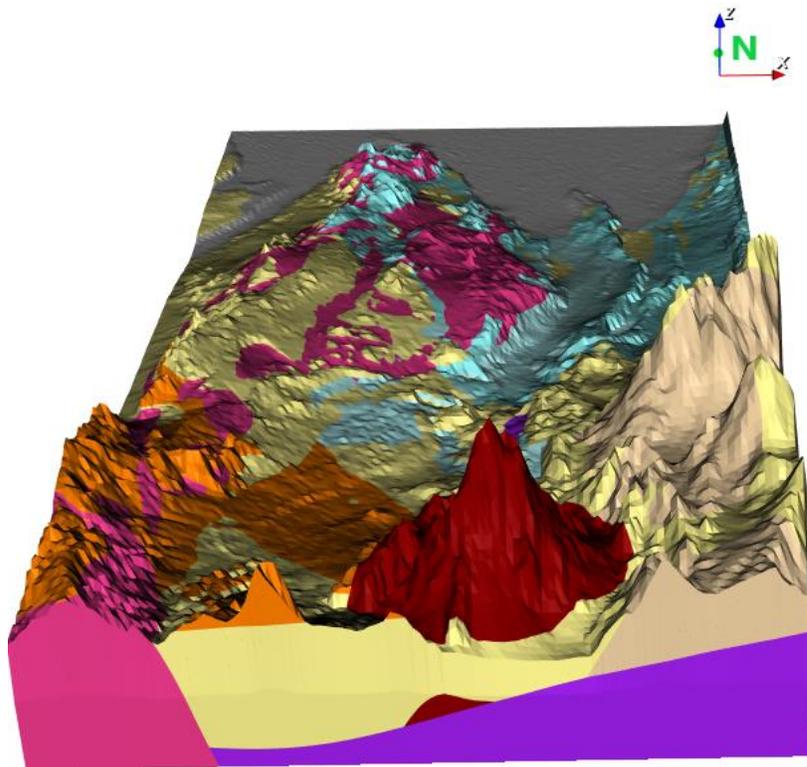
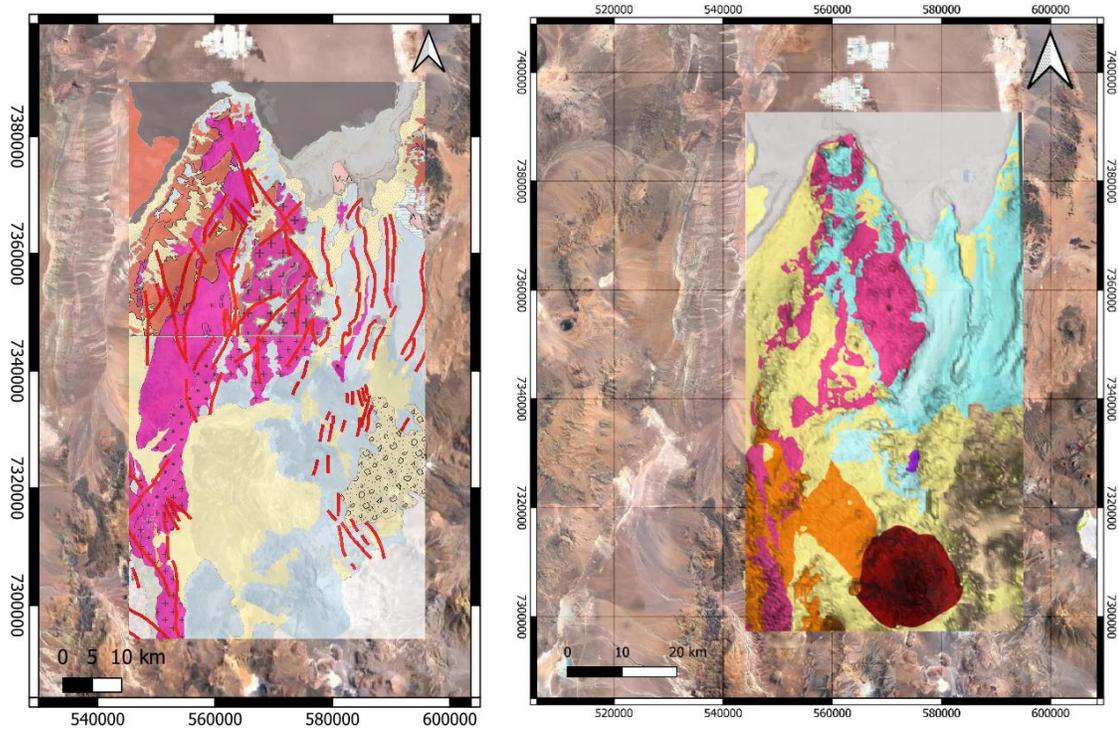


Figura 4-3. Resultado final modelo geológico del sector sur de la cuenca del Salar de Atacama. Las imágenes superiores corresponden a las cartas geológicas unificadas y simplificadas con el fin de lograr un modelo geológico 3D. A la derecha se encuentra el modelo resultante, el cual presenta al núcleo del salar de manera simplificada.

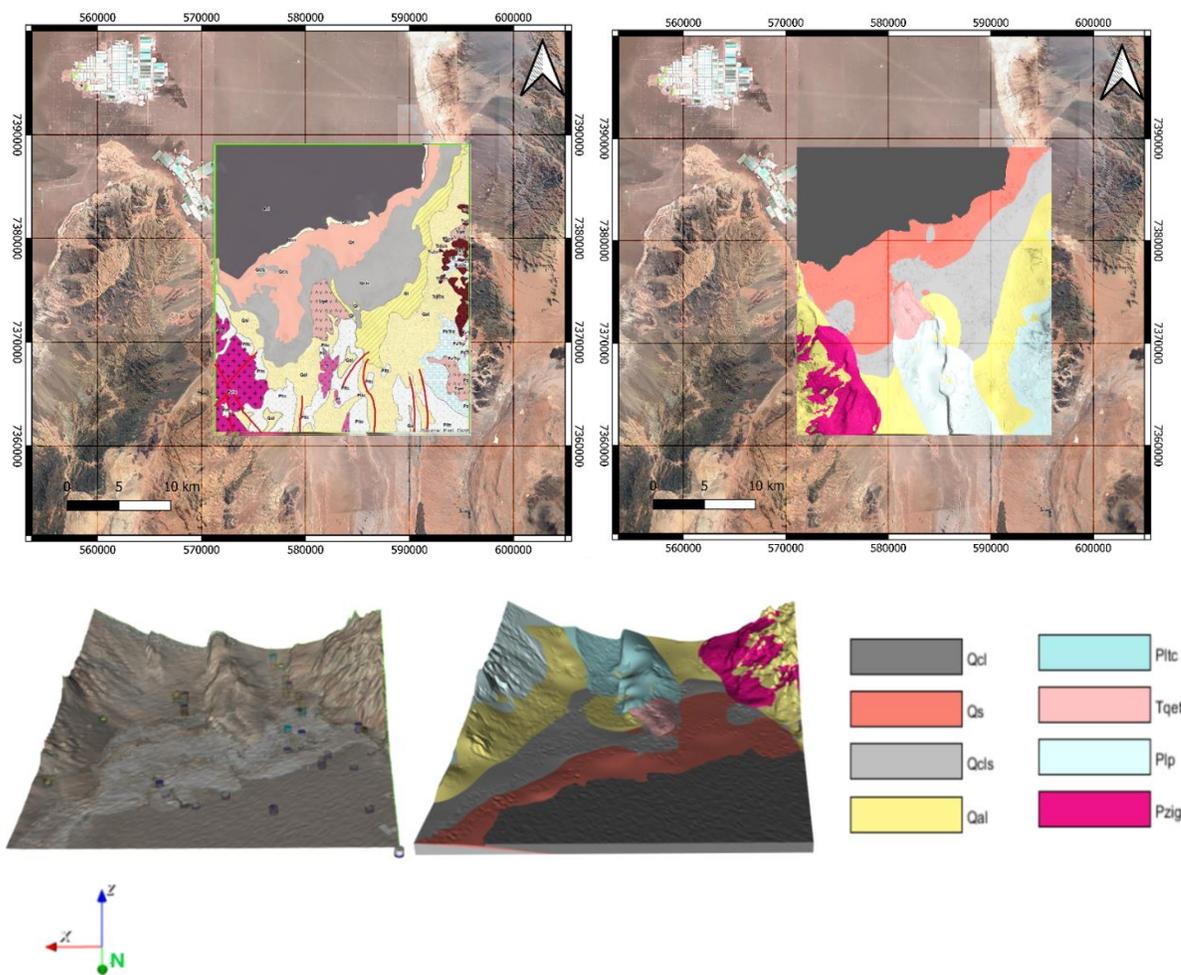


Figura 4-4. Modelo borde sur del núcleo del Salar de Atacama. Se incluye la secuencia de precipitación que forma el núcleo del Salar de Atacama.

A continuación, en la Figura 4-5 se muestra un corte en el modelo geológico, el objetivo de este es mostrar como el basamento cae desde Monturaqui a Negrillar, la caída es de al menos unos 700 metros. Se puede observar como el pozo de 900 metros, NED-2, no interseca al basamento en su construcción. En la zona de Tilopozo los pozos tienen una profundidad del orden de los 10 metros, básicamente son piezómetros.

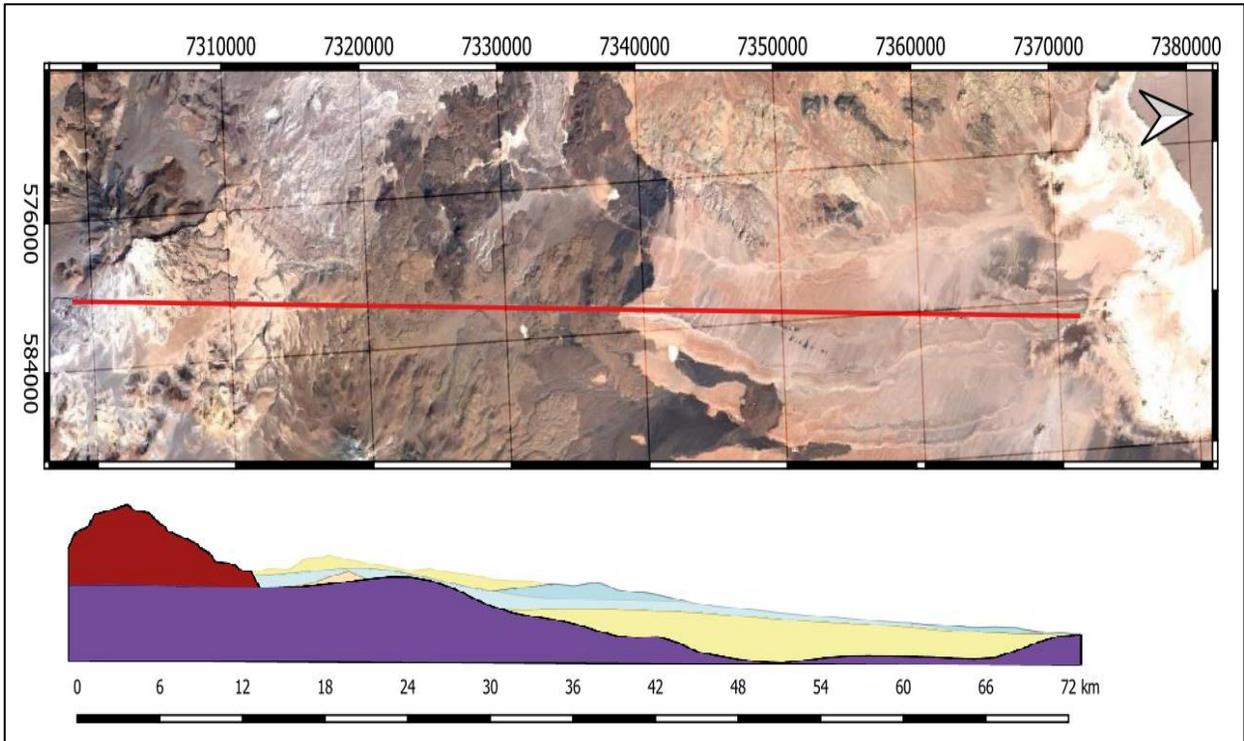


Figura 4-5. Corte transversal acuífero Monturaqui-Negrillar-Tilopozo. En color Marrón el Volcán Socompa, el basamento color morado y el acuífero constituido principalmente por la formación Salin (Amarillo) y la ignimbrita Tucucaro (color celeste).

## 4.2 Modelo Monturaqui

El modelo resultante posee una discretización de 50x50x10 metros, de las unidades modeladas más importantes se encuentra el basamento. El basamento (Figura 4-6) en Monturaqui se mantiene a una profundidad más o menos estable, la aparición de este se asocia con la unidad Trp, constituida principalmente por rocas de tipo volcánico, en algunos casos se ha encontrado roca sedimentaria (descripción de sondajes). Los primeros metros se presentan fracturados con gran presencia de arcilla.

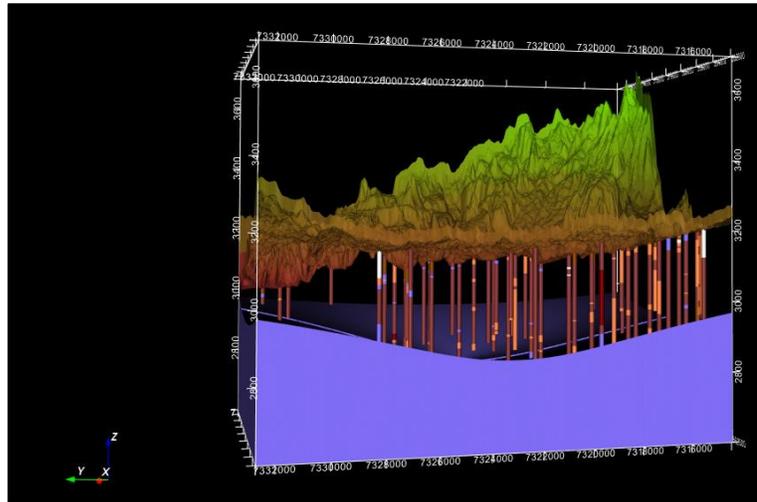


Figura 4-6. Modelo del Basamento, sondajes y Topografía. En Monturaqui existen una gran cantidad de sondajes, tanto de pozos de explotación de aguas subterráneas que han sido dado de baja y actualmente son pozos de observación y monitoreo, como los actuales pozos de producción (MPW).

En cuanto al modelo final (Figura 4-7) se observa que el acuífero está constituido principalmente por arenas, pero que existe una considerable presencia de limos y ceniza en capas medias, además de una capa de ignimbrita que rellena la zona del basamento que se encuentra fracturado.

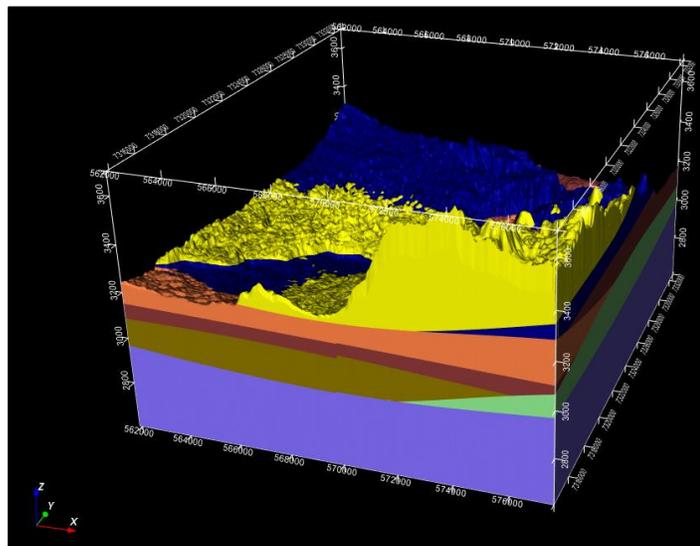


Figura 4-7. Modelo Final, escala vertical x6. Respecto al modelo anterior que incluía todo el acuífero, en este se incluye la formación Purilactis (color verde), unidad poco permeable.

## 4.3 Pruebas de bombeo

### 4.3.1 Prueba de gasto constante Monturaqui

En este apartado se busca determinar a priori el comportamiento del acuífero a partir de las pruebas de gasto constante, la estratigrafía de los pozos y los niveles estáticos. Se evalúan comportamientos, confinado, no confinado y semiconfinado. Bajo los supuestos de pozo homogéneo e isotrópico, completamente penetrante, y de pequeño diámetro. El no tener pozos de observación no permite determinar el coeficiente de almacenamiento y además el ajuste mediante la curva de Neuman o Theis no es óptimo, como si lo sería en un pozo de observación (Caso pozo NEX-5 en Negrillar).

#### MPW-02

El pozo MPW-02 se encuentra en el sector noreste de Monturaqui. El comportamiento sería el de un acuífero confinado (Figura 4-8), donde el limo junto a ignimbrita consolidada formaría un estrato confinante (estratigrafía en Anexo).

- **Tiempo Inicial:** En la Figura 4-9 se aprecia los efectos del almacenamiento en el pozo, seguido de un flujo esférico con pendiente negativa aproximadamente  $-1/2$ , atribuible a la penetración parcial del pozo en el acuífero.
- **Tiempo Medio:** La pendiente se estabiliza generando un flujo radial, donde predomina la capacidad de transmitir agua del acuífero formado por arenas.
- **Tiempo Tardío:** Debido al corto tiempo de la prueba no se alcanza a apreciar.

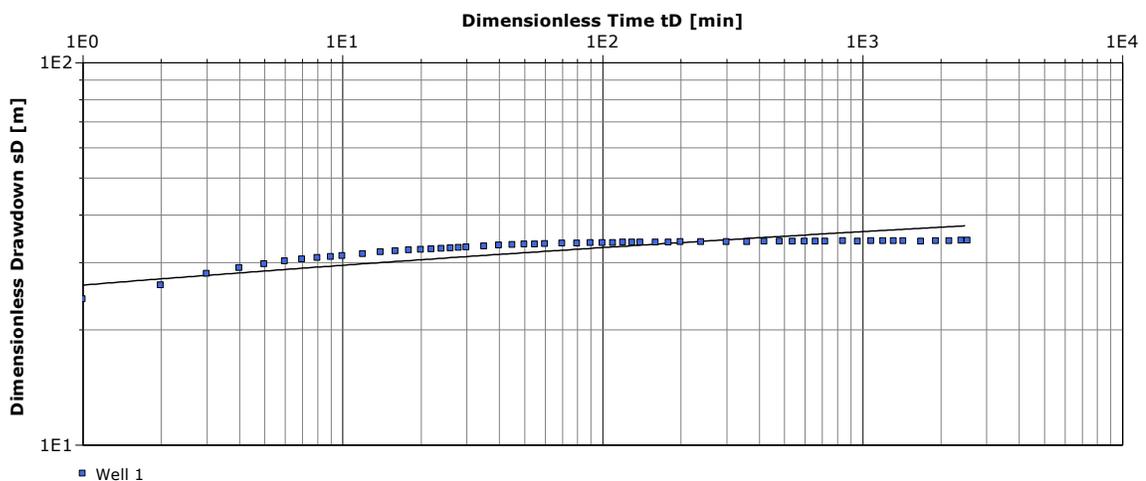


Figura 4-8. Gráfico log-log prueba caudal constante 71.4 l/s, pozo MPW-02.

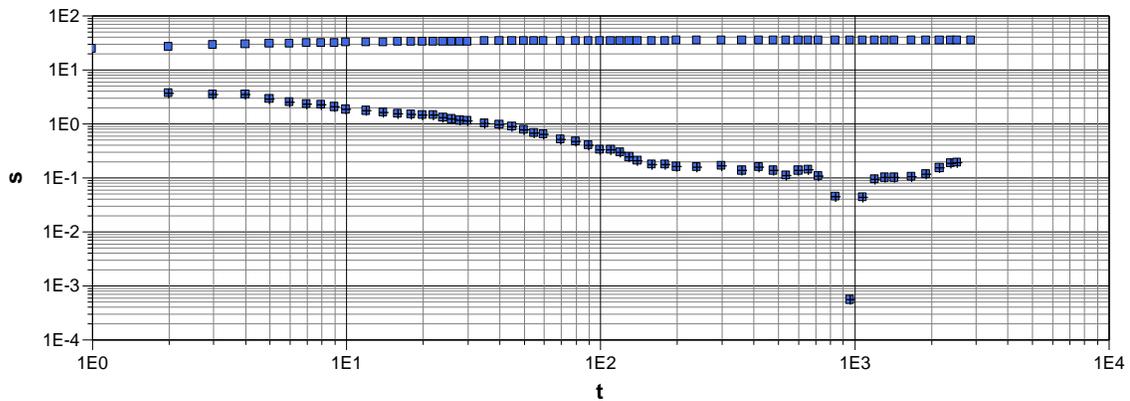


Figura 4-9. Curva superior: Gráfico log-log descenso vs tiempo. Curva inferior: Derivada del descenso en función del tiempo.MPW-02.

### MPW-08, MPW-10, MPW-11, MPW-12 y MPW-13

A continuación, se muestran los pozos que fueron definidos con un comportamiento de acuífero libre, estos según las curvas mostradas tanto el descenso versus tiempo, como los gráficos diagnósticos, se pueden dividir en dos subgrupos:

- A) MPW-08, MPW-10 y MPW-11
- B) MPW-12 y MPW-13

Al analizar el comportamiento del primer grupo en las Figura 4-12, Figura 4-14, Figura 4-16 y Figura 4-18 se aprecia que la curva sigue la forma correspondiente a acuífero libre. En las columnas estratigráficas (Anexo) en esta zona hay predominancia de arenas y depósitos volcánicos no consolidados.

Sobre los gráficos diagnóstico (Figura 4-11, Figura 4-13, Figura 4-15, Figura 4-17 y Figura 4-19):

- Tiempo Inicial: Durante los primeros minutos aprecia los efectos del almacenamiento en el pozo, seguido por una pendiente cercana a  $-1/2$ , lo que habla de un flujo esférico, esto puede ocurrir en pozos que penetran solo una distancia corta respecto al espesor del acuífero.
- Tiempo Medio: En el caso de MPW-10 la pendiente se aproxima a un valor cercano a 0, por lo que se produce un flujo radial hacia el pozo, donde la tasa de descenso es constante. Sobre el pozo MPW-11, este tiende a mantener su pendiente negativa por lo que estarían actuando condiciones de borde durante la prueba de bombeo.
- Tiempo Tardío: En MPW-08 se produce la curva típica para un acuífero libre, donde la entrega de agua es gracias a la porosidad eficaz (acuífero libre) y ya no del drenaje diferido (comportamiento de acuífero confinado). En los pozos restantes, se vuelve a

producir un quiebre en la curva, se puede atribuir a la cercanía de posibles condiciones de borde.

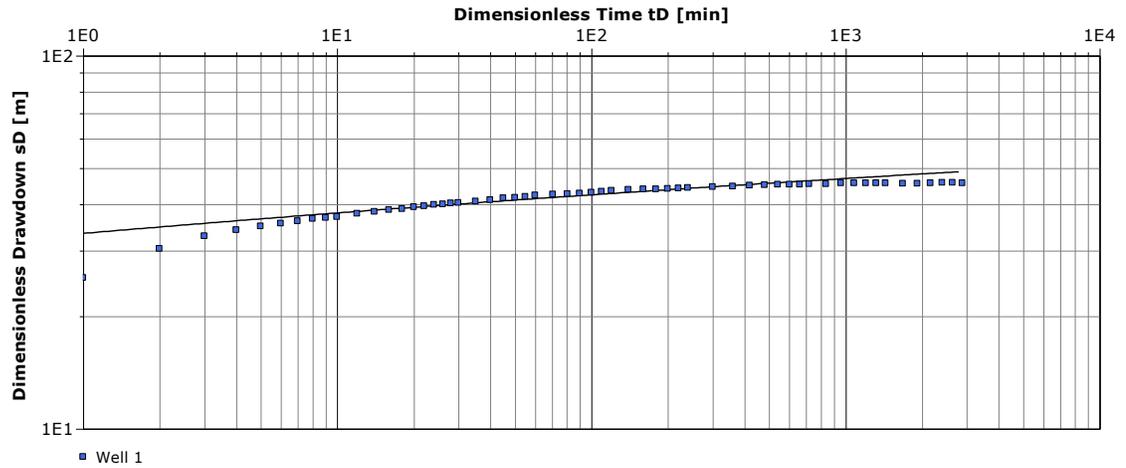


Figura 4-10. Gráfico log-log prueba caudal constante 94.2 l/s, pozo MPW-08.

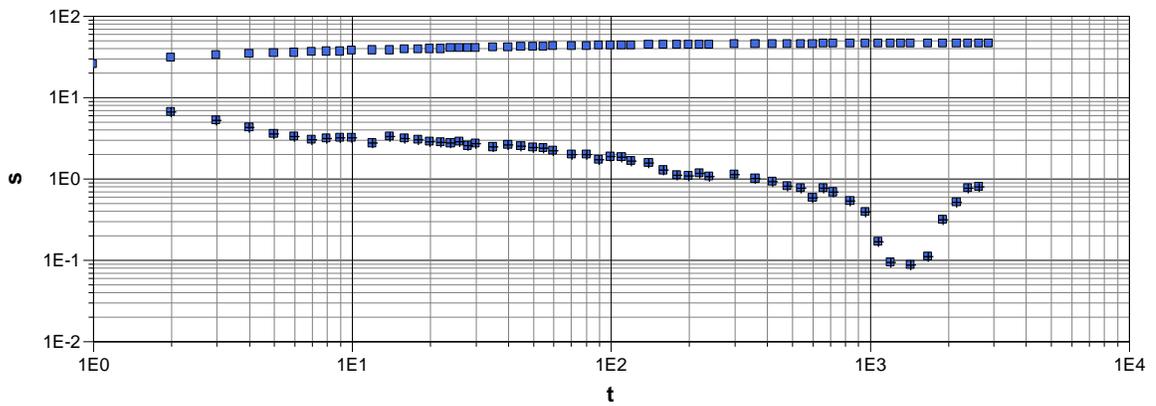


Figura 4-11. Gráfico log-log descenso vs tiempo. Curva inferior: Derivada del descenso en función del tiempo. MPW-08.

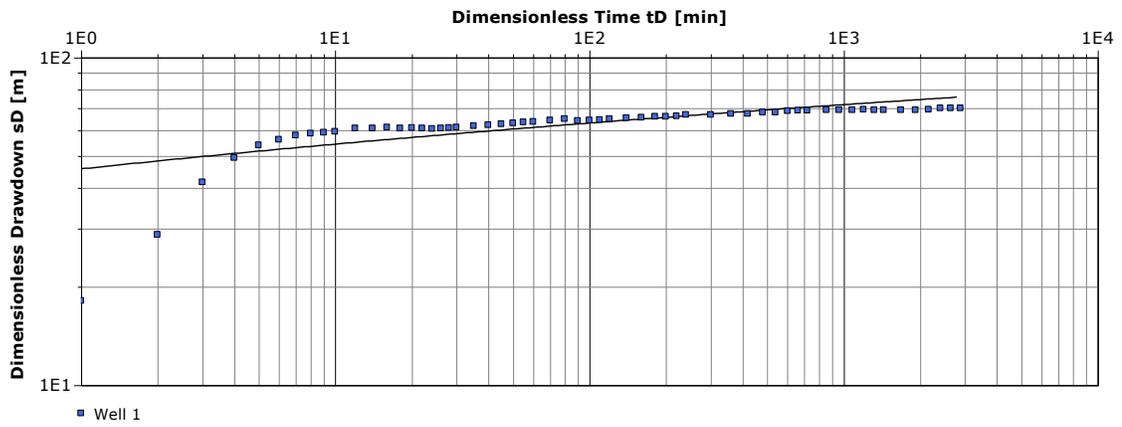


Figura 4-12. Gráfico log-log prueba caudal constante 50.5 l/s, pozo MPW-10.

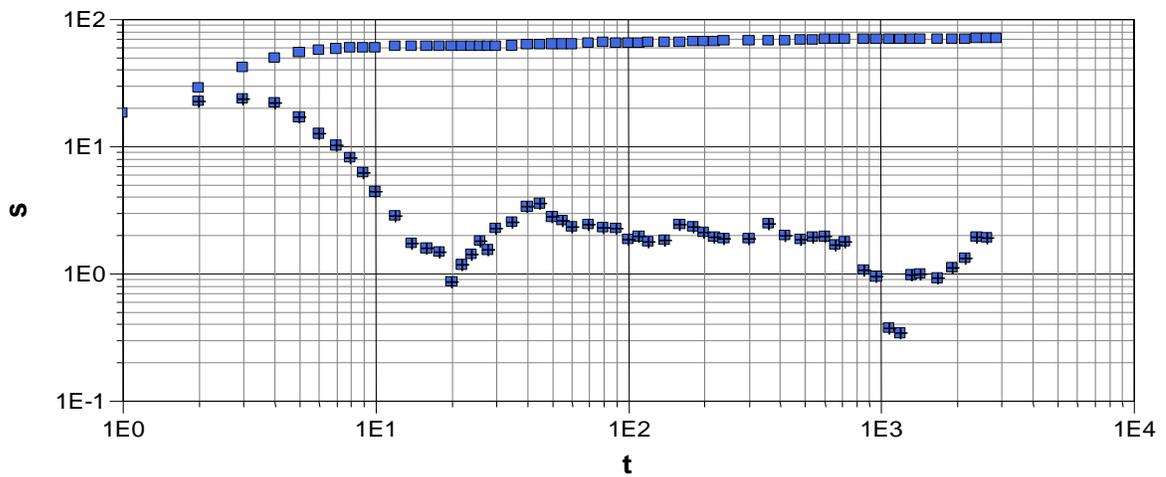


Figura 4-13. Curva superior: Gráfico log-log descenso vs tiempo. Curva inferior: Derivada del descenso en función del tiempo MPW-10

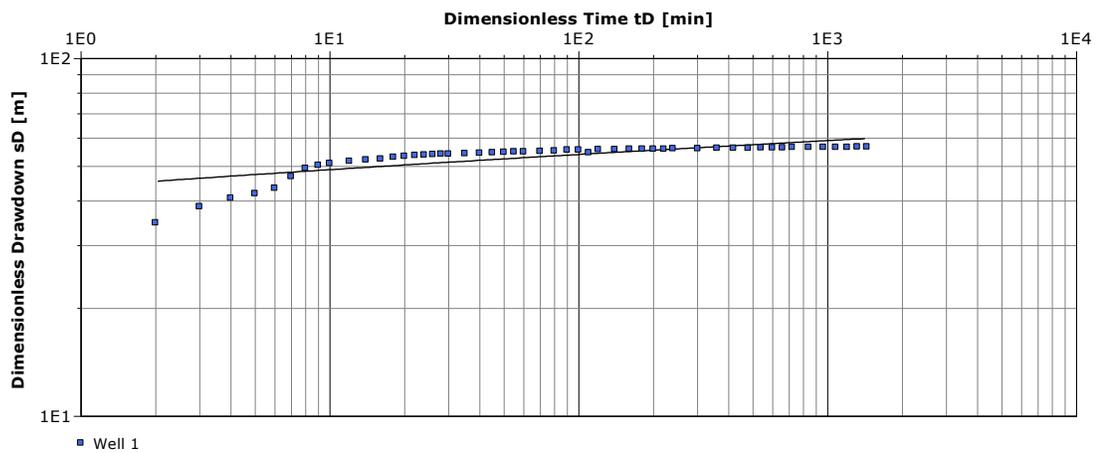


Figura 4-14. Gráfico log-log prueba caudal constante 52.9 l/s, pozo MPW-11.

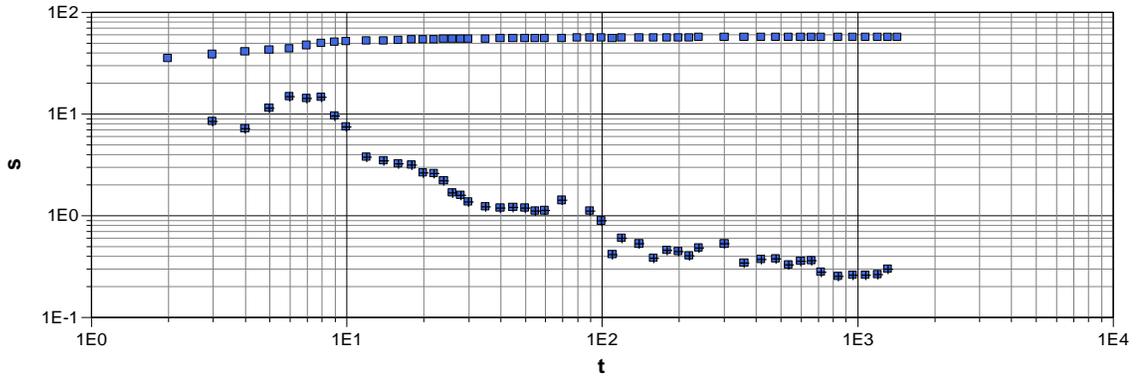


Figura 4-15. Curva superior: Gráfico log-log descenso vs tiempo. Curva inferior: Derivada del descenso en función del tiempo MPW-11.

El segundo grupo de pozos caracterizados como acuífero libre se ubican en la zona sureste y muestran un comportamiento que podría estar influenciado por posibles fallas en la zona. De todas maneras, en su estratigrafía no muestran ningún estrato confinante o la ignimbrita estaría no consolidada por lo que sería un estrato permeable y no confinante.

Sobre los gráficos diagnóstico:

- Tiempo Inicial: En MPW-12 se observa en los primeros 10 min los efectos de almacenamiento del pozo de bombeo, seguido por una pendiente cercana a 0, lo que indica un descenso constante producto del flujo radial. En MPW-13 se desarrolla de manera temprana la curva característica de un acuífero libre.
- Tiempo Medio: Caracterizado por una pendiente semi nula, que tiene cierta tendencia negativa, por lo que se intuye un flujo radial que se estaría acercando a una condición de borde de altura de presión constante.
- Tiempo Tardío: Debido a la corta duración de las pruebas no se alcanzaría a desarrollar completa la curva.

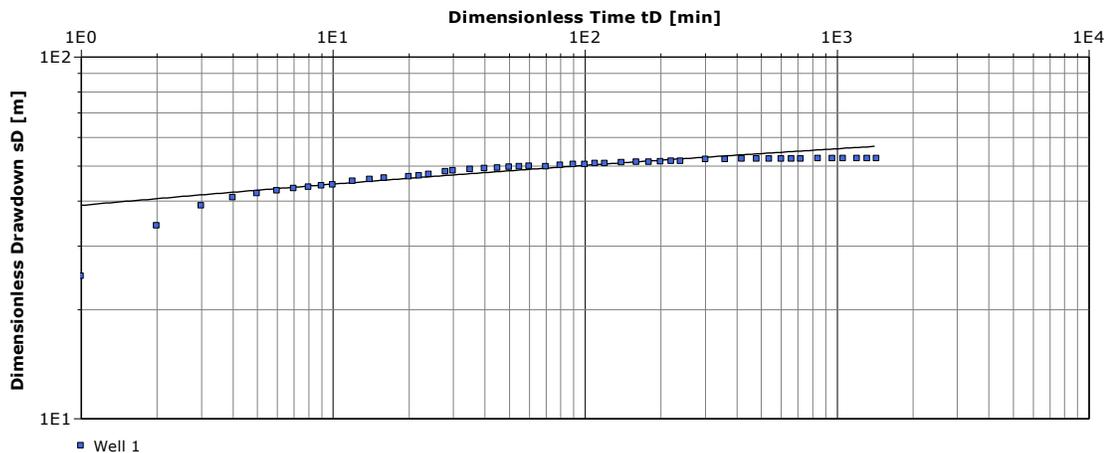


Figura 4-16. Gráfico log-log prueba caudal constante 60.8 l/s, pozo MPW-12.

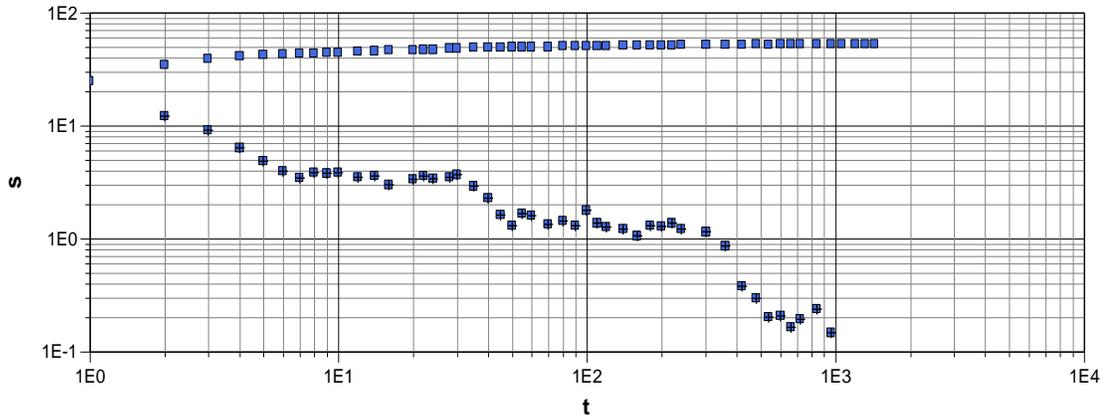


Figura 4-17. Curva superior: Gráfico log-log descenso vs tiempo. Curva inferior: Derivada del descenso en función del tiempo, MPW-12.

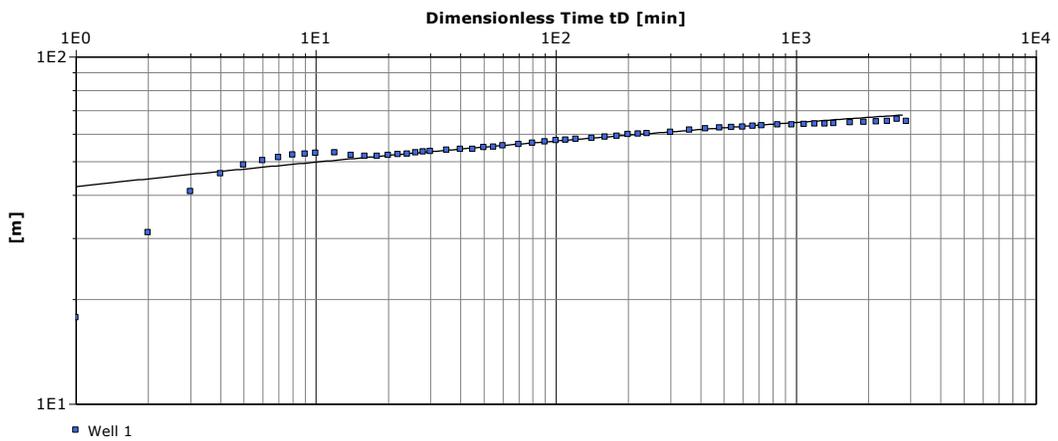


Figura 4-18. Gráfico log-log prueba caudal constante 40.3 l/s, pozo MPW-13.

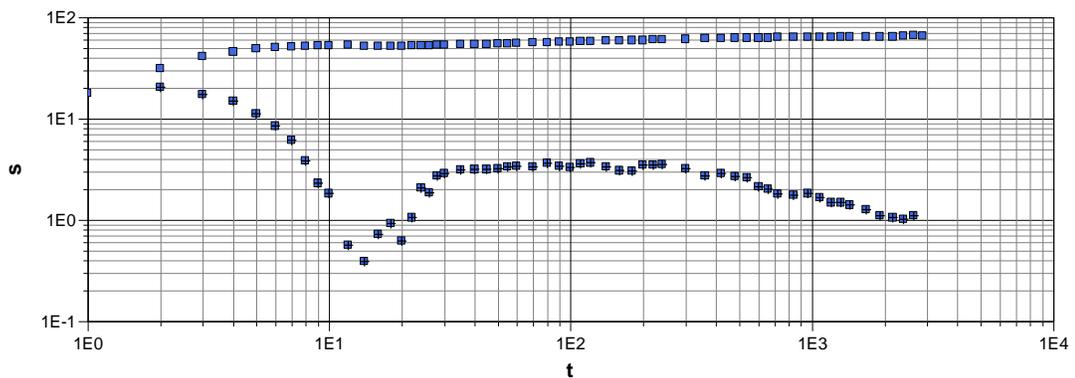


Figura 4-19. Curva superior: Gráfico log-log descenso vs tiempo. Curva inferior: Derivada del descenso en función del tiempo, pozo MPW-13

## MPW-09

El pozo MPW-09 se analiza por separado debido a que se encuentra relativamente aislado del resto, ha sido catalogado por el análisis de la curva de descarga con un comportamiento confiado (Figura 4-20).

- Tiempo Inicial: Pendiente negativa, los primeros minutos efectos del pozo de bombeo.
- Tiempo Medio: Pendiente con valor  $-1/2$ , debido a la penetración parcial del pozo en el acuífero.
- Tiempo Tardío: Se llega a la condición borde de recarga y estabilización del descenso.

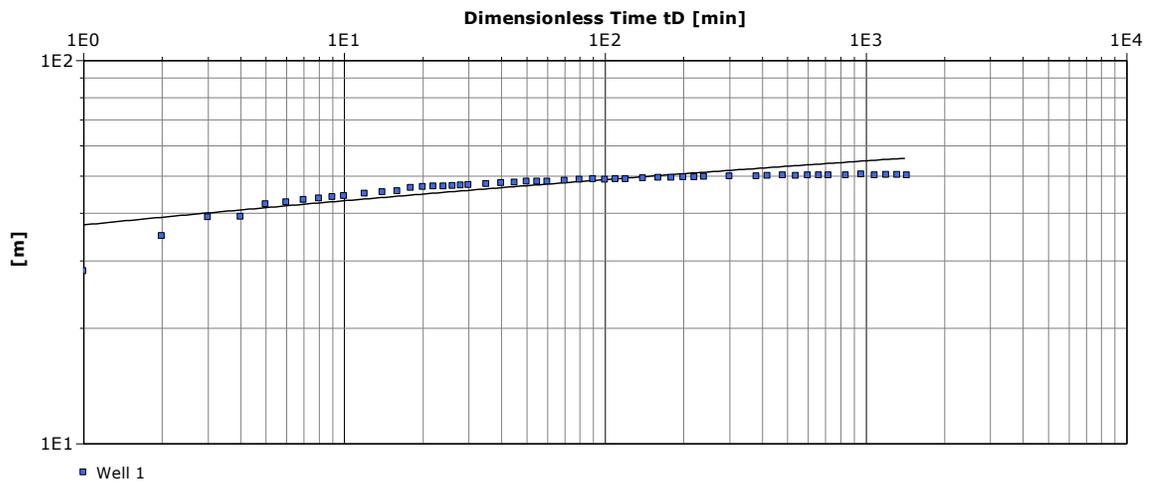


Figura 4-20. Gráfico log-log prueba caudal constante 80.2 l/s, pozo MPW-09.

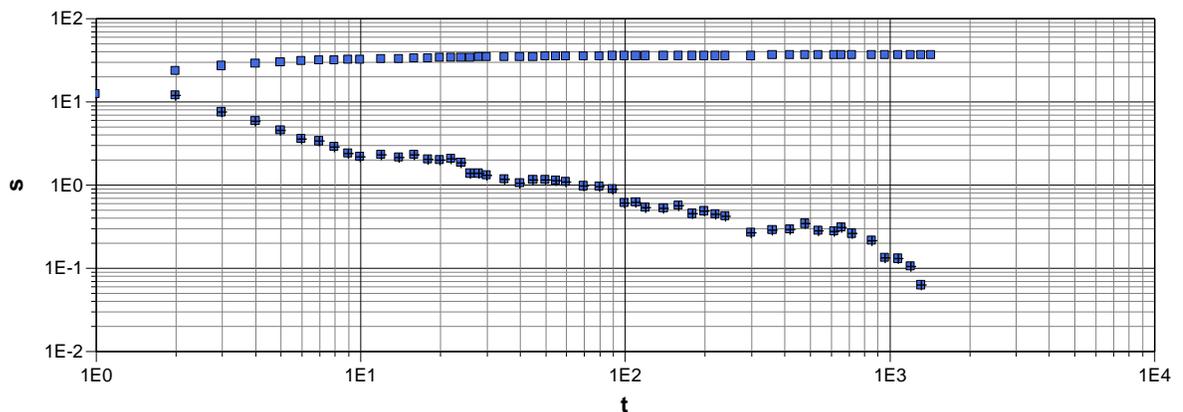


Figura 4-21. Curva superior: Gráfico log-log descenso vs tiempo. Curva inferior: Derivada del descenso en función del tiempo, pozo PW-09

MPW-14, MPW-15, MPW-16, MPW -17, MPW-18, MPW-18, MPW-19 y MPW-20

Estos pozos fueron catalogados con un comportamiento de acuífero confinado, las pruebas de bombeo al no contar con pozos de observación generan gráficos que no son totalmente claros, pero no obstante algunos si logran mostrar un comportamiento de acuífero confinado, como MPW-15,16,17,18 y 19 ( Figura 4-24, Figura 4-25, Figura 4-26, Figura 4-27, Figura 4-28, Figura 4-29, Figura 4-30, Figura 4-31, Figura 4-32, Figura 4-33, Figura 4-34 y Figura 4-35) .El objetivo de este análisis, más que determinar el comportamiento en específico de cada pozo es el poder identificar que existen distintos comportamientos hidráulicos.

Sobre los gráficos diagnóstico, la curva está condicionada por una condición de borde de

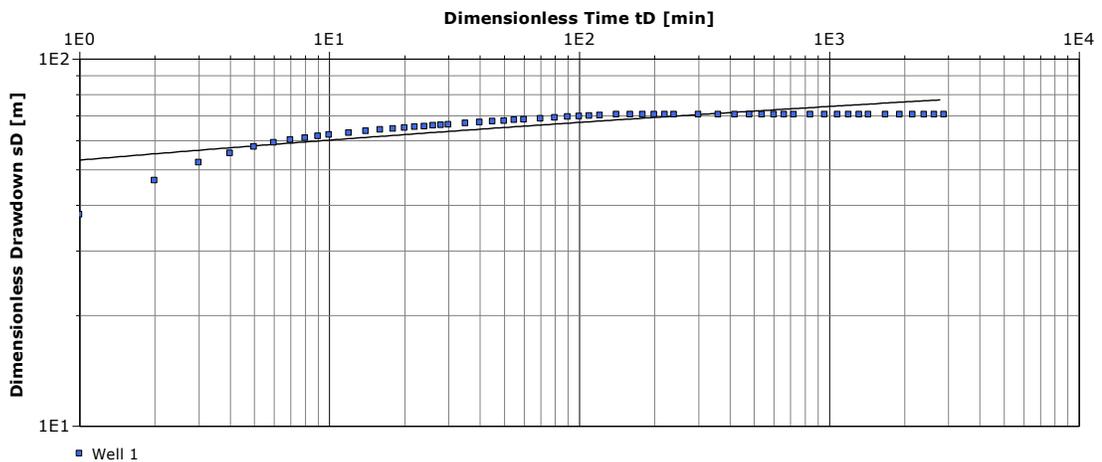


Figura 4-22. Gráfico log-log prueba caudal constante 37.8 l/s, pozo MPW-14

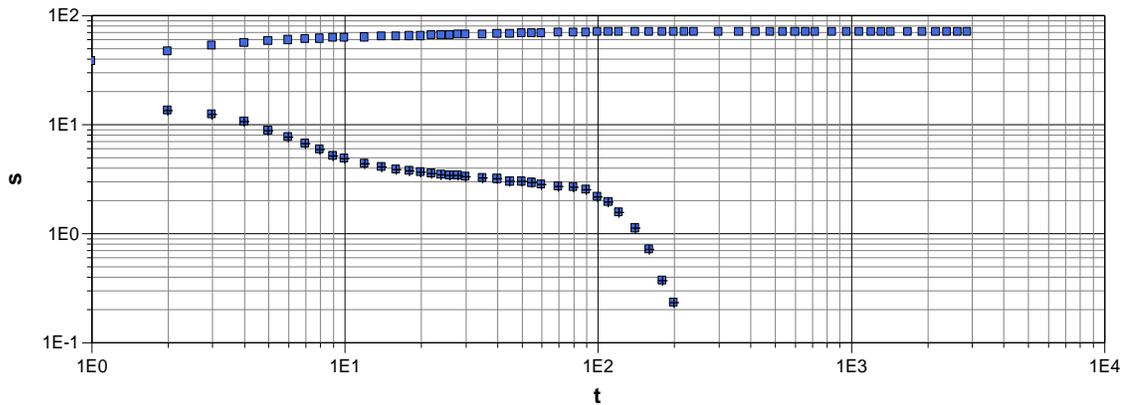


Figura 4-23. Curva superior: Gráfico log-log descenso vs tiempo. Curva inferior: Derivada del descenso en función del tiempo, pozo MPW-14

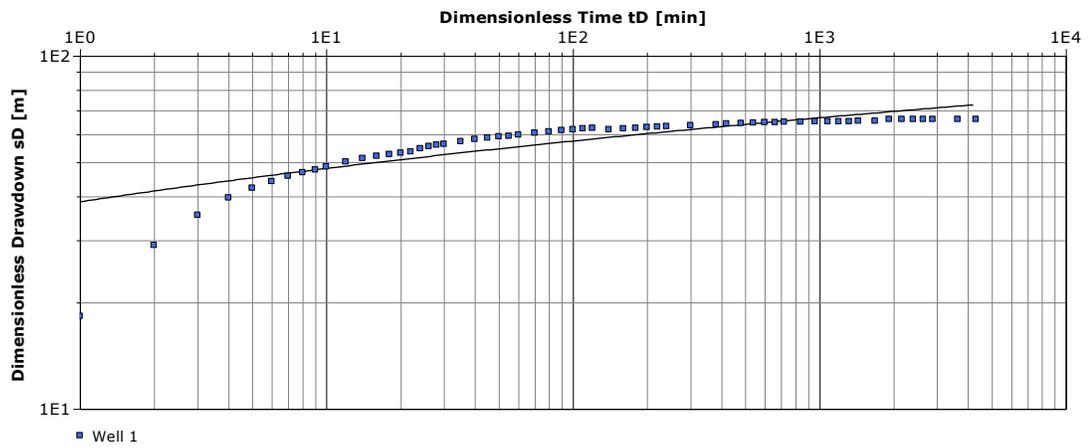


Figura 4-24. Gráfico log-log prueba caudal constante 31.9 l/s, pozo MPW-15.

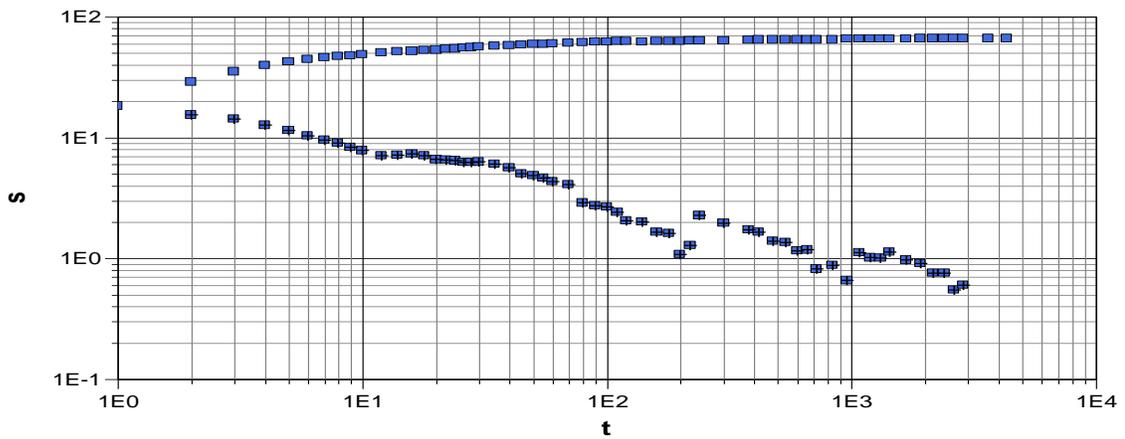


Figura 4-25 Curva superior: Gráfico log-log descenso vs tiempo. Curva inferior: Derivada del descenso en función del tiempo, pozo MPW-15.

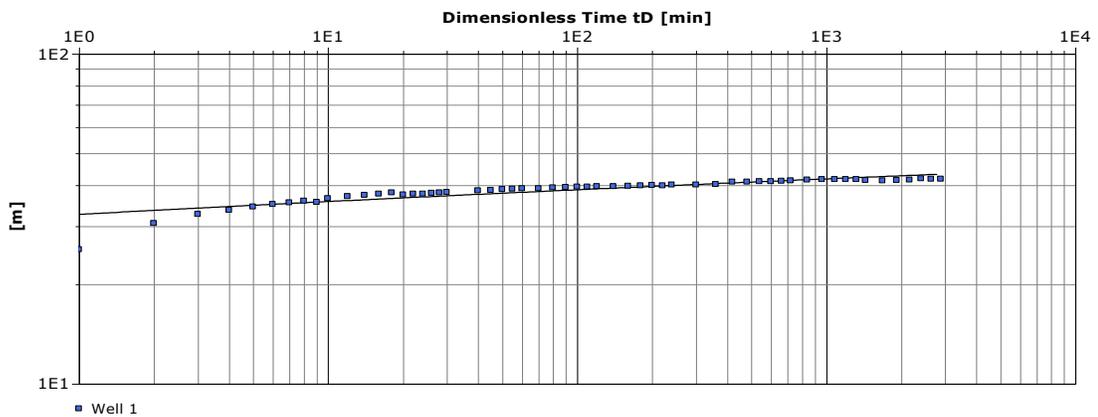


Figura 4-26. Gráfico log-log prueba caudal constante 101.1 l/s, pozo MPW-16.

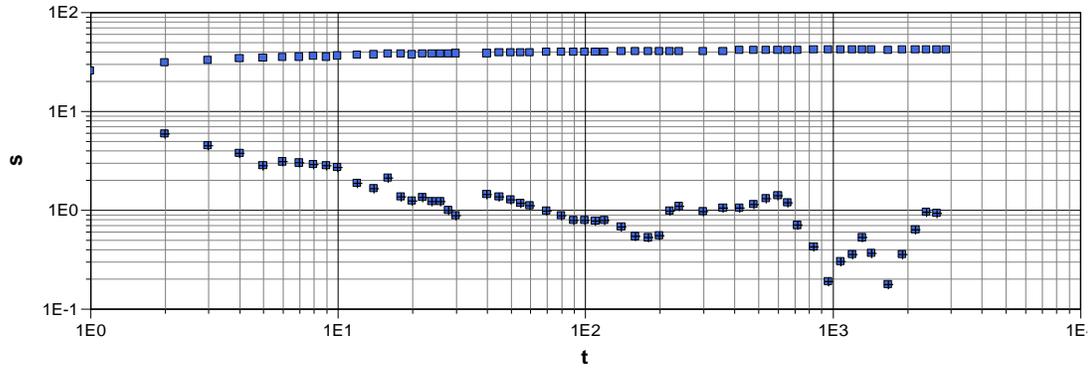


Figura 4-27 Curva superior: Gráfico log-log descenso vs tiempo. Curva inferior: Derivada del descenso en función del tiempo, pozo MPW-16.

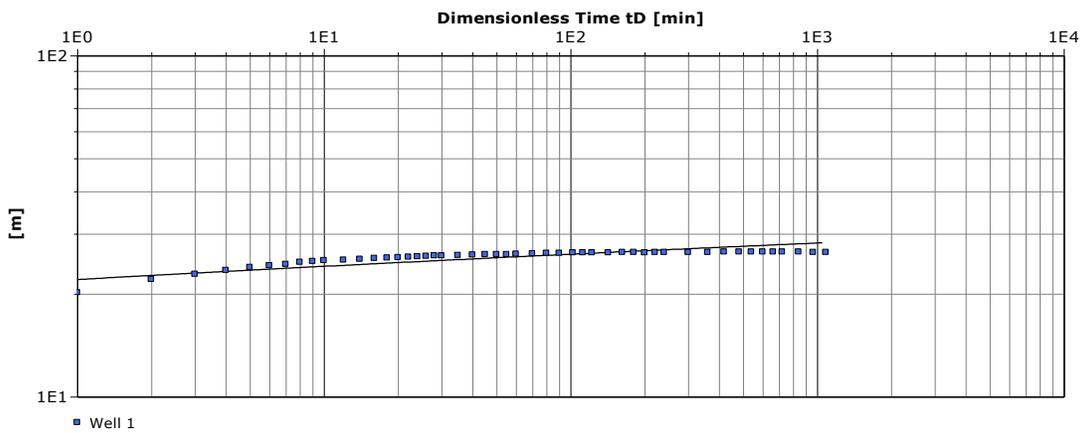


Figura 4-28. Gráfico log-log prueba caudal constante 72.1 l/s, pozo MPW-17.

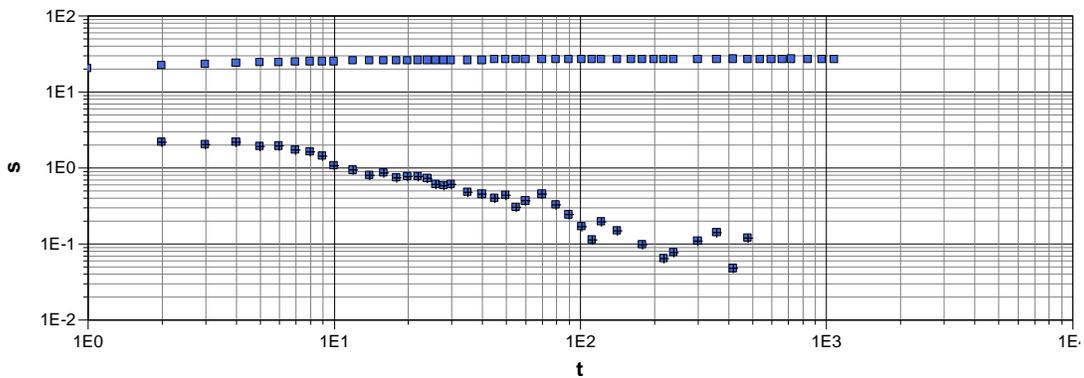


Figura 4-29 Curva superior: Gráfico log-log descenso vs tiempo. Curva inferior: Derivada del descenso en función del tiempo, pozo MPW-17.

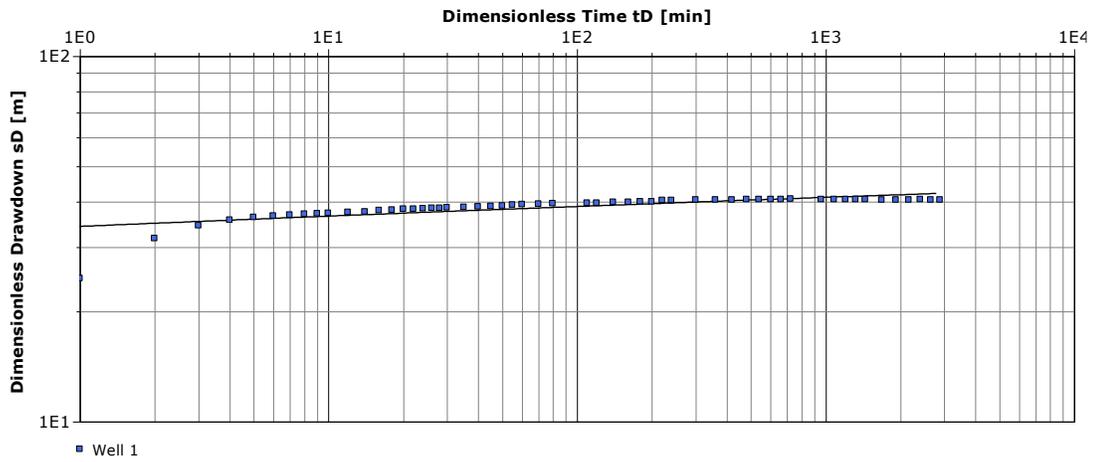


Figura 4-30. Gráfico log-log prueba caudal constante 60.4 l/s, pozo MPW-18.

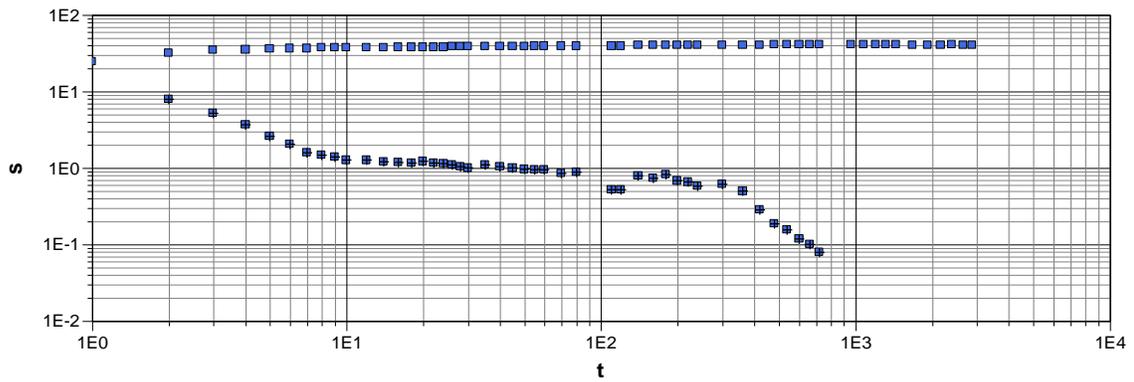


Figura 4-31. Curva superior: Gráfico log-log descenso vs tiempo. Curva inferior: Derivada del descenso en función del tiempo, pozo MPW-18.

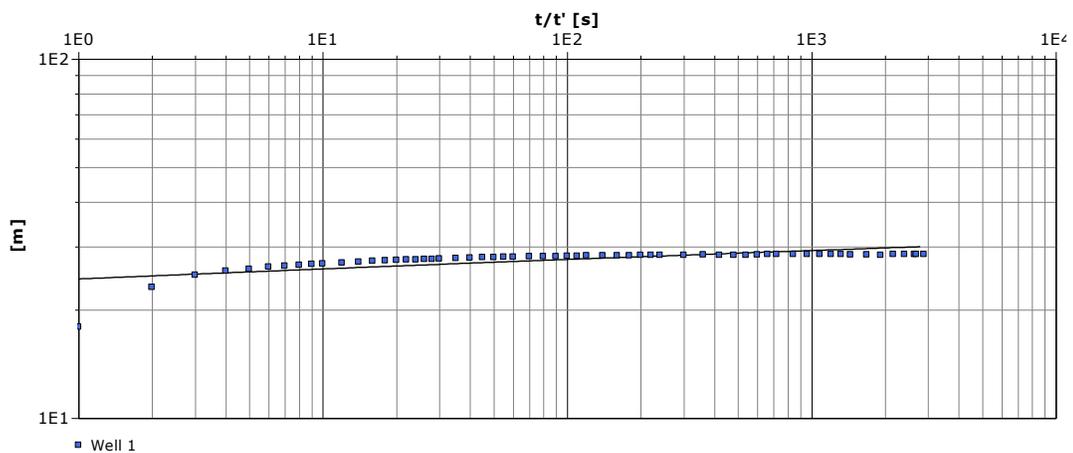


Figura 4-32. Gráfico log-log prueba caudal constante 78.1 l/s, pozo MPW-19.

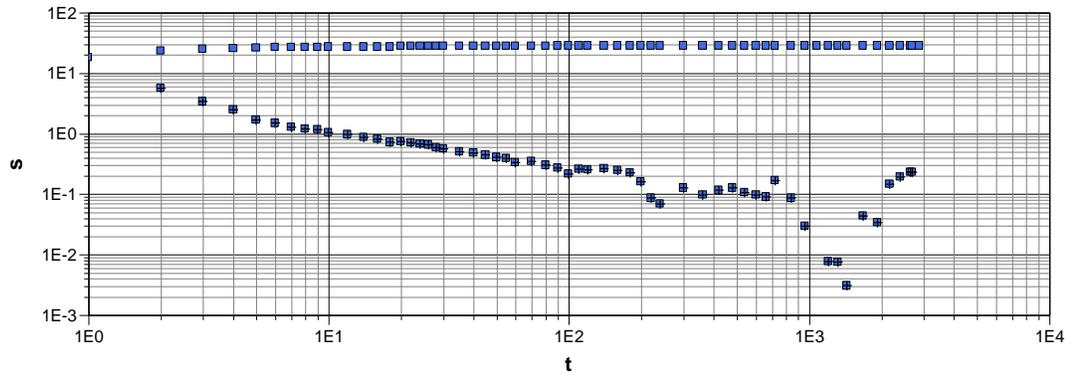


Figura 4-33. Curva superior: Gráfico log-log descenso vs tiempo. Curva inferior: Derivada del descenso en función del tiempo, pozo MPW-19

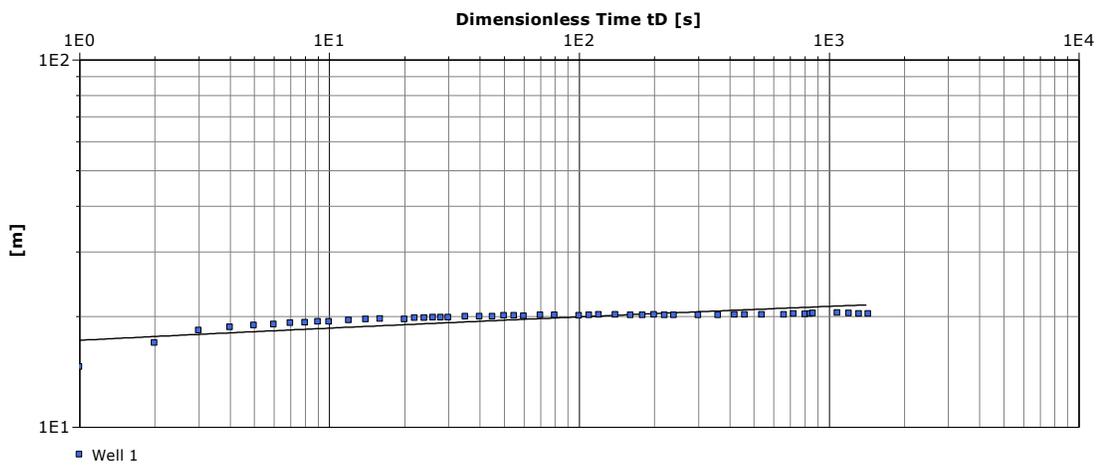


Figura 4-34. Gráfico log-log prueba caudal constante 64.2 l/s, pozo MPW-20.

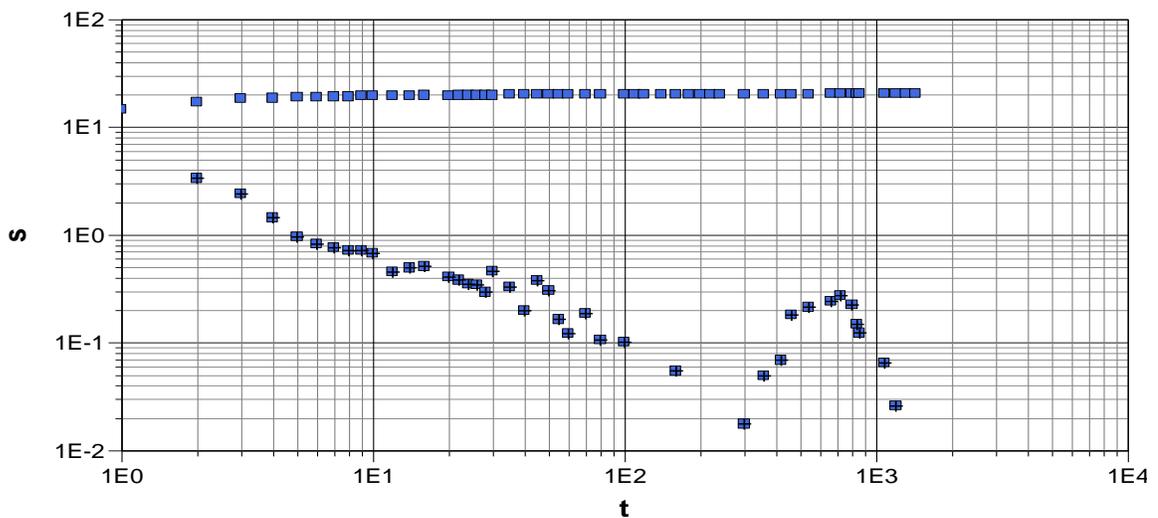


Figura 4-35. Curva superior: Gráfico log-log descenso vs tiempo. Curva inferior: Derivada del descenso en función del tiempo, pozo MPW-20.

### 4.3.2 Prueba Bombeo Negrillar

En el año 1992 la empresa Compañía Minera Zaldívar Ltda. llevo a cabo varias pruebas de bombeo con el objetivo de estudiar el acuífero Negrillar y a la vez solicitar derechos de agua a la Dirección General de Aguas. Dichas pruebas se realizaron mediante el bombeo de gasto constante de los pozos llamados NEP y la medición de niveles se realizó tanto en el pozo de bombeo como en los pozos de observación, llamados NEX. En este trabajo se presenta la prueba correspondiente al pozo NEP-5 y NEX-5, ubicados en la parte sur del acuífero Negrillar. Este acuífero ha resaltado a lo largo de los años por sus altos valores de transmisividad y almacenamiento presentado en los Estudios de Impacto Ambiental, transmisividades en torno a los 3000 m<sup>2</sup>/d y coeficiente de almacenamiento 0,2 (Anderson, 2002). La Figura 4-36 muestra la ubicación de los Pozos NEP-5 y NEX-5.

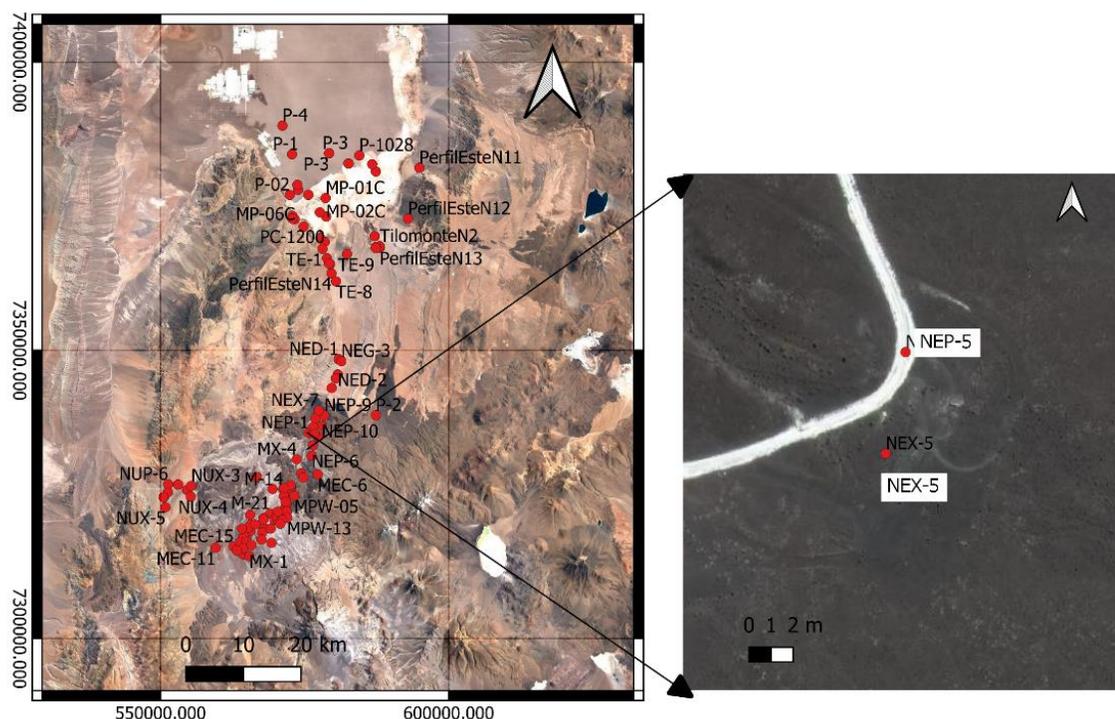


Figura 4-36. Ubicación de los pozos NEP-5 (bombeo) y NEX-5. Ambos pozos se encuentran al norte de Monturaqui y en a la zona sur de Negrillar.

Los pozos son prácticamente iguales, tanto NEP-5 como NEX-5, ambos cribados desde los 130 metros de profundidad hasta aproximadamente los 240 metros (ver Anexo). El acuífero Negrillar se cataloga como un acuífero libre, en la Figura 4-37 se observa el gráfico de descenso versus tiempo tanto para el pozo de bombeo como para el pozo de observación, además se presenta el grafico diagnóstico y los distintos tipos de flujo hacia el pozo. En la Figura 4-38, la geología a partir de la Hoja Toconao y la proyección de las fallas, que en este caso se presentan fallas normales, en este trabajo no se profundizo en la geología estructural de la zona, de todas maneras, se presentan para dar un contexto y la relevancia de estas.

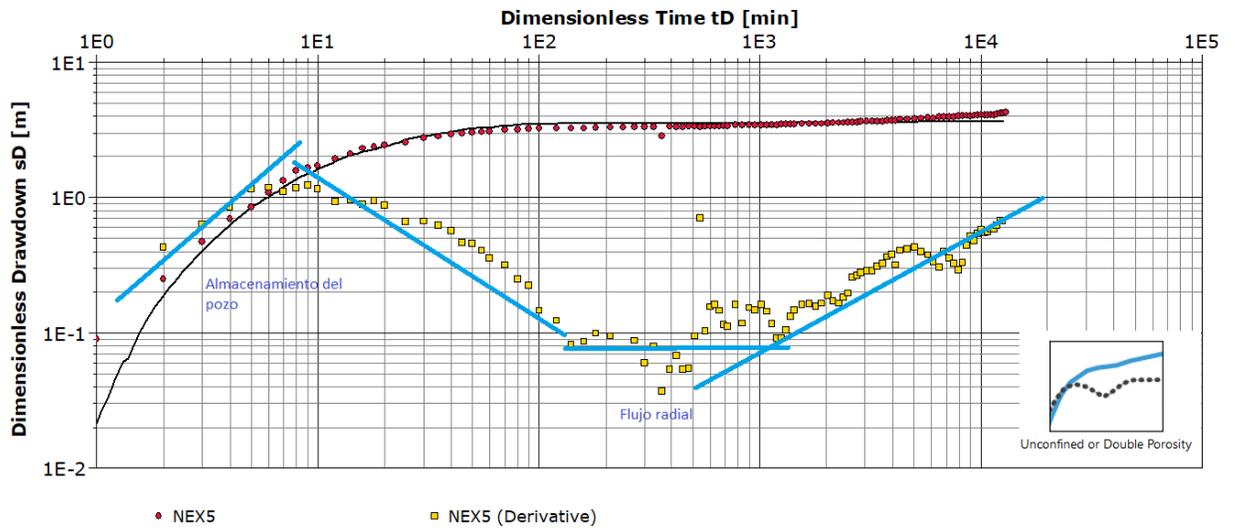


Figura 4-37. Grafico descenso versus tiempo y derivada del descenso.

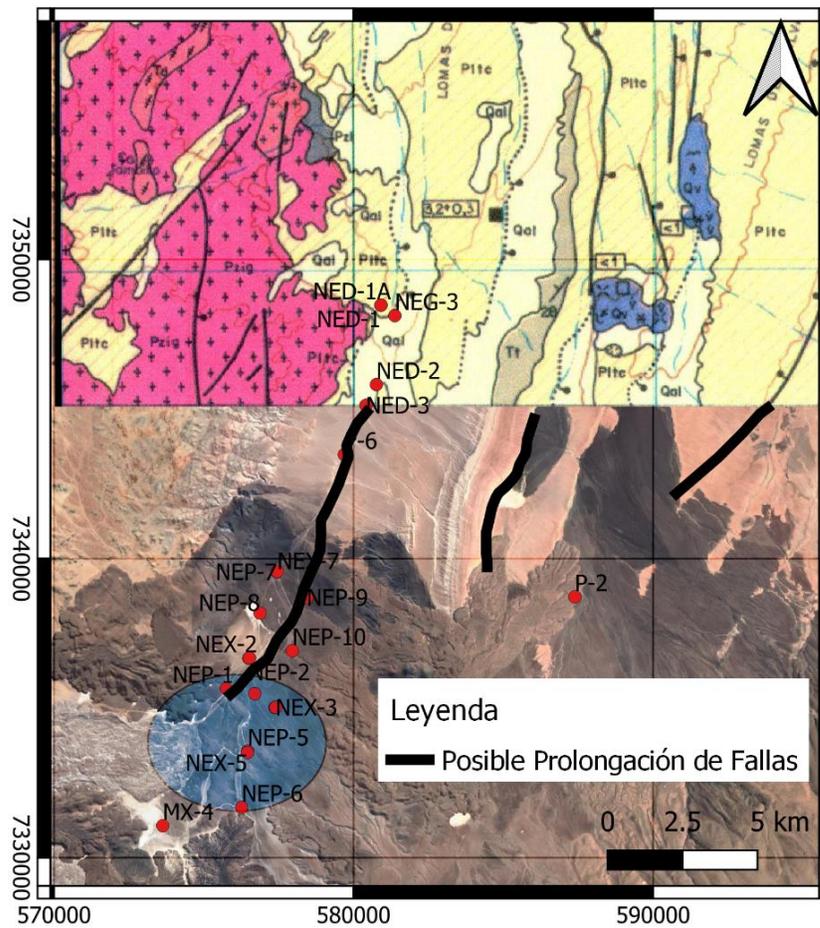


Figura 4-38. Hoja Toconao y prolongacion de las fallas hace la zona de Negrillar y Moonturaqui. Fuente : Ramirez, C. y Gardeweg M. (1982).

### 4.3.3 Cálculo de transmisividad y conductividad hidráulica

A partir de las pruebas de recuperación de gasto constante se calcula la transmisividad y conductividad hidráulica. El cálculo se realiza en el software AquiferTest, el método usado corresponde al método de Recuperación de Theis, se optó por usar las pruebas de recuperación debido a que no se contaba con pozos de observación (Excepto NEP-5), para evitar que los valores obtenidos de transmisividad contengan el error producto de pérdidas de carga del pozo.

Tabla 4-1. Transmisividad y conductividad hidráulica calculada en base a las pruebas de recuperación.

Pozo	Tipo	T m <sup>2</sup> /d	K m/d	Sy
MPW-02	Confinado	531	3.32	-
MPW-08	Libre	176	0.98	-
MPW-09	Confinado	297	1.83	-
MPW-10	Libre	77	0.47	-
MPW-11	Libre	143	0.91	-
MPW-12	Libre	103	0.63	-
MPW-13	Libre	65	0.40	-
MPW-14	Confinado	40	0.24	-
MPW-15	Confinado	35	0.20	-
MPW-16	Confinado	478	2.55	-
MPW-17	Confinado	512	3.10	-
MPW-18	Confinado	353	1.77	-
MPW-19	Confinado	978	6.19	-
MPW-20	Confinado	568	3.25	-
NEX-5	Libre	2050	8.2	0.3

A continuación, se muestran las figuras que resumen las características principales de los pozos. En general en el sector este, se tiene los pozos que han mostrado un comportamiento de acuífero libre, está la excepción de los pozos MPW-14 y MPW-15. De todas maneras, las pruebas de bombeo al no tener pozos de observación, queda ese margen de error asociado a los errores de medir en el mismo pozo de bombeo. Lo que si queda de manifiesto es que esos pozos (marcados en verde en la Figura 4-39 muestran un comportamiento distinto al resto, lo que se podría deber a la cercanía con la formación Purilactis de baja permeabilidad (Posiblemente fracturada).

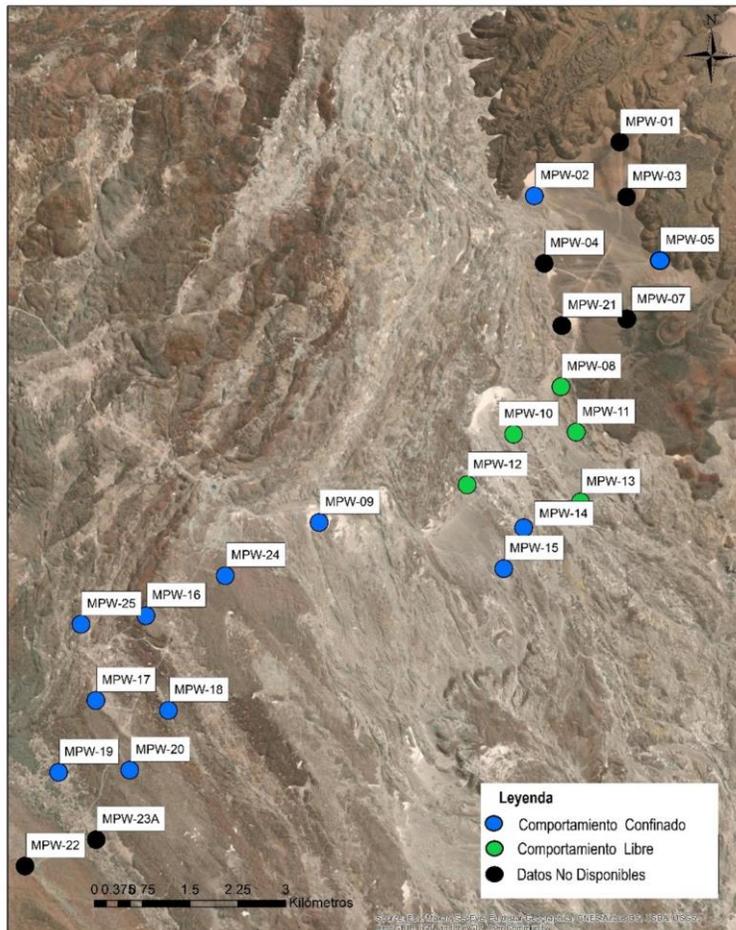


Figura 4-39. Comportamiento de los pozos en las pruebas de bombeo.

En cuanto a las características hidráulicas, las profundidades del nivel de agua en los pozos van desde los 68 metros hasta los 125 metros (medidos los días de las pruebas de bombeo, antes del inicio). Los caudales de explotación parten en 31.9 l/s y los valores más altos superan los 100 l/s, los mayores caudales se dan en el sector sur de Monturaqui, donde las transmisividades menores son en torno a 250 m<sup>2</sup>/d y las mayores de 1000 m<sup>2</sup>/d (Pozo MPW-19). Los pozos que en la prueba de bombeo mostraron un comportamiento confiado, muestra mayor capacidad de transmitir y explotar el recurso hídrico. En general el acuífero Monturaqui podría catalogarse como un acuífero semi confinado.

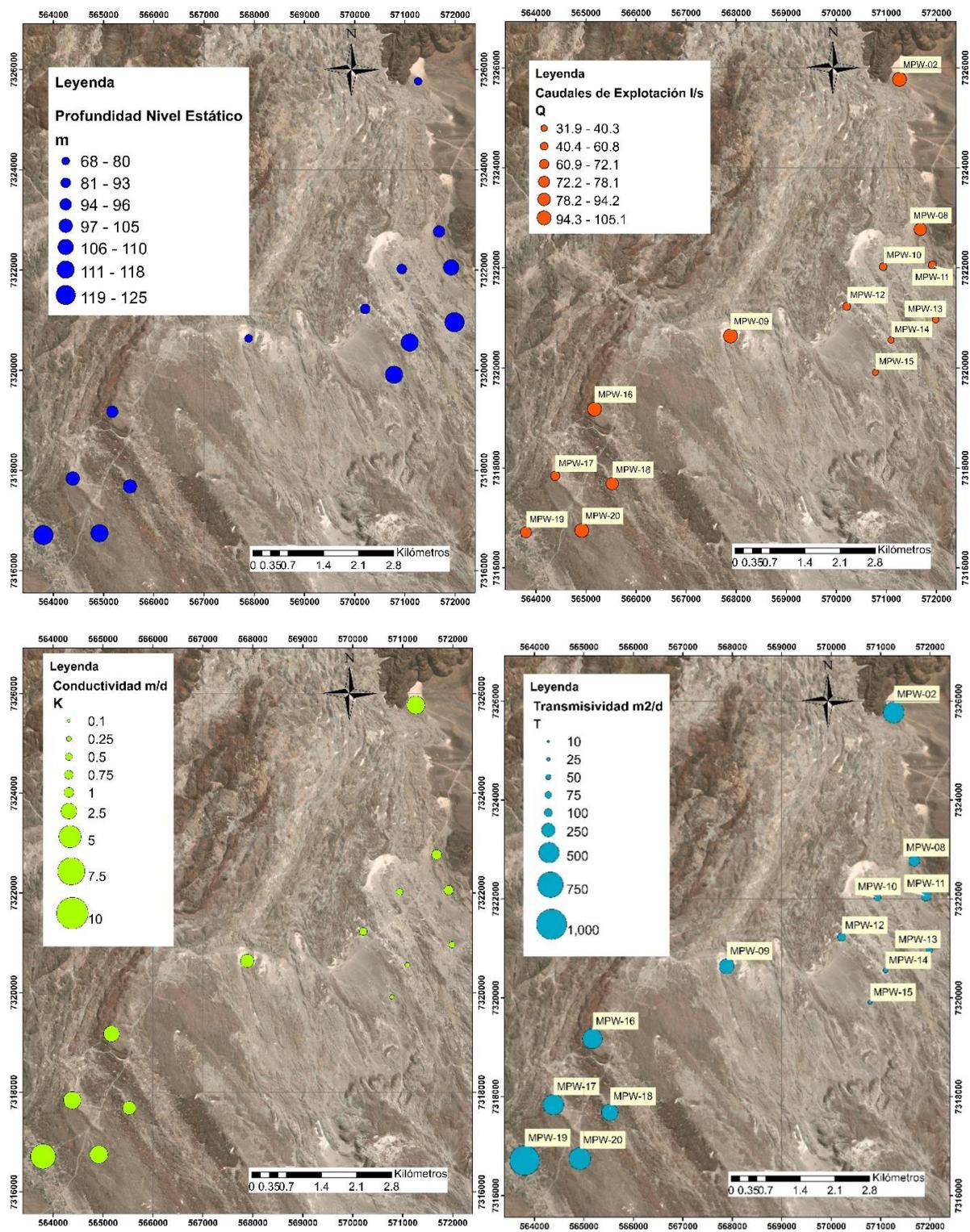


Figura 4-40. Propiedades de los pozos de explotación de Monturaqui.

Las pruebas de caudal variable disponibles se utilizan para calcular los coeficientes de perdidas en los pozos de bombeo y a partir de ellos se puede calcular la eficiencia de los pozos. La eficiencia de un pozo de bombeo debería estar sobre un 70%, destaca el pozo MPW-09 el cual posee una alta eficiencia para un caudal de explotación sobre los 100 l/s (dentro de los caudales más altos explotados).

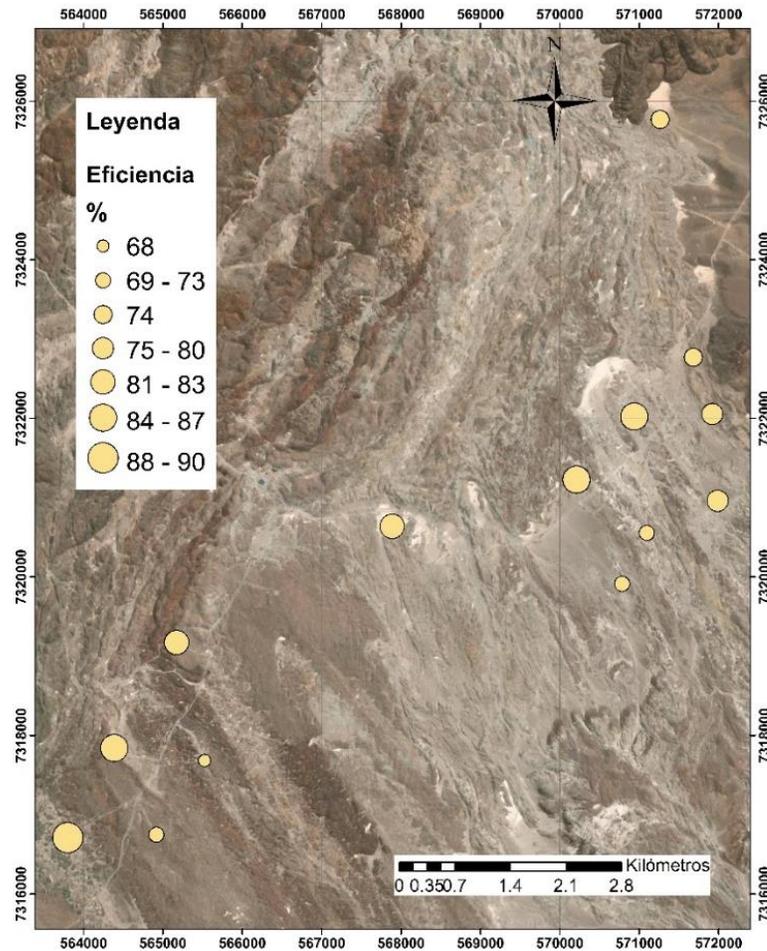


Figura 4-41. Eficiencia de los Pozos de Bombeo.

## 4.4 Funcionamiento del sistema

### 4.4.1 Edad y origen de las aguas aportantes al acuífero MNT

En el año 2018 por parte de Compañía Minera Zaldívar Ltda. se realizó un estudio isotópico, donde se analizaron en el Isotope Tracer Technologies Inc. (Waterloo, Canada) isotopos de tritio y carbono 14. Los pozos muestreados se observan en la Figura 4-42.

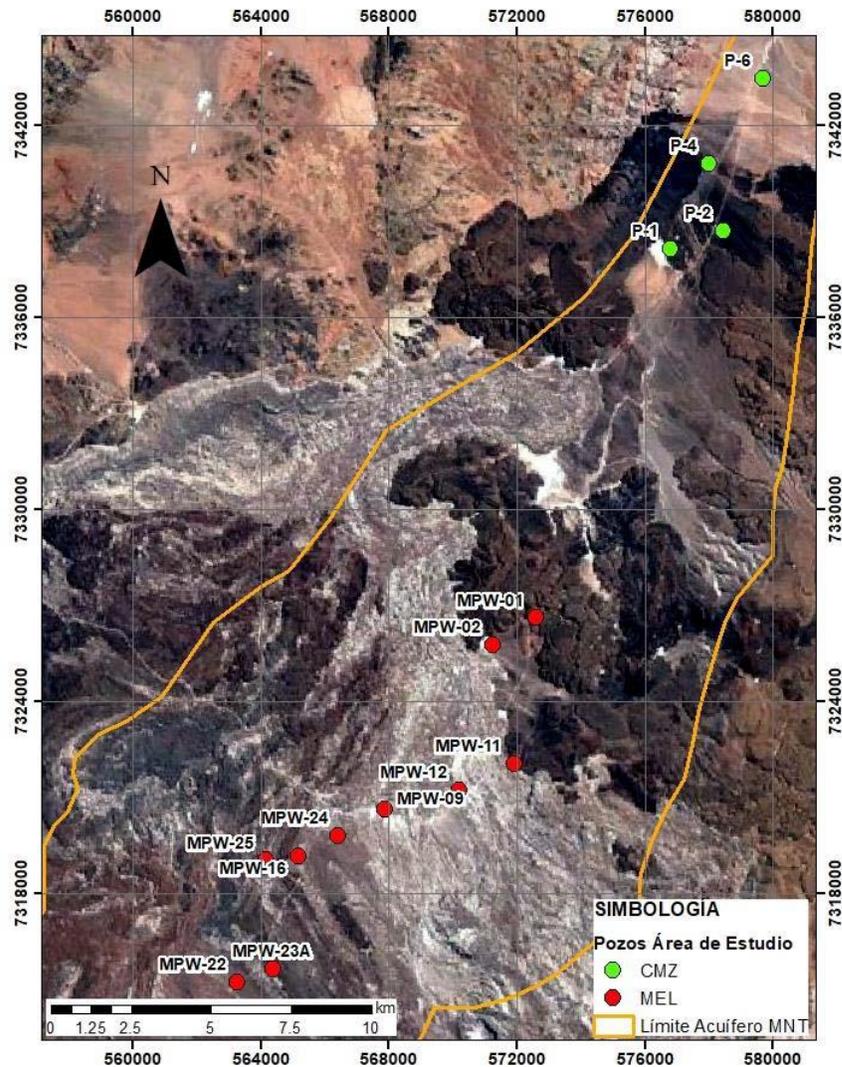


Figura 4-42. Pozos con análisis químico e isotópico. Fuente: Compañía Minera Zaldívar (2018).

En el caso del tritio ( $^3\text{H}$ ) el periodo de vida media es de unos 12 años, en general se utiliza para poder reconocer aguas de recarga de hasta unos 55 años hacia atrás desde el momento en que se analiza la muestra. Si una muestra de agua subterránea contiene una cantidad importante de tritio ello constituye una prueba inequívoca de que el agua se ha recargado durante las últimas dos o tres décadas (OIEA Boletín, Vol.24, N°3).

En el caso de la datación a través del  $^{14}\text{C}$ , tiene su fundamento en la medición en las especies carbonatadas del agua, que en su mayoría proviene de la disolución del  $\text{CO}_2$  atmosférico por las lluvias y el  $\text{CO}_2$  del suelo disuelto e incorporado al agua durante el proceso de infiltración. El periodo de vida media del  $^{14}\text{C}$  es de 5.730 años, este isótopo permite la datación de aguas con edades comprendidas entre los 200 (aguas recientes) hasta un límite superior a los 35.000 años (Plata, 1972). En el caso de las aguas del acuífero MNT, que son ricas en carbonatos, produciendo que al analizar por  $^{14}\text{C}$ , arrojen edades mayores a las reales. Existe un método de corrección basado en la desviación isotópica del  $^{13}\text{C}$ , permitiendo identificar las fuentes de  $\text{CO}_2$  que intervienen en el sistema carbonato- $\text{CO}_2$ . En la Tabla 4-2 se presentan los resultados obtenidos.

Tabla 4-2. Resultado del análisis isotópico de las aguas de los pozos de Monturaqui y Negrillar.

Pozo	Prop	$\delta^{13}\text{C}$ (‰ PDB)	$\text{F}^{14}\text{C}$	pMC	Edad Carbono-14 no corregido BP	$^3\text{H}$ (T.U.)	Límite Detección Tritio (T.U.)
P-6	CMZ	0,5	<0,010	<0,1	>36.900	<0,8	0,8
P-4	CMZ	0,7	<0,010	<1,0	>36.900	<0,8	0,8
P-2	CMZ	0,1	0,0220	2,2	30.665	<0,8	0,8
P-1	CMZ	0,6	0,0241	2,4	29.923	<0,8	0,8
MPW-01	MEL	-0,5	0,0171	1,7	32.660	<0,5	0,5
MPW-02	MEL	1,0	0,0089	0,9	37.930	<0,9	0,9
MPW-11	MEL	-0,2	0,0231	2,3	30.270	<0,9 (aparente 0,6)	0,9
MPW-12	MEL	1,2	0,0081	0,8	38.730	<0,5	0,5
MPW-09	MEL	0,1	0,0177	1,8	32.410	<0,6	0,5
MPW-24	MEL	0,8	0,0191	1,9	31.780	<0,5	0,5
MPW-16	MEL	0,9	0,0275	2,8	28.860	<0,5	0,5
MPW-25	MEL	-0,2	0,0332	3,3	27.350	<0,8	0,8
MPW-23	MEL	0,5	0,0222	2,2	30.590	<0,5	0,5
MPW-22	MEL	0,3	0,0277	2,8	28.820	<1 (aparente 0,6)	1,0

pMC: Porcentaje de Carbono Moderno; T.U. Unidades tritio; BP: Before Present (antes del presente) Fuente: Compañía Minera Zaldívar (2018)

De lo anterior se puede inferir que ninguna de las aguas muestra contenido de Unidades de Tritio, por lo que son aguas con edades sobre los 55 años. En cuanto al  $^{14}\text{C}$ , en este trabajo de título no se corrigieron las edades, debido a que son varias las componentes que aportan carbonatos al sistema, además se debe considerar la presencia volcánica de la zona, lo que hace que el cálculo no sea simple (En el informe de GCF Ingenieros, no se realizó una corrección de las edades). De todas maneras, se puede inferir que las aguas serian milenarias y que todas tienen edades similares. Las aguas que presentan mayor temperatura (cercanas al arco volcánico) arrojan edades mayores.

En Negrillar donde se ubican los pozos P-1, P-2, P-4 y P-6 existe un cambio en las edades al pasar desde los dos primeros a los últimos dos (edades sobre 36.900 años), dicho cambio coincide con la caída del basamento. P-4 y P-6 se encuentran hacia el centro-norte de Negrillar donde el espesor del relleno es en torno a los 1000 metros (Pozo NED-2), por lo que las aguas tienen un tiempo de residencia importante en el acuífero y una velocidad de flujo baja hacia el salar.



## 5 Discusión

La cuenca del MNT está alojada en un basamento del Paleozoico y la alta actividad tectónica dio como resultado el graben orientado NS. Dicha cuenca fue rellenada, especialmente por sedimentos volcánicos y aluviones. La unidad principal formadora del acuífero es la Formación Salin, compuesta una secuencia de limos, arenas y gravas intercaladas. La fuerte actividad volcánica dio origen a una extensa capa de ignimbrita permeable, la cual en conjunto con la Formación Salin se extienden fuera del dominio del acuífero Monturaqui, hacia el sur.

Así el modelo geológico muestra como a través de estas dos unidades, Formación Salin e Ignimbrita Tucucaro el flujo se desplaza desde la parte sur y sureste (fuera del límite topográfico de la cuenca). Pasando por el arco volcánico, en donde las aguas se enriquecen en elementos de origen volcánico.

En este trabajo se plantea que las aguas tienen un origen común en precipitaciones en la zona alta, sobre los 4000 m.s.n.m. (Anderson et. al., 2002) y que el flujo a través de distintas unidades geológicas es la que determina su composición al llegar al acuífero Monturaqui, en el caso del estudio de Rissmann et al., (2015), plantea que hay aportes desde la zona sur, flujos subregionales y aportes desde el este de aguas con mayor contenido de sales, producto de un reciclaje de salares del arco volcánico. La posterior mezcla de las aguas se ve condicionada por la permeabilidad del acuífero. Las aguas mencionadas por Rissmann como de tipo 1, coinciden en gran medida con la ubicación del acuífero libre, de menor permeabilidad, influenciado además por la existencia de la formación Purilactis de baja permeabilidad. Rissmann plantea un flujo salino de recarga que pasa directamente desde la zona este hacia el pozo MPW-09 justo en el centro del acuífero Monturaqui. En dicho recorrido del flujo existen formaciones poco permeables como la formación Purilactis, además no contempla las estructuras geológicas y más bien se propone una hipótesis para justificar las concentraciones anómalas en MPW-09, el cual presenta concentraciones de SDT mucho más elevadas (sobre 4000 mg/l) que el resto de los pozos MPW. Al analizar todos los pozos con análisis químico en la zona, no solo los de tipo MPW (producción), se encontró que varios pozos poseen concentraciones de SDT sobre los 4000 mg/l, incluso sobrepasando los 5000 mg/l. Según Rissmann esas aguas podrían entrar en la categoría de tipo 2-A al igual que las de MPW-09.

En la Figura 5-1 se observa que dichos pozos están alineados en la dirección de flujo hacia el norte, cuyas aguas corresponderían a más bien a profundas (mayores tiempos de

residencia) y que están relacionadas con la interacción con el Volcán Socompa. La linealidad de los pozos con dichas concentraciones podría ser explicado por rasgos estructurales de la zona, que no fueron profundizados en este trabajo.

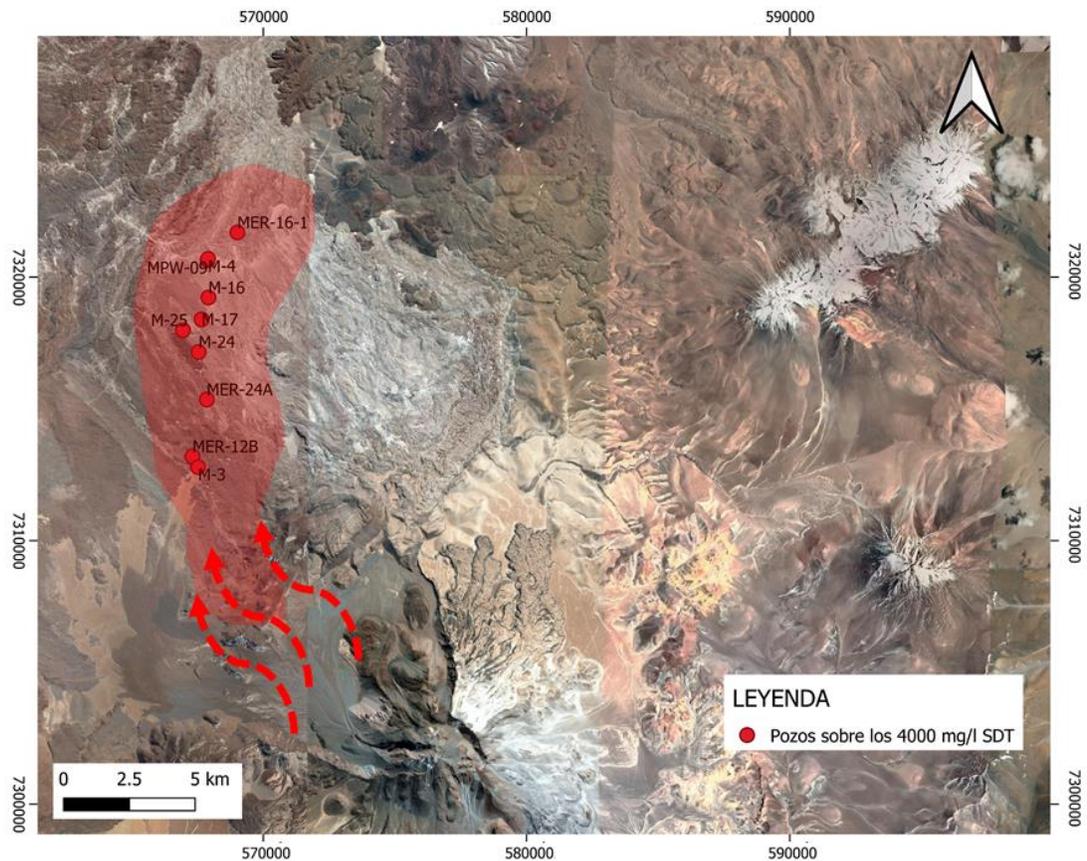


Figura 5-1. Pozos de Monturaqui con concentración de Sólidos Disueltos Totales (SDT) sobre los 4000 mg/l, pozos químicamente similares a MPW-09. El origen de las aguas con altas concentraciones difiere de lo planteado por Rissmann et al. (2015)

Respecto a las extracciones de agua por parte de la Minera Escondida Ltda. y Compañía Minera Zaldívar Ltda., a partir de este trabajo y la información recopilada especialmente de Anderson et al., (2002), es que la extracción de los 1800 l/s hasta 2019 y la actual por cerca de unos 400 l/s (continúa solo CMZ en Negrillar) está siendo amortiguada por la gran cantidad de agua almacenada por el acuífero. La afectación o no de zonas sensibles como las lagunas en el margen del salar se podría dar por extracciones en Negrillar y Tilopozo (caudales menores)

En cuanto a la afectación o no del funcionamiento del Salar en un contexto de cambio climático, las aguas de recarga que ingresan principalmente al acuífero Monturaqui tienen edades de como mínimo unos 55 años según los análisis de tritio y acotadas superiormente por miles de años, por lo que no deberían provocarse mayores desequilibrios producto de

cambios en las precipitaciones a escala de decenas de años. No obstante, existe una fuerte interacción con la actividad volcánica y los mayores cambios que se han experimentado en la zona se deben justamente a la interacción entre las aguas y los arcos volcánicos.

Se cree que los procesos que relacionan al Acuífero MNT con la formación del salar responden a condiciones hidrogeológicas e hidrogeoquímicas que no están presentes en la actualidad, como la existencia de salmueras enterradas y que debido a la magnitud del flujo pasante ya no quedarían mayores indicios a la hora de analizar muestras actuales.

## 6 Conclusiones

Sobre los modelos geológicos se puede concluir que en general son de gran ayuda a la hora de estudiar una zona compleja geológicamente, esto porque permite integrar tanto sondaje, cartas geológicas, geología estructural y un DEM. El reconstruir la geología requirió comprender los distintos procesos que dieron origen a lo que actualmente existe y al mismo tiempo cuantificar la importancia o interacción de la geología con los flujos de agua.

Del modelo se pudo inferir el rol relevante que tiene la actividad tectónica y volcánica en la zona, donde estos procesos son los que dieron origen a la cuenca de Monturaqui y Negrillar.

Geomodeller es un software apto para realizar este tipo de trabajo, la mayor dificultad se dio debido a que no realiza interpolación directa de sondajes, sino que la proyección de estos en secciones, un modelo con mayor detalle requerirá de la creación de más secciones y la proyección de un mayor número de sondajes. La creación de sondajes ficticios es de gran ayuda cuando hay zonas sin sondajes para proyectar. De todas maneras, se recomienda fortalecer el trabajo en 2D antes de trabajar en softwares de modelación 3D, ya que estos son complejos y sensibles a variaciones en los datos ingresados, teniendo un trabajo robusto en 2D, se vuelve sencillo pasar a modelos 3D.

Ahora, respecto a las pruebas de bombeo, se considera que el objetivo fue medianamente logrado, debido a la falta de pozos de observación en la zona de Monturaqui. En el caso de Negrillar al contar con uno, el cambio en la calidad de la información es notorio, especialmente en el grafico diagnóstico, donde se logran identificar de forma clara los tipos de flujo (además considerar la extensión de la prueba, 9 días).

Sobre el acuífero Monturaqui- Negrillar- Tilopozo, sería interesante extender el estudio realizado por Rissmann sobre la química hacia Negrillar y sumar nuevos datos tomados en la zona, como los datos de isotopos de  $^3\text{H}$  y  $^{14}\text{C}$ , además repetir el trabajo de Anderson usando el modelo geológico 3D mediante un código de flujo, por ejemplo, Modflow, ya que Geomodeller permite exportar la grilla generada.

## 7 Bibliografía

Anderson, M., Low, R., & Foot, S. (2002). Sustainable groundwater development in arid, high Andean basins. Geological Society Special Publication, 193, 133–144. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.2002.193.01.11>

Ayala, C., & Rey, C. (2009). Establecimiento de bases metodológicas para la obtención de cartografía gravimétrica 1:50.000. aplicación a la modelización 2d y 3d en varias zonas de la península ibérica. Capítulo 6. [http://info.igme.es/SidPDF/151000/881/151881\\_0000001.pdf](http://info.igme.es/SidPDF/151000/881/151881_0000001.pdf)

Charrier, R., & Reutter, K.-J. (1994). The Purilactis Group of Northern Chile: Boundary Between Arc and Backarc from Late Cretaceous to Eocene. Tectonics of the Southern Central Andes, 189–202. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-77353-2\\_13](https://doi.org/10.1007/978-3-642-77353-2_13)

Cowan, E., Lane, J., & Ross, H. (2004). Leapfrog's implicit drawing tool: a new way of drawing geological objects of any shape rapidly in 3D. Australian Institute of Geoscientists.

Durán Ariza, R. (2012). Modelación numérica y su contribución al estudio del comportamiento hidrogeológico del sector SW del acuífero del Salar de Atacama, II Región de Antofagasta, Chile. Disponible en <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/111152>.

Favetto, Al., Pomposiello, C., Guevara, L., & Giordanengo, G., (2018). Relevamiento Magnetotellurico Geofísico del Sector Compreendido entre la Quebrada del Agua y la Laguna Socompá, Puna Argentina. 51 p. Buenos Aires, Instituto de Geocronología y Geología Isotópica – CONICET. <http://repositorio.segemar.gov.ar/308849217/2138>

Gestión Ambiental Consultores. (2017). Estudio para el análisis y preparación de un plan de trabajo en relación con las distintas RCA sobre el Salar de Atacama. Comité de minería no metálica CORFO, 254. <http://www.minerianometalica.cl/wp-content/uploads/2018/02/Estudio-levantamiento-RCA-Salar-Atacama-Informe-final.pdf>

Golder Associates. (2017). Modelo Hidrogeológico Conceptual y Numérico para el Acuífero de Monturaqui- Negrillar-Tilopozo. Servicio de Evaluación Ambiental.

J., Sáez, A., & Valero-Garcés, B. L. (2006). Relación de aguas superficiales y subterráneas en el área del lago Chungará y lagunas de Cotacotani, norte de Chile: un estudio isotópico. Revista Geológica de Chile, 33(2), 299–325. <https://doi.org/10.4067/S0716-02082006000200005>

Kelfoun, K., Druitt, T., van Wyk de Vries, B., & Guilbaud, M. N. (2008). Topographic reflection of the Socompa debris avalanche, Chile. *Bulletin of Volcanology*, 70(10), 1169–1187. <https://doi.org/10.1007/s00445-008-0201-6>

Magnabosco de Almeida, R. (2020) Modelo hidrogeológico conceitual e análise da favorabilidade hidrogeológica do aquífero cárstico na região urbana de Sete Lagoas – MG. Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto.

Maliva, R. G. (2016). *Aquifer Characterization Techniques: Schlumberger Methods in Water Resources Evaluation Series No. 4* (1st ed. 2016.). Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-32137-0>

Meseguer-Ruiz, O., Cortesi, N., Guijarro, J. A., & Sarricolea, P. (2020). Weather regimes linked to daily precipitation anomalies in Northern Chile. *Atmospheric Research*, 236(October 2019), 104802. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2019.104802>

Moral, C. R., Luis, J., Lobón, G., Marín, C., Maria, L., Reguera, I., Ángela, G., & Sanz, J. (2013). Modelo geológico 3D del acuífero de mediodía y evaluación de sus reservas totales de agua subterránea. [http://info.igme.es/SidPDF/166000/791/166791\\_0000001.pdf](http://info.igme.es/SidPDF/166000/791/166791_0000001.pdf)

Munk, L. A., Boutt, D. F., Hynek, S. A., & Moran, B. J. (2018). Hydrogeochemical fluxes and processes contributing to the formation of lithium-enriched brines in a hyper-arid continental basin. *Chemical Geology*, 493, 37–57. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2018.05.013>

Nijenhuis, A. (1991). *Order A Journal On The Theory Of Ordered Sets And Its Applications*, 43(February), 319–330.

Ortiz, C., Aravena, R., Briones, E., Suárez, F., Tore, C., & Muñoz, J. F. (2014). Origine des eaux de surface de l'écosystème du Soncor dans le bassin du salar d'Atacama (Nord du Chili). *Hydrological Sciences Journal*, 59(2), 336–350. <https://doi.org/10.1080/02626667.2013.829231>

Paper, C. (2015). 5th International Mining Geology Conference. September.

Rissmann, C., Leybourne, M., Benn, C., & Christenson, B. (2015). The origin of solutes within the groundwaters of a high Andean aquifer. *Chemical Geology*, 396, 164–181. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2014.11.029>

Salas, J., Aravena, R., Guzmán, E., Cornellá, O., & J., G. (2009). Modelo de evolución hidroquímica e isotópica de la recarga del salar de atacama: soncor y aguas de quelana. 1-4.

Salas, J., Guimerà, J., Cornellà, O., Aravena, R., Guzmán, E., Tore, C., & Moreno, W. V. I. R. (2010). Hidrogeología del sistema lagunar del margen este del Salar de Atacama (Chile ). 121(4), 357–372.

Sendra, G., & Enguita, P. (2018). Estudio de modelos hidrogeológicos conceptuales integrados, para los salares de Atacama, Maricunga y Pedernales. Comité de minería no metálica CORFO & Amphos21.

Sindalovskiy, L. N. (2017). Aquifer Test Solutions. In Aquifer Test Solutions. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-43409-4>

Soto, J., Román-Figueroa, C., & Paneque, M. (2019). A model for estimating the vegetation cover in the high-altitude Wetlands of the Andes (HAWA). *Land*, 8(1), 1–17. <https://doi.org/10.3390/land8010020>

Superintendencia del Medio Ambiente Gobierno de Chile. (2018). Informe técnico de fiscalización ambiental. Inspección ambiental. Minera metálica manto verde de Mantos Copper. 1–35.

Ugalde, H., Valenzuela, M., & Milkereit, B. (2007). An integrated geophysical and geological study of the Monturaqui impact crater, Chile. *Meteoritics and Planetary Science*, 42(12), 2153–2163. <https://doi.org/10.1111/j.1945-5100.2007.tb01015.x>

# Anexos

Anexo A Estratigrafía sondajes MPW sector de  
Monturaqui y Negrillar

## DETALLE DE GEOLOGIA Y CONSTRUCCION DE POZO MPW-2

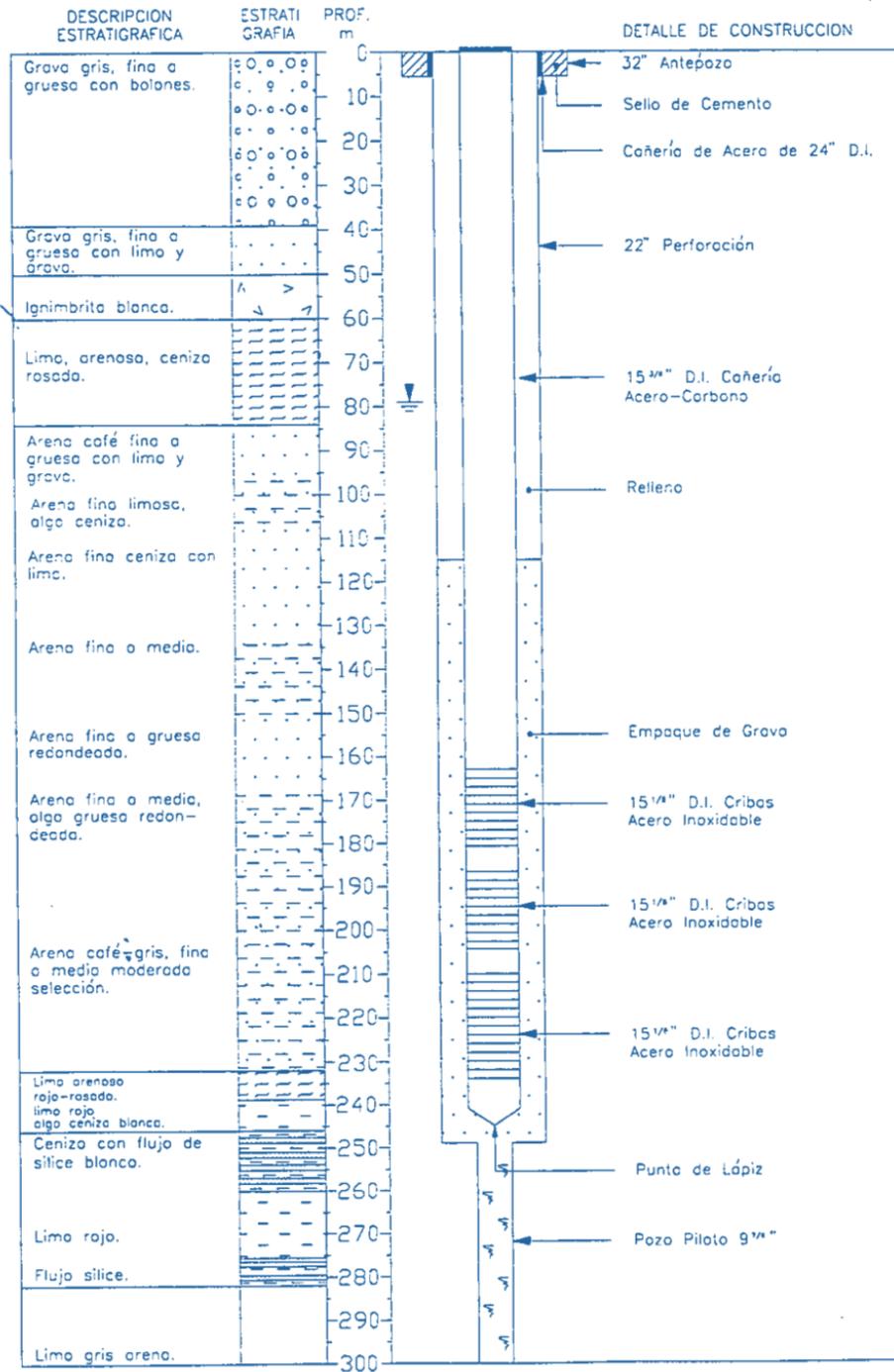


Figura A-1. Sondaje MPW-2. Fuente: Minera Escondida Ltda. (1996).

# DETALLE DE GEOLOGIA Y CONSTRUCCION DE POZO MPW-5

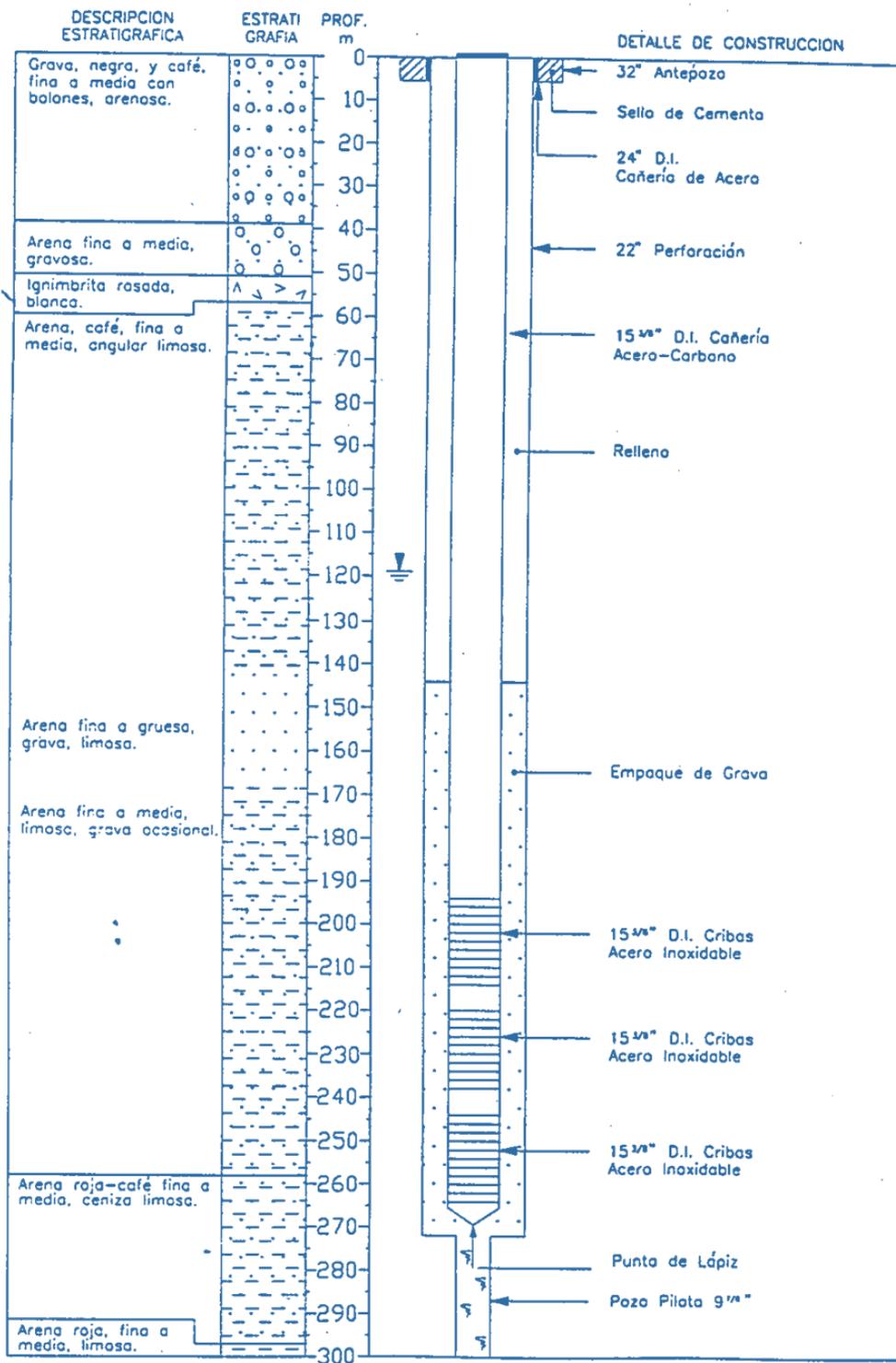


Figura A-2. Sondaje MPW-5. Fuente: Minera Escondida Ltda. (1996).

# DETALLE DE GEOLOGIA Y CONSTRUCCION DE POZ MPW-8

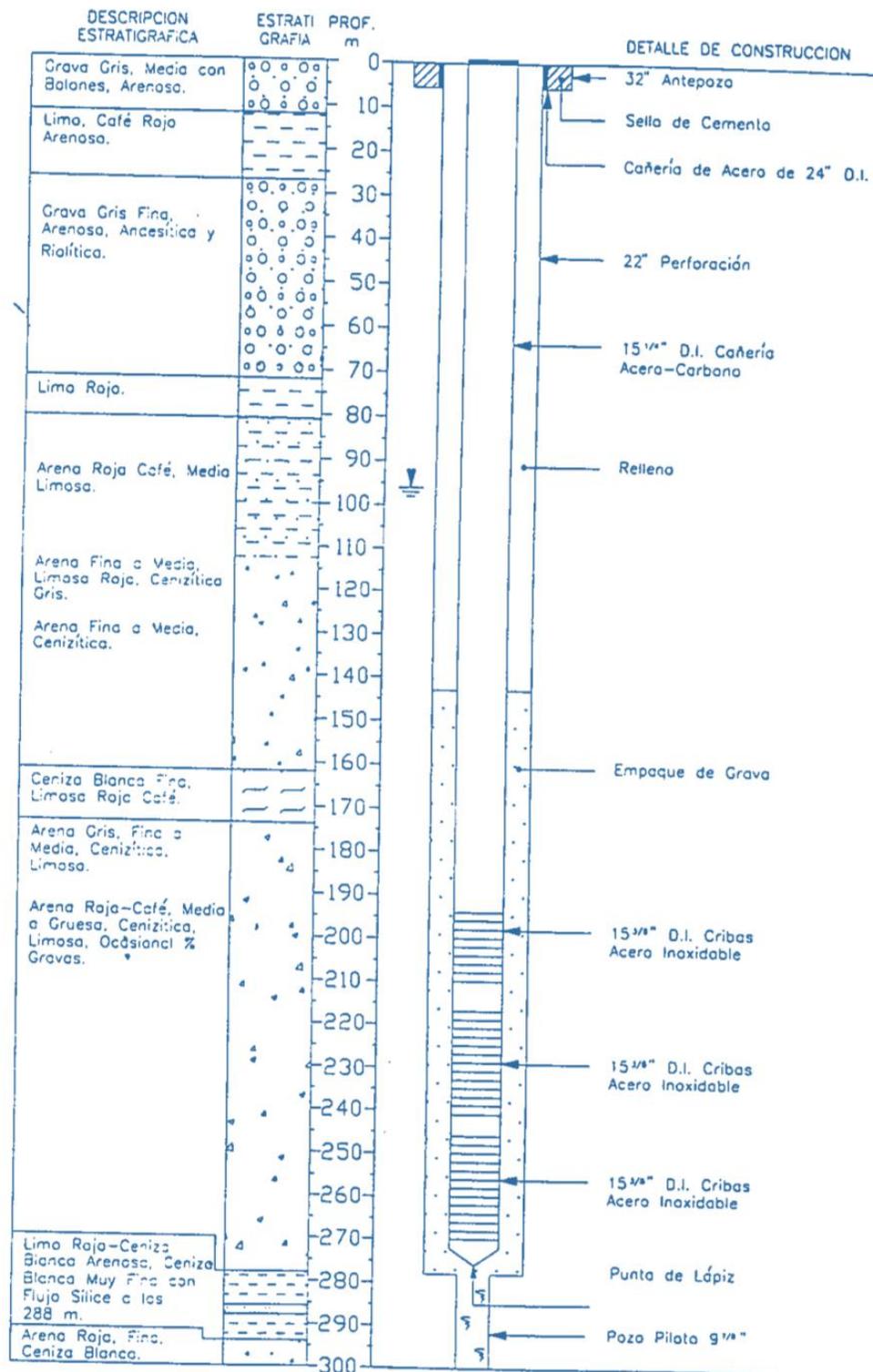


Figura A- 3. Sondaje MPW-2. Fuente: Minera Escondida Ltda. (1996).

# DETALLE DE GEOLOGIA Y CONSTRUCCION DE POZO MPW-10

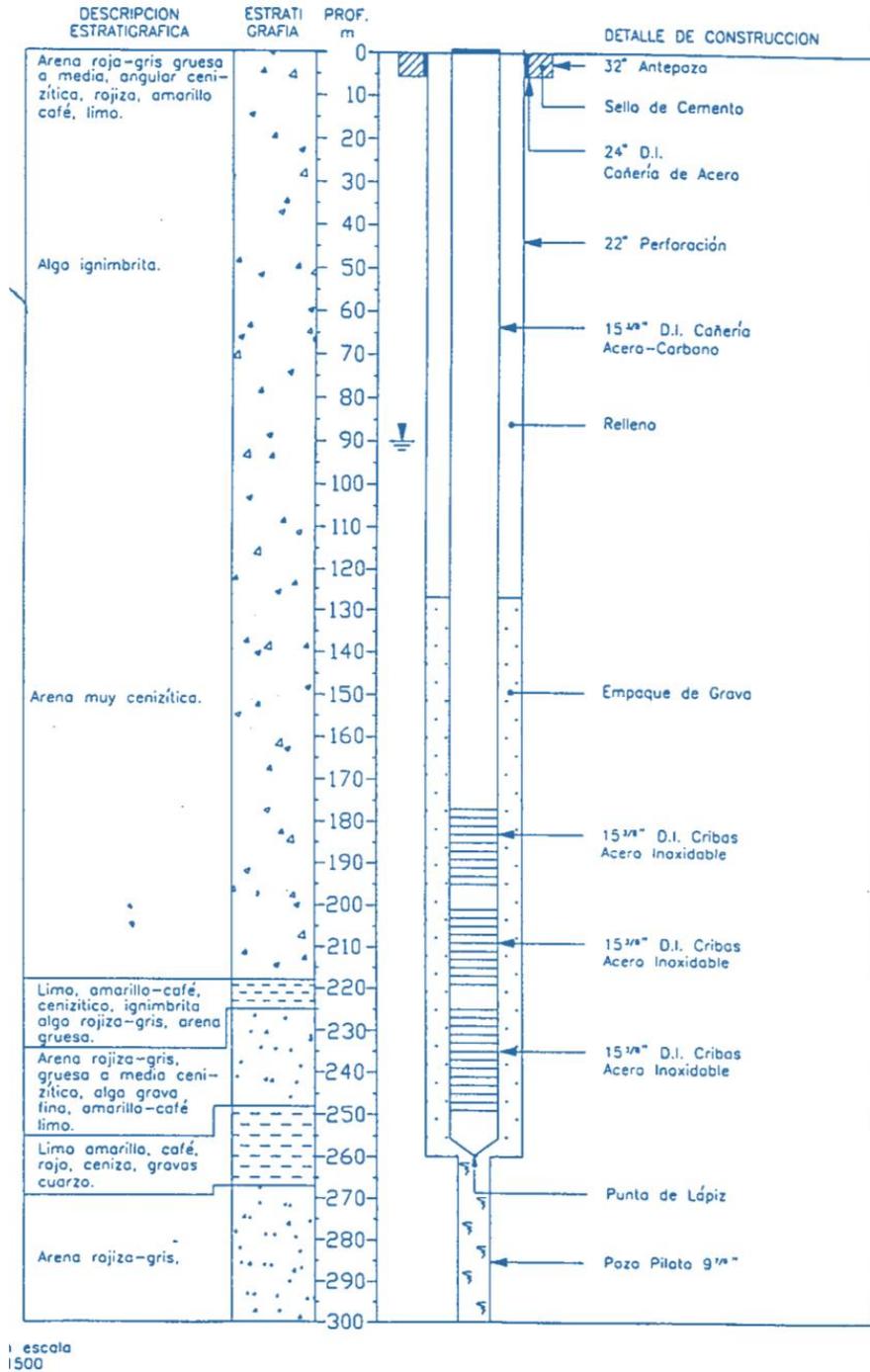


Figura A-4. Sondaje MPW-10 Fuente: Minera Escondida Ltda. (1996).

# DETALLE DE GEOLOGIA Y CONSTRUCCION DE POZO MPW-11

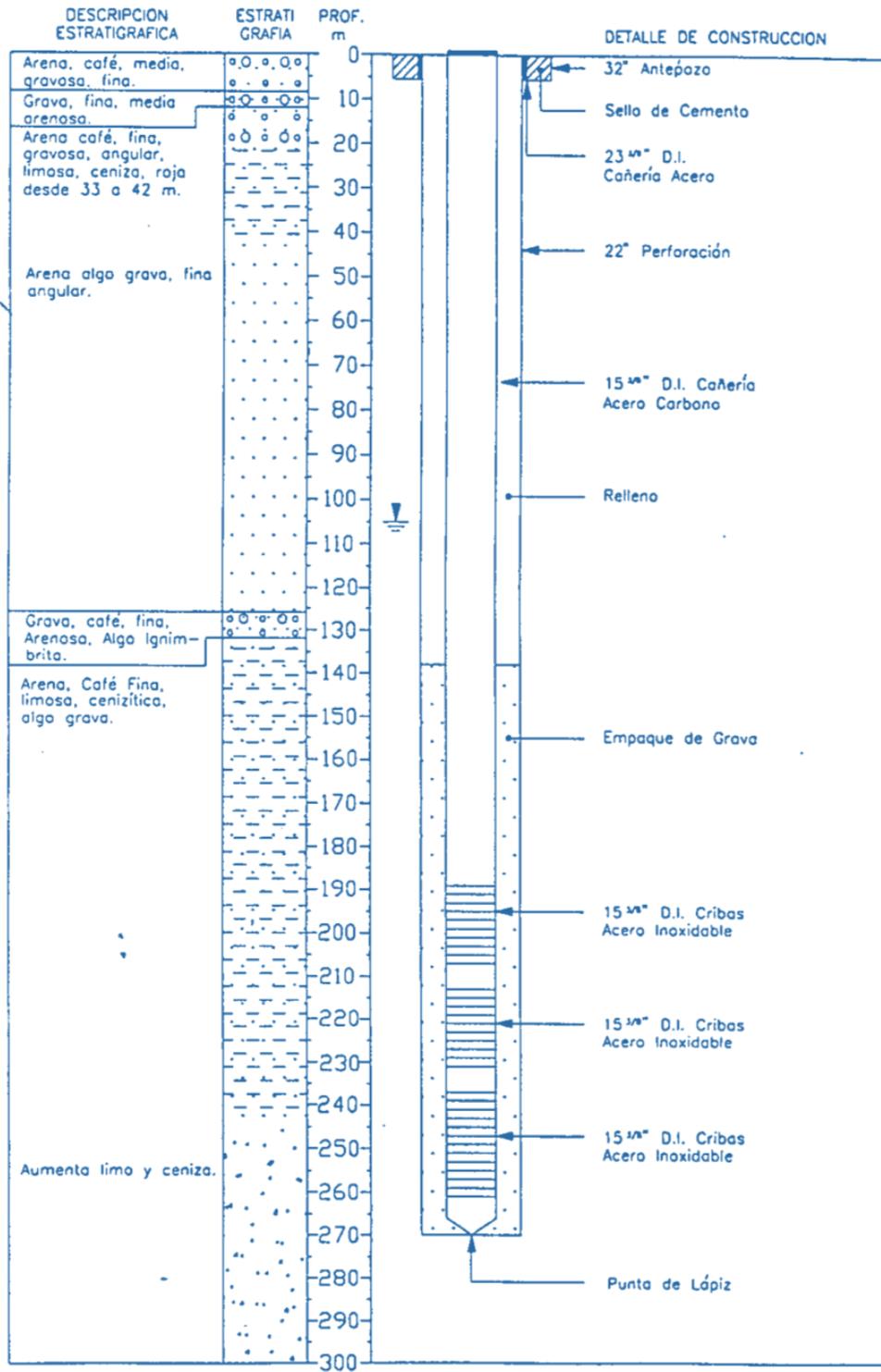


Figura A-5. Sondaje MPW-11. Fuente: Minera Escondida Ltda. (1996).

# DETALLE DE GEOLOGIA Y CONSTRUCCION DE POZO MPW-12

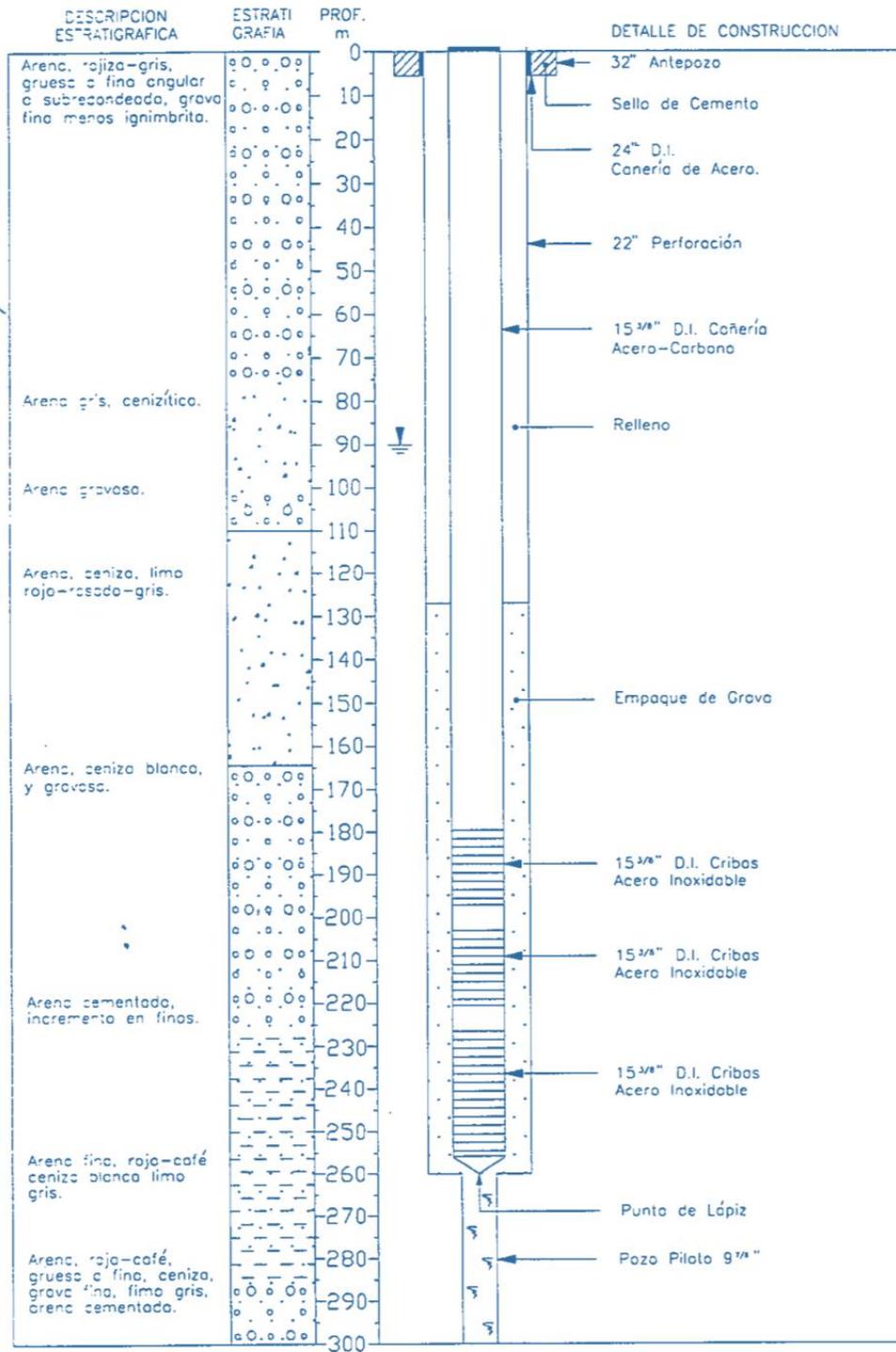


Figura A-6. Sondaje MPW-12. Fuente: Minera Escondida Ltda. (1996).

# DETALLE DE GEOLOGIA Y CONSTRUCCION DE POZO MPW-13

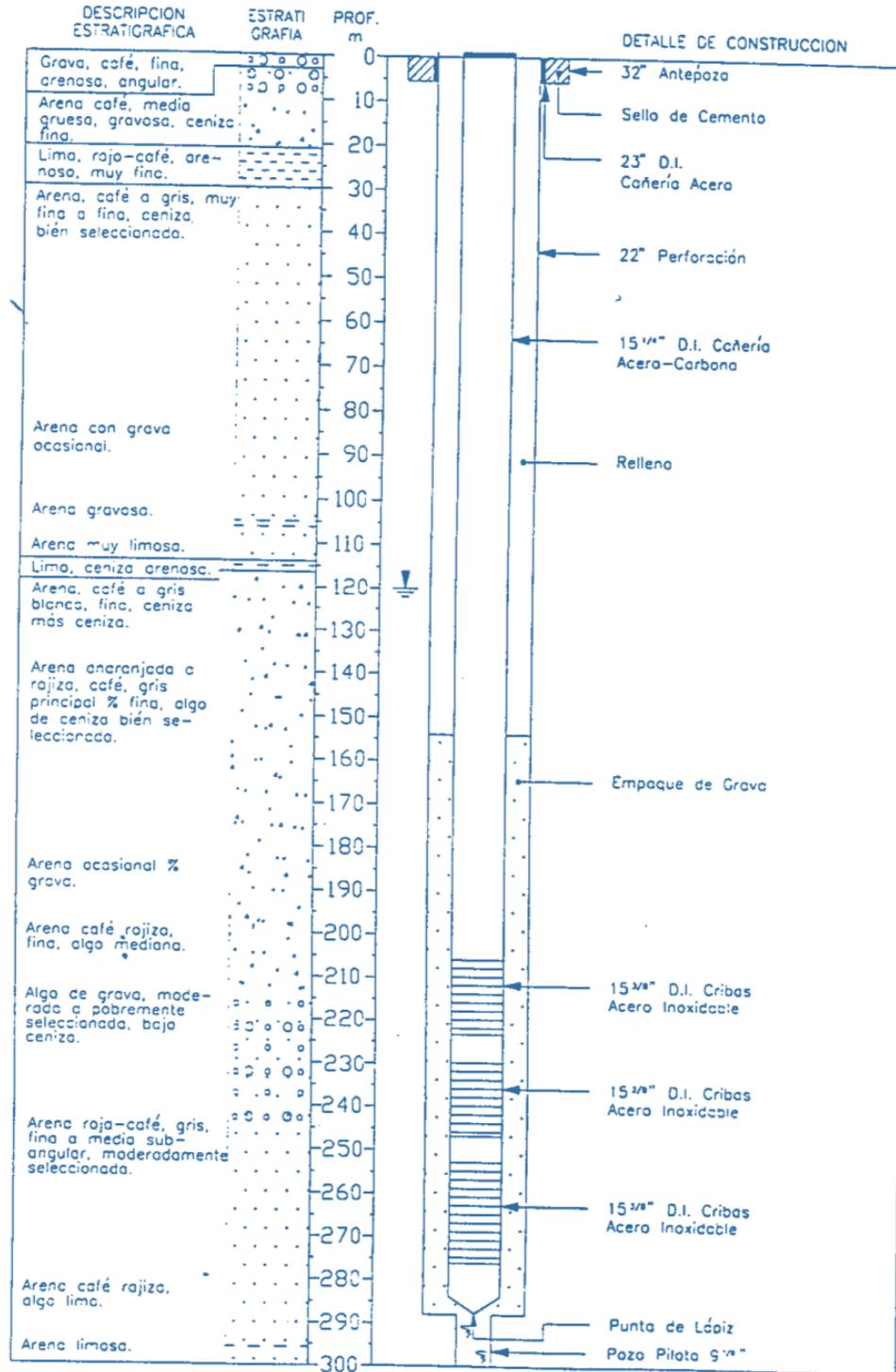


Figura A-7. Sondaje MPW-13. Fuente: Minera Escondida Ltda. (1996).

# DETALLE DE GEOLOGIA Y CONSTRUCCION DE POZO MPW-14

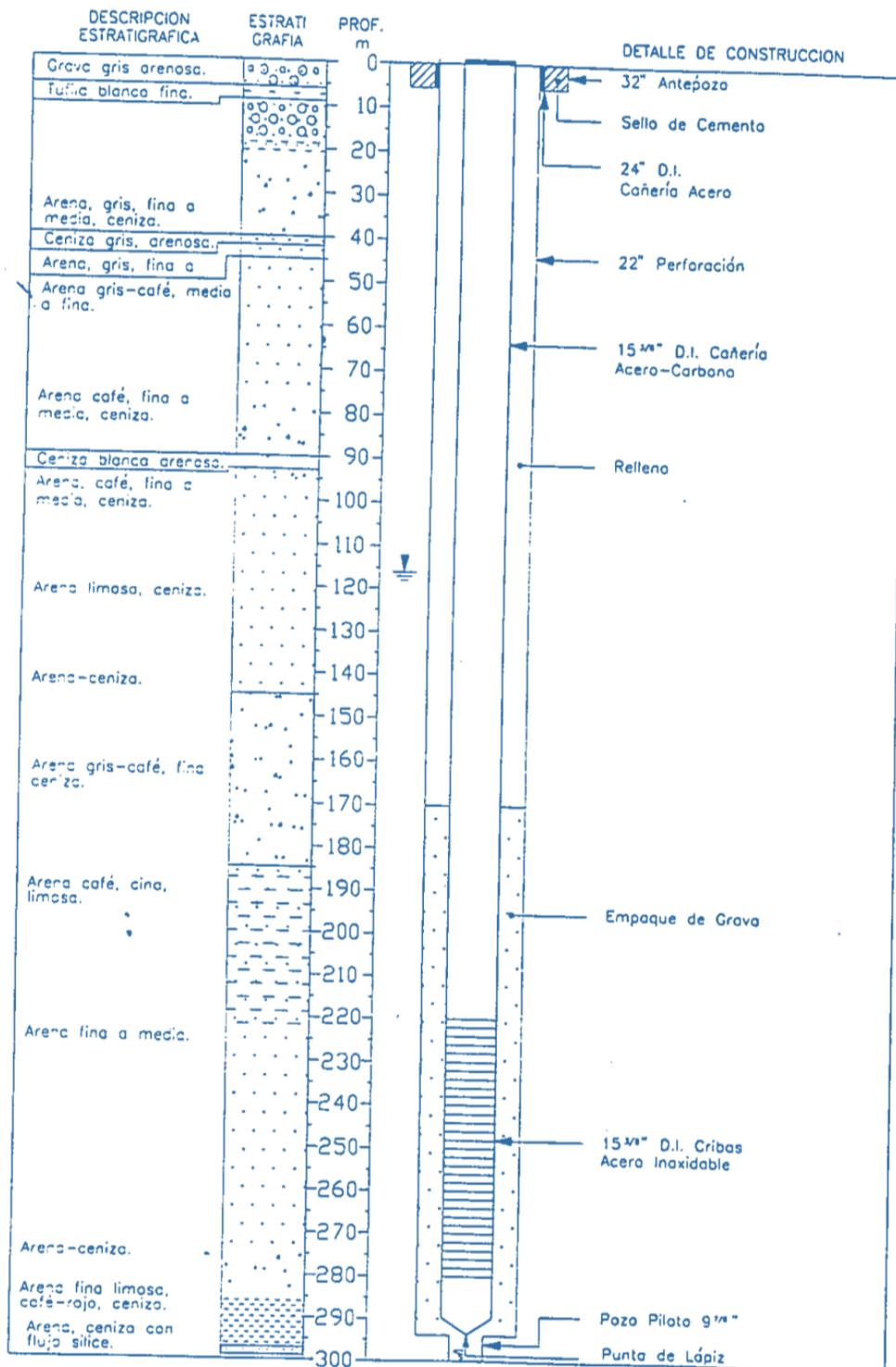


Figura A-8. Sondaje MPW-14. Fuente: Minera Escondida Ltda. (1996).

# DETALLE DE GEOLOGIA Y CONSTRUCCION DE POZO MPW-15

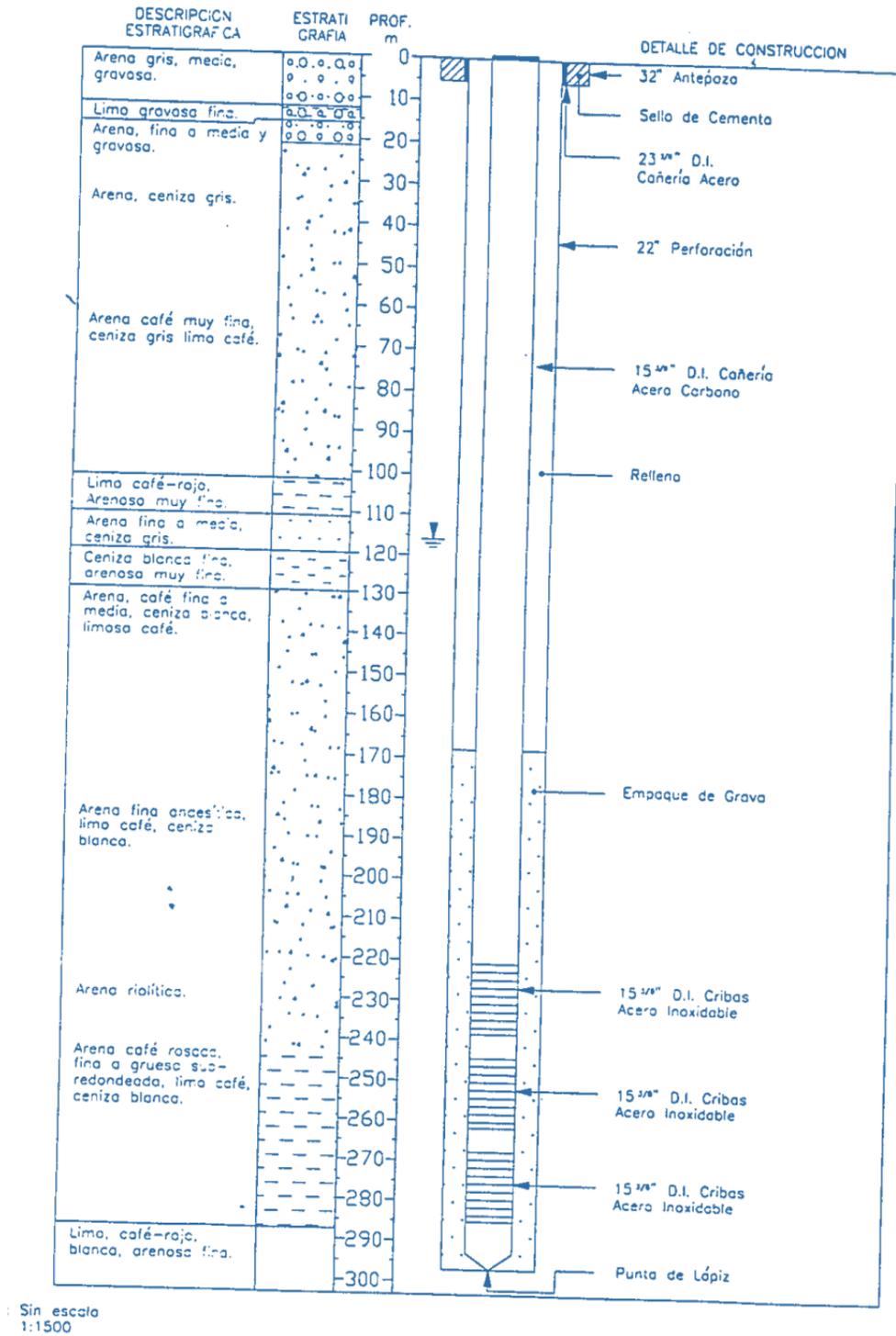


Figura A-9. Sondaje MPW-15. Fuente: Minera Escondida Ltda. (1996).

# DETALLE DE GEOLOGIA Y CONSTRUCCION DE POZO MPW-9

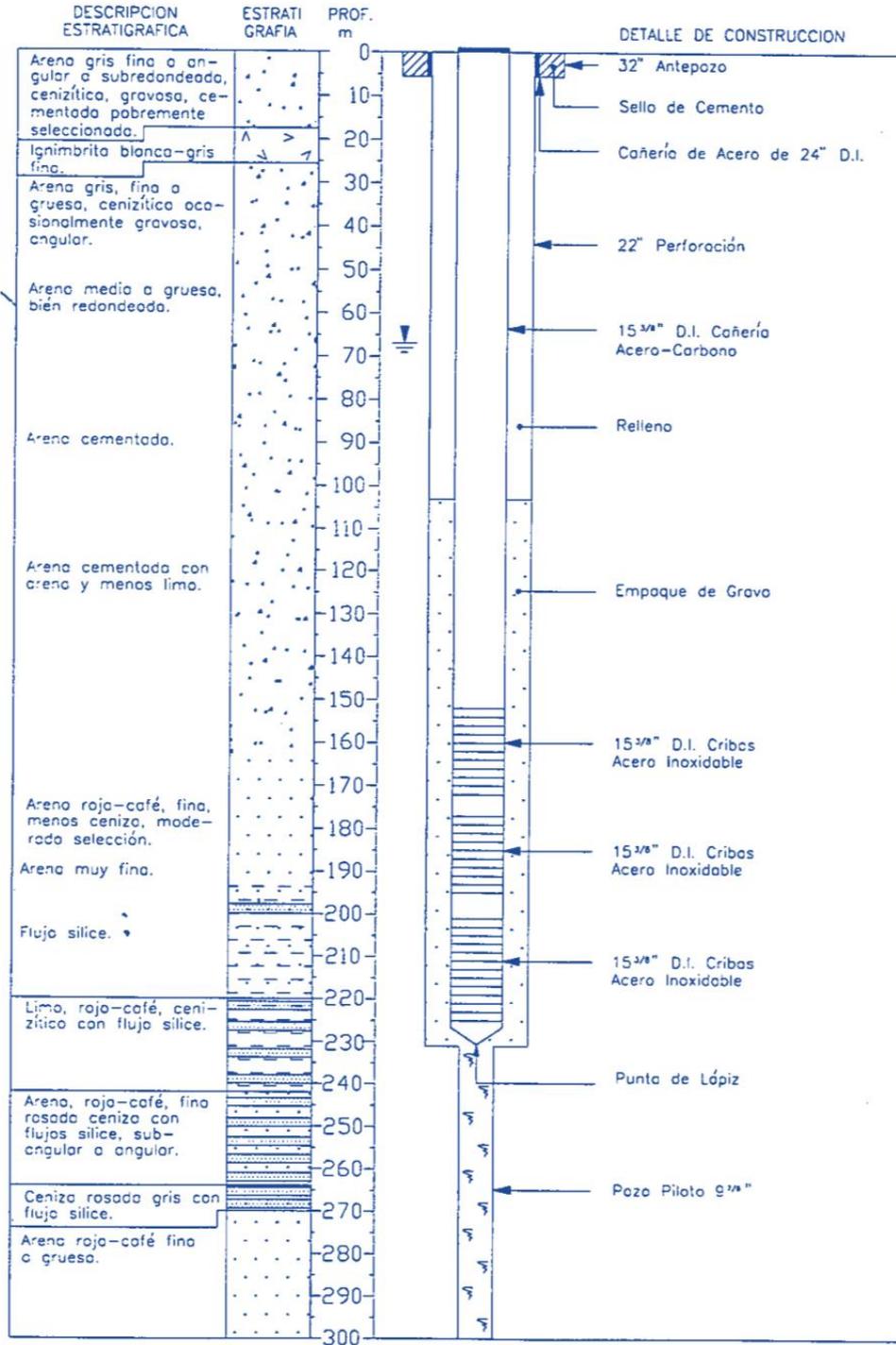


Figura A-10. Sondaje MPW-09. Fuente: Minera Escondida Ltda. (1996).

## DETALLE DE GEOLOGIA Y CONSTRUCCION DE POZO MPW-16

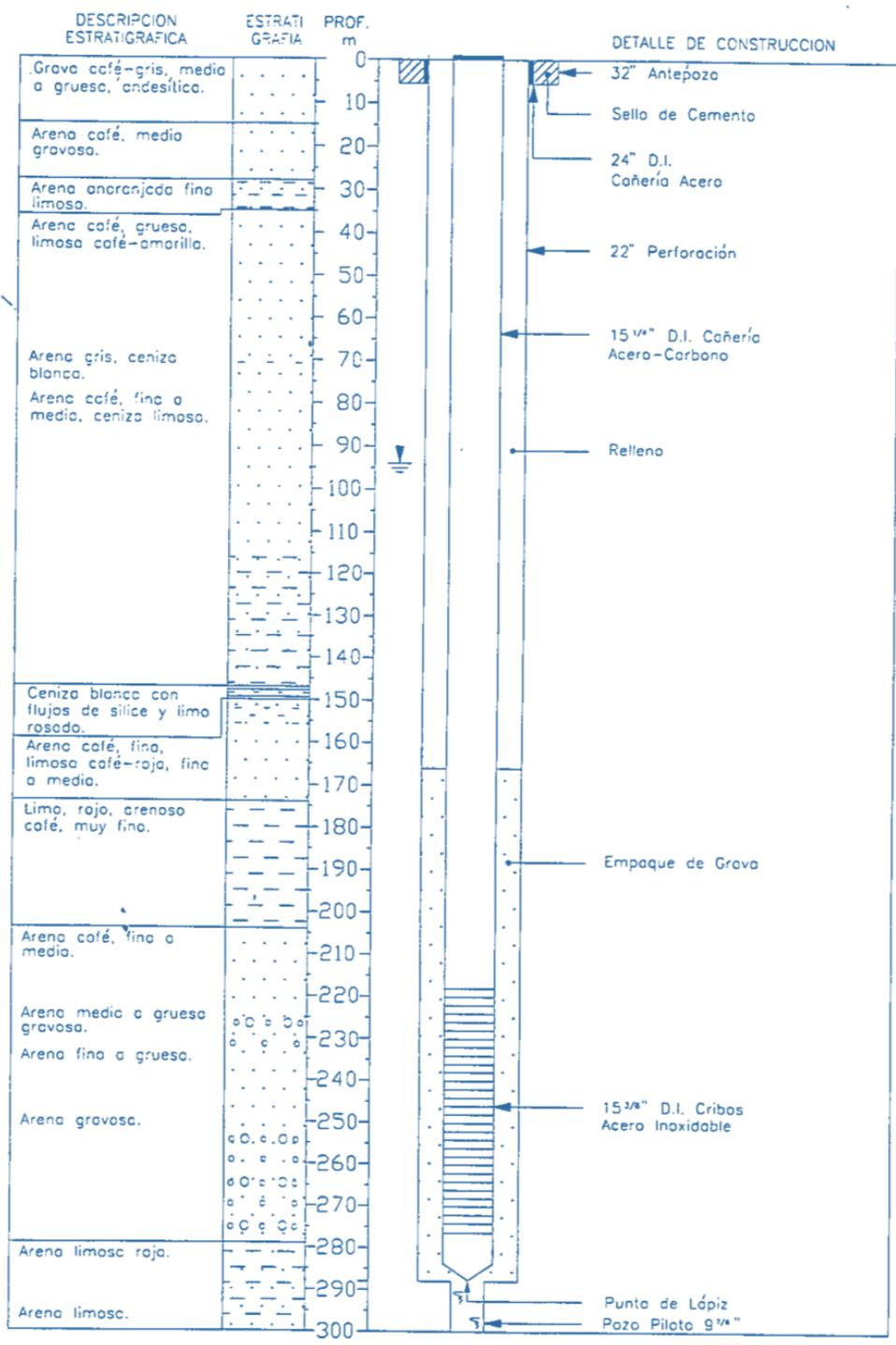


Figura A-11. Sondaje MPW-16. Fuente: Minera Escondida Ltda. (1996).

## DETALLE DE GEOLOGIA Y CONSTRUCCION DE POZO MPW-17

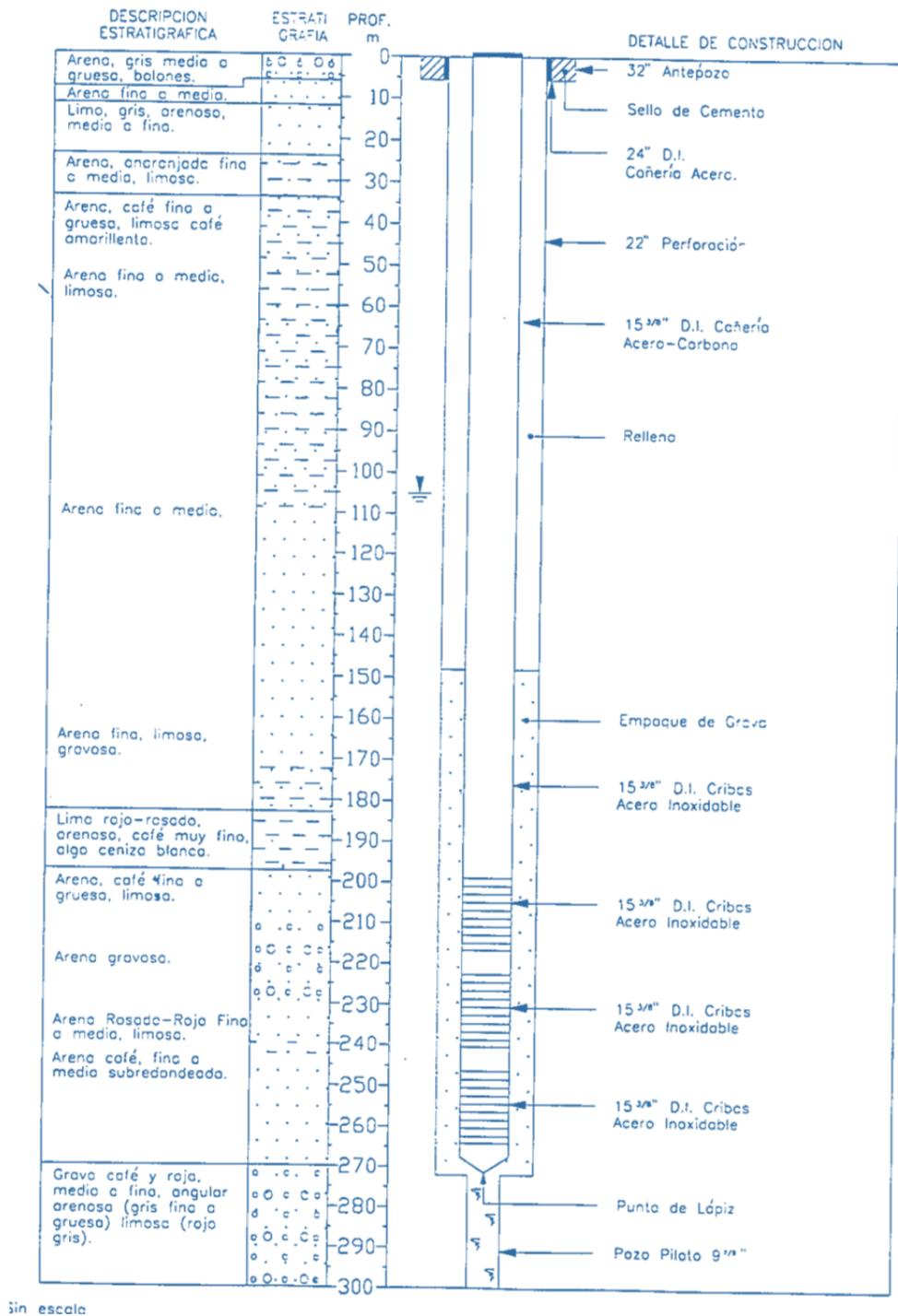


Figura A-12. Sondaje MPW-17. Fuente: Minera Escondida Ltda. (1996).

## DETALLE DE GEOLOGIA Y CONSTRUCCION DE POZO MPW-18

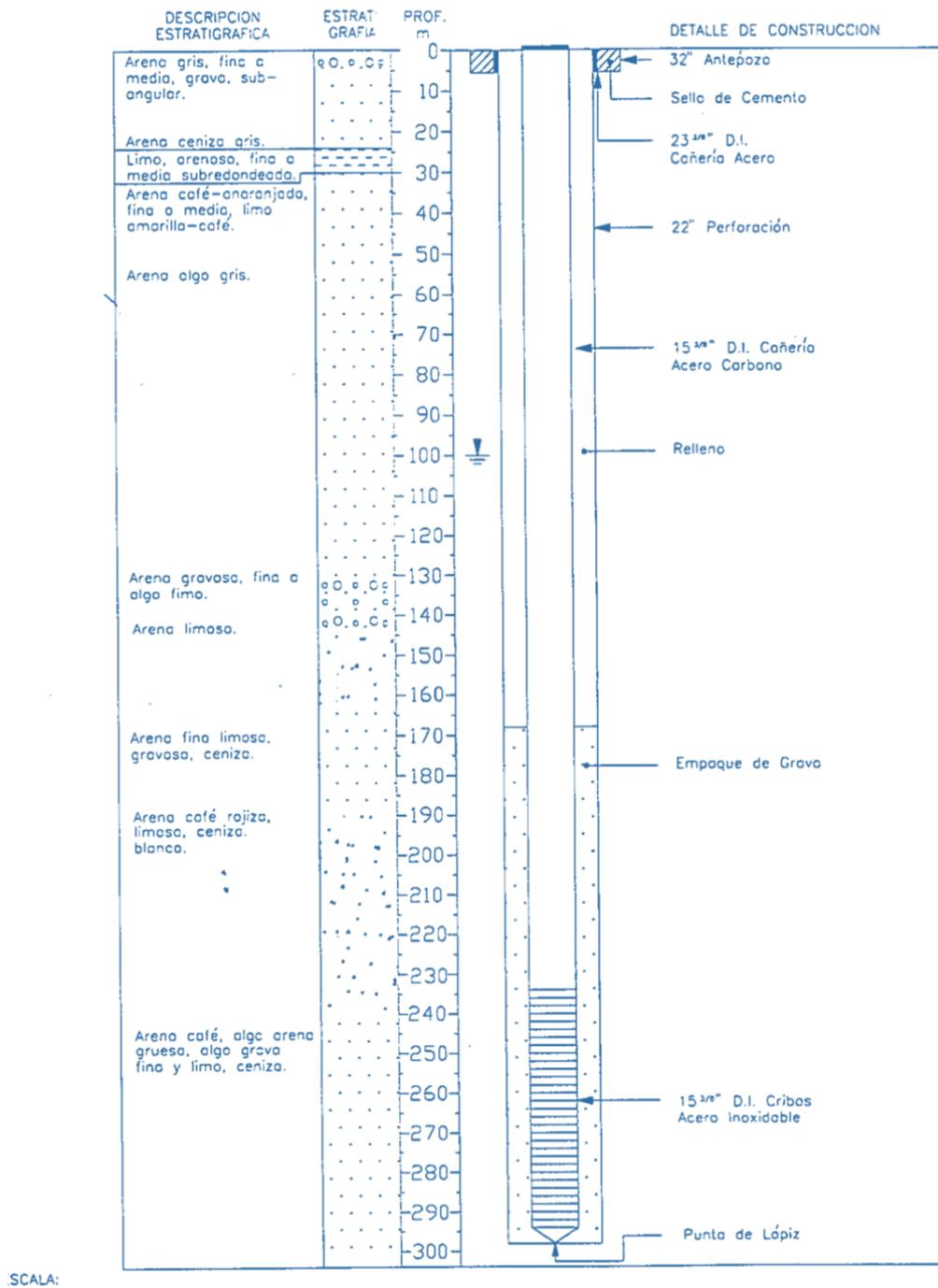


Figura A-13.Sondaje MPW-18. Fuente: Minera Escondida Ltda. (1996).

# DETALLE DE GEOLOGIA Y CONSTRUCCION DE POZO MPW-19

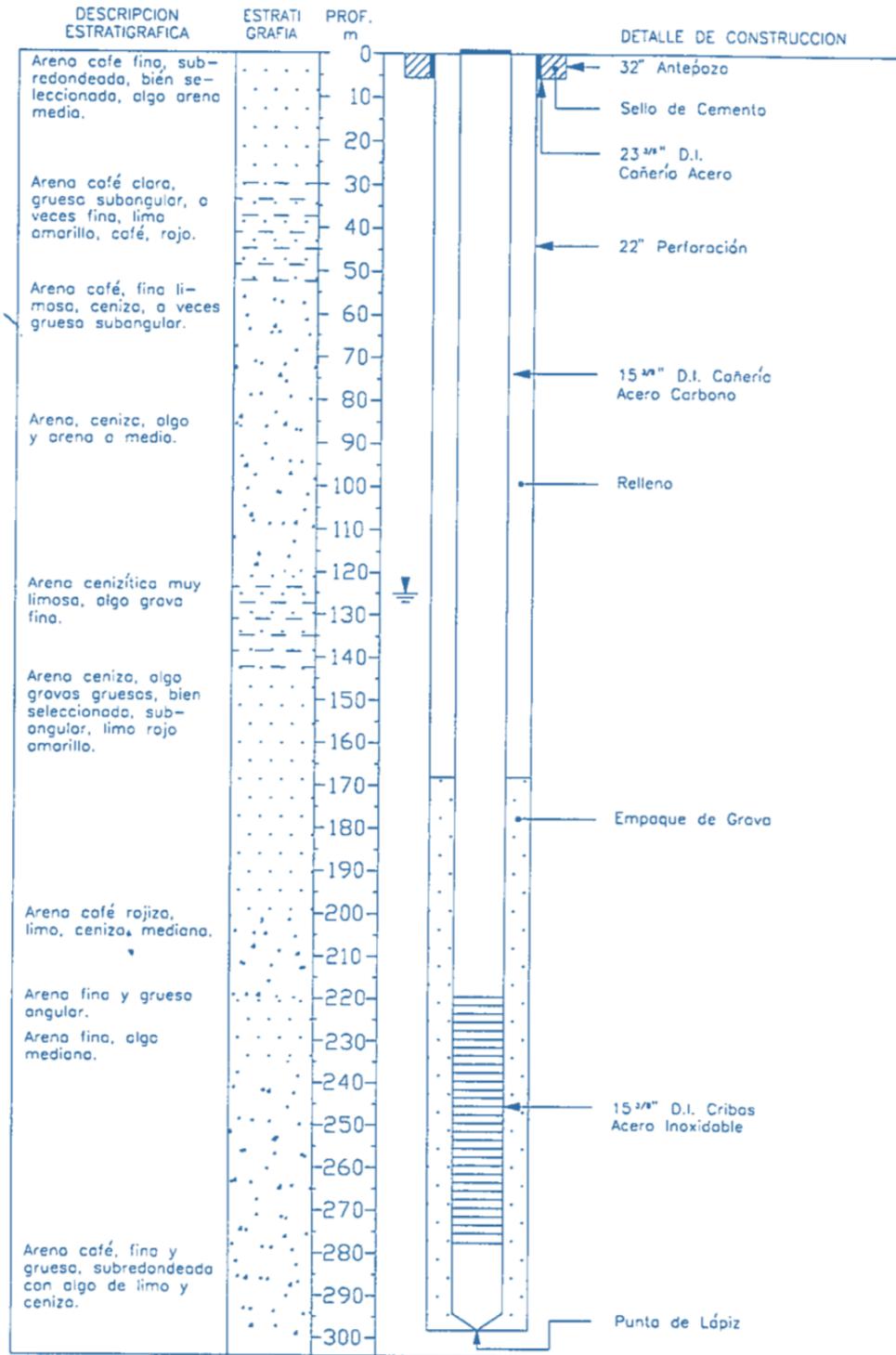


Figura A- 14.Sondaje MPW-19. Fuente: Minera Escondida Ltda. (1996).

# DETALLE DE GEOLOGIA Y CONSTRUCCION DE POZO MPW-20

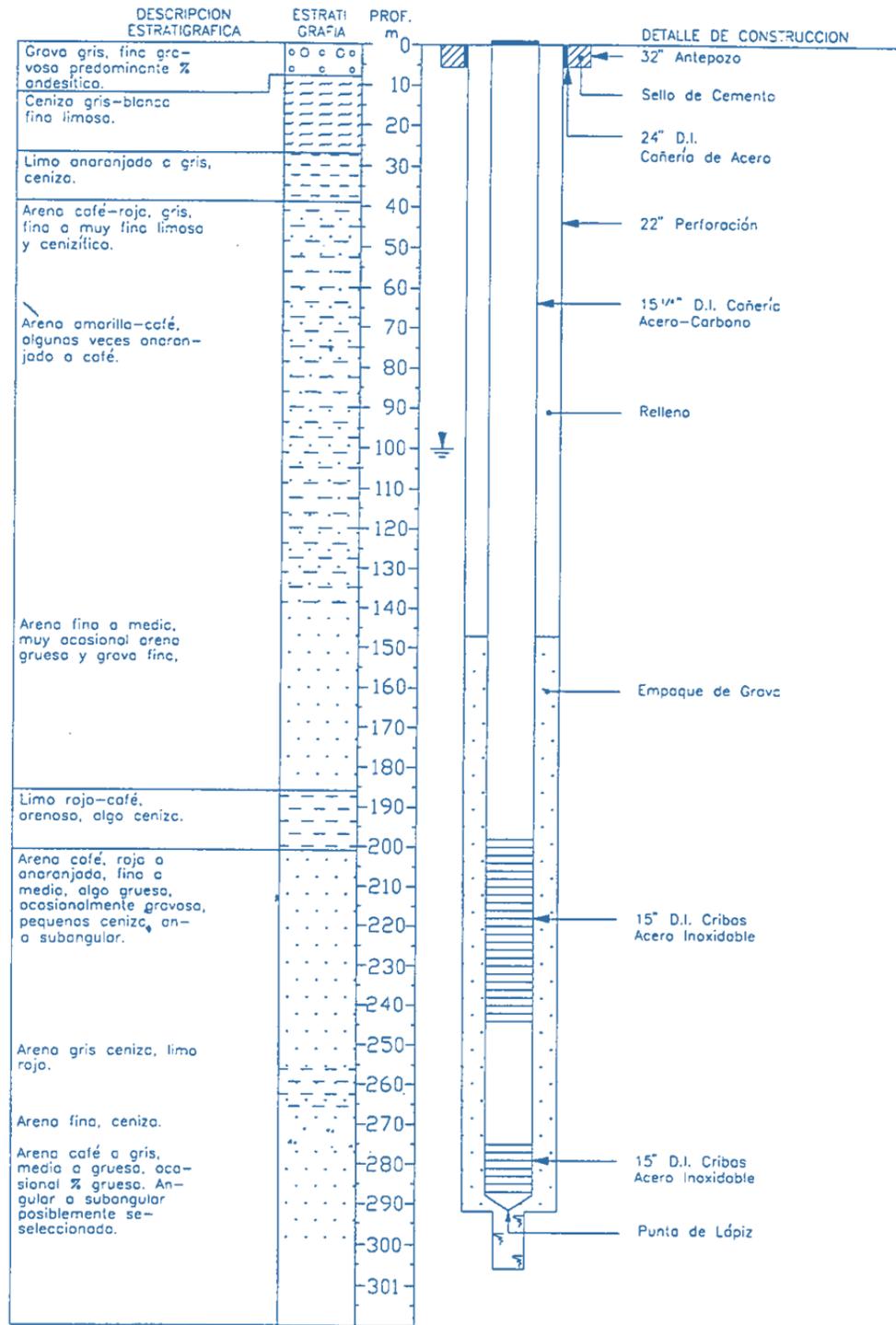


Figura A-15. Sondaje MPW-20. Fuente: Minera Escondida Ltda. (1996).

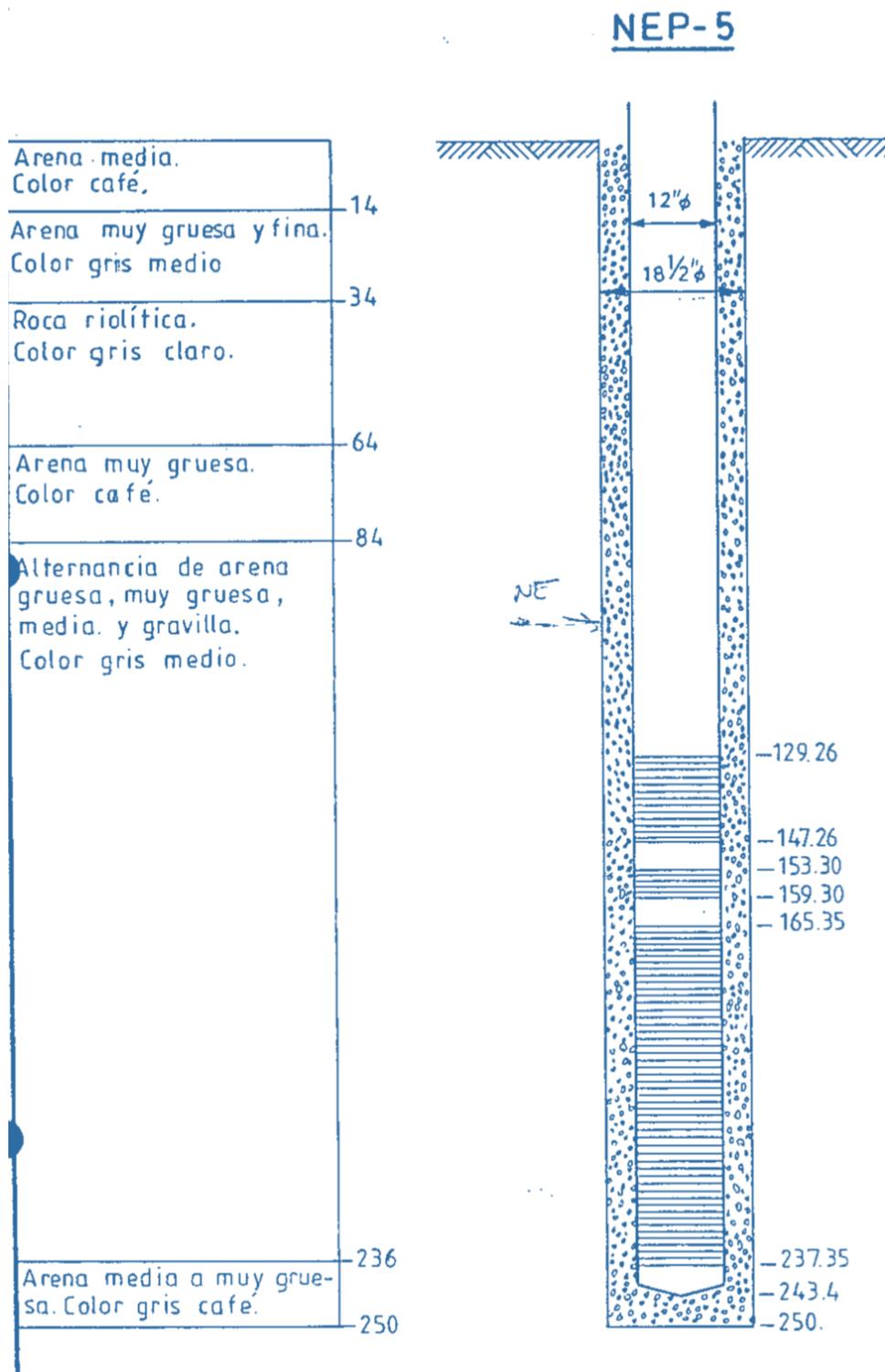


Figura A- 16.Sondaje NEP-5. Fuente: Compañía Minera Zaldívar. (1996).

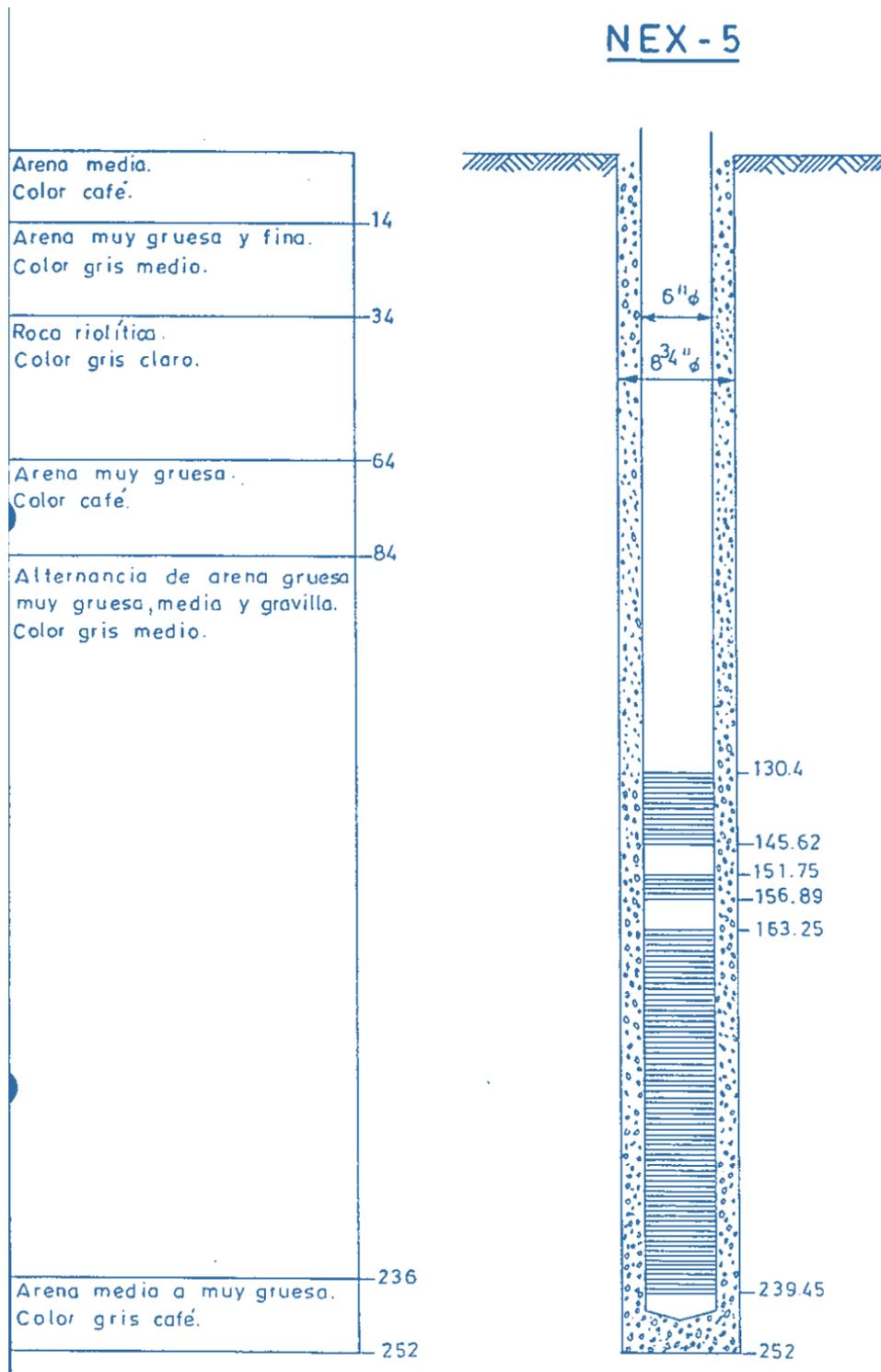


Figura A- 17.Sondaje NEX-5. Fuente: Compañía Minera Zaldívar. (1996).

# Anexo B Perfiles geológicos Monturaqui

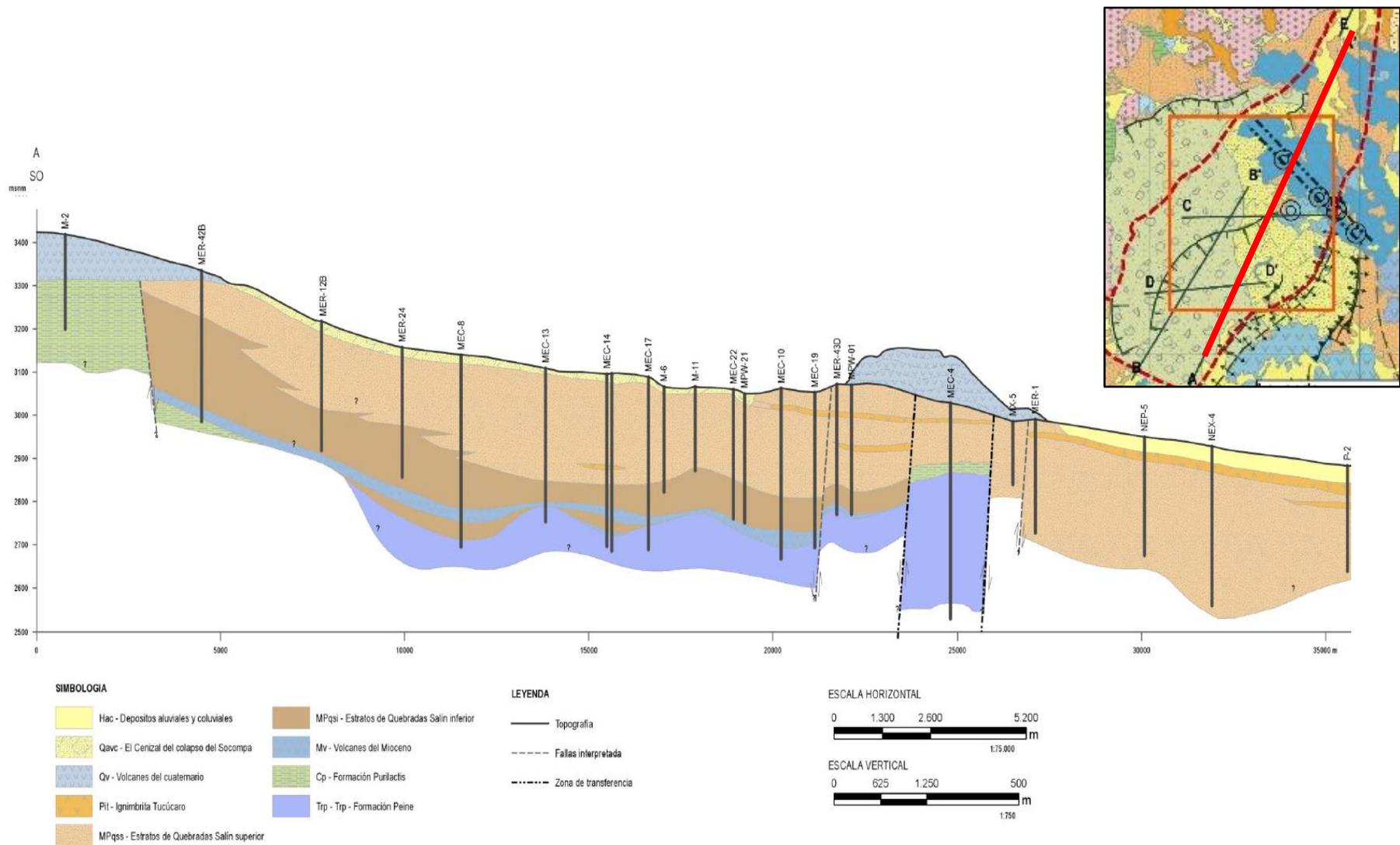


Figura B- 1. Perfil AA'. Fuente: Golder (2017).

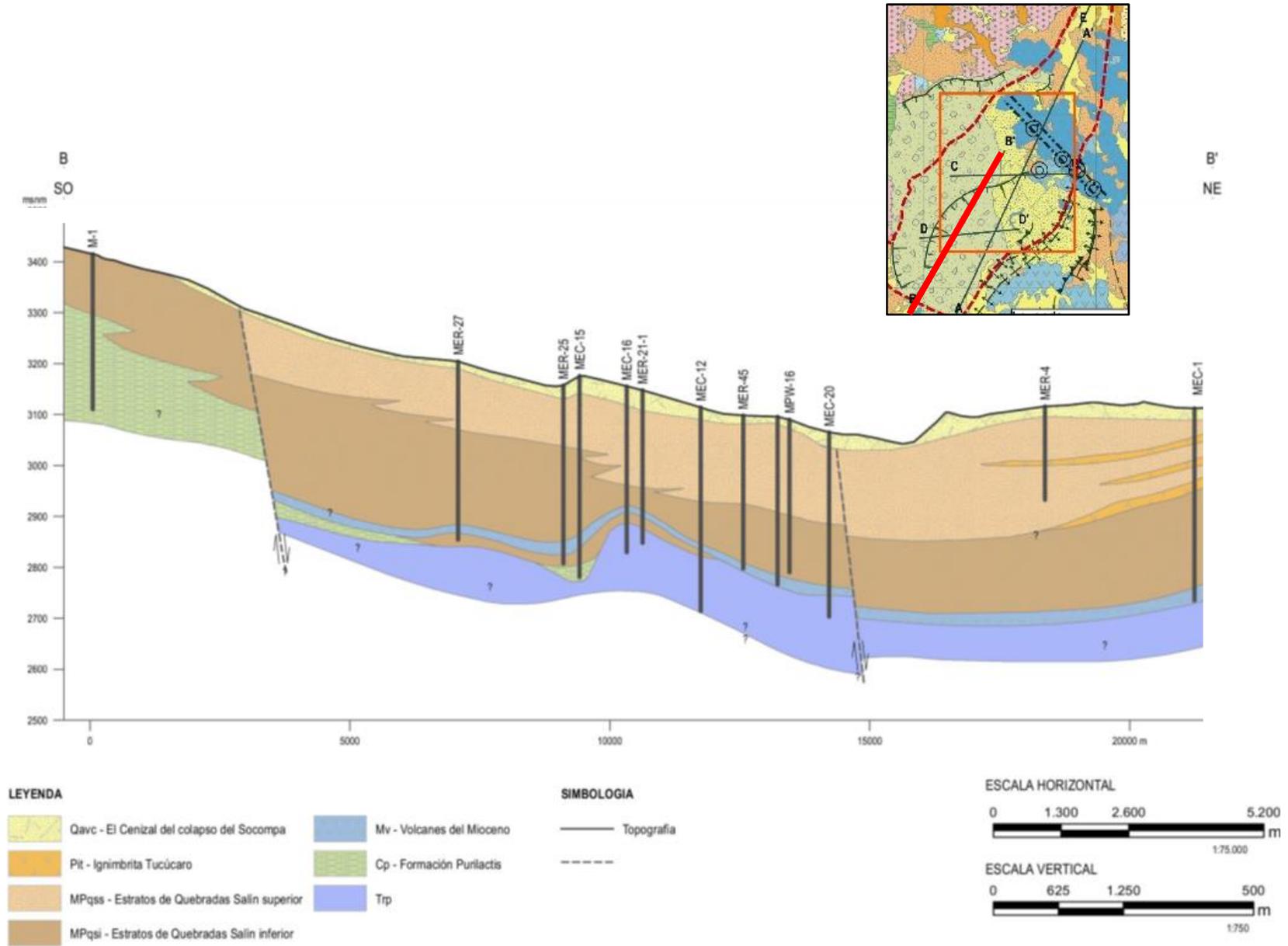


Figura B-2. Perfil BB'. Fuente: Golder (2017).

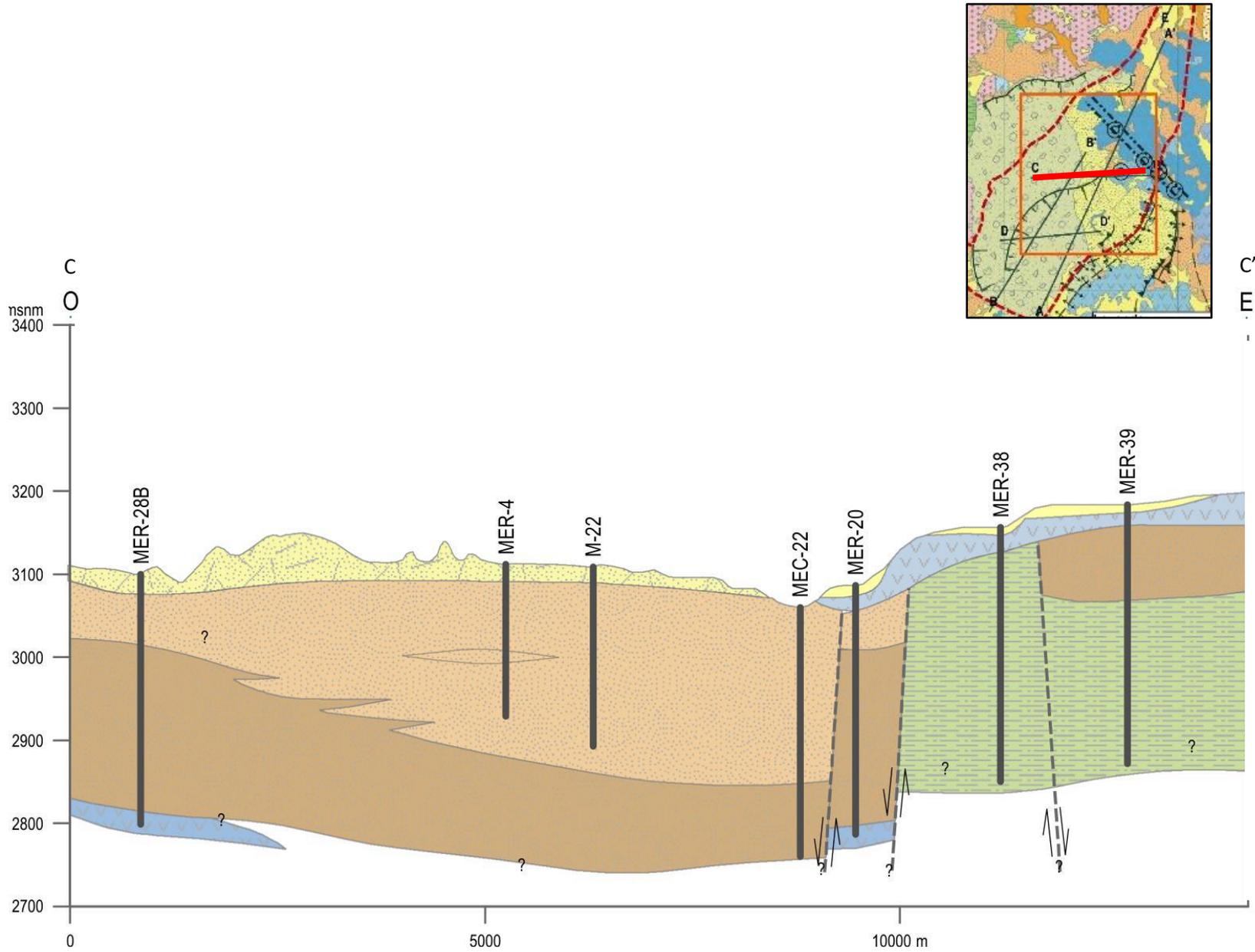


Figura B-3. Perfil CC'. Fuente: Golder (2017).

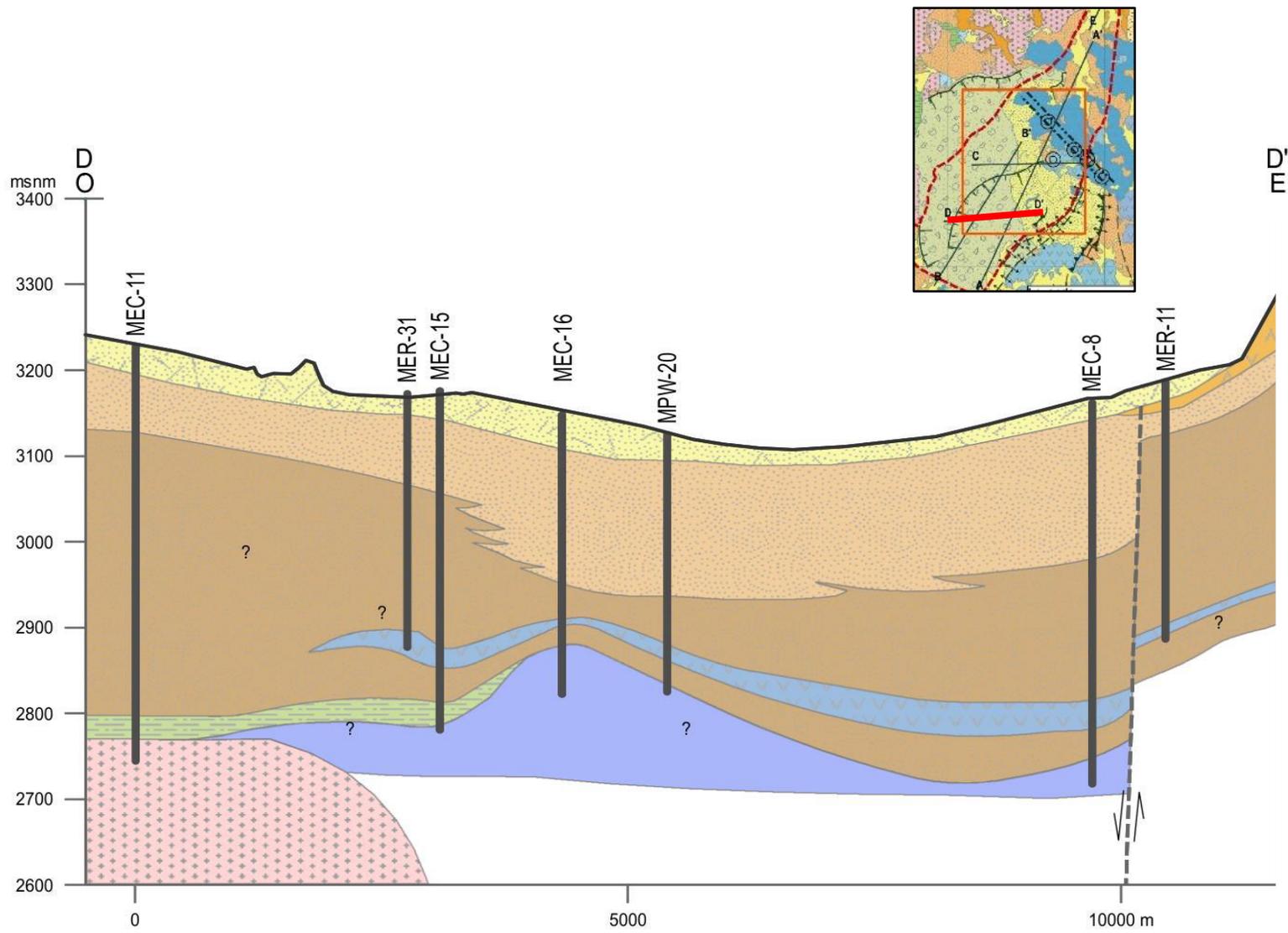


Figura B-4. Perfil DD'. Fuente: Golder (2017).

