



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA

HIDROGEOLOGÍA SUBTERRÁNEA DE LA SUBCUENCA DE RUNGUE, REGIÓN METROPOLITANA

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE GEÓLOGA

MARÍA FERNANDA CERECEDA PUYOL

PROFESOR GUÍA:
CARLOS PARRAGUEZ DECKER

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
FERNANDO KRAINZ RODRÍGUEZ
SOFÍA REBOLLEDO LEMUS

SANTIAGO DE CHILE
2013

**RESUMEN DE LA MEMORIA PARA
OPTAR AL TÍTULO DE:** Geóloga
POR: María Fernanda Cereceda Puyol
FECHA: 25/10/2013
PROFESOR GUÍA: Carlos Parraguez Decker

HIDROGEOLOGÍA SUBTERRÁNEA DE LA SUBCUENCA DE RUNGUE, REGIÓN METROPOLITANA

El presente documento corresponde a la caracterización hidrogeológica ejecutada en la subcuenca de Rungue emplazada en la hoya del estero Tiltil. Dicho estudio forma parte de la línea base constitutiva de la Evaluación de Impacto Ambiental asociado a un proyecto de disposición de residuos tóxicos y peligrosos, que monitorea la empresa Ciclo S.A.

La subcuenca de Rungue se ubica a 51 km al norte de la ciudad de Santiago y cubre un área de 37,9 km². Presenta un clima semi-árido, con un promedio de precipitación anual de 371,2 mm y una recarga del acuífero que fluctúa entre los 10 y los 17 l/s.

En la zona, se reconocieron 3 unidades hidrogeológicas. La primera de ellas está compuesta de rocas volcánicas y sedimentarias de la Formación Las Chilcas, que se encuentran fracturadas en sus 20 m superiores. Esta unidad corresponde al único acuífero del área y, de acuerdo a los antecedentes de 3 ensayos de bombeo realizados, tiene una permeabilidad muy baja. Las unidades hidrogeológicas 2 y 3 corresponden a depósitos coluviales y aluviales, respectivamente. Éstos son de poco espesor, modesta expresión areal y no se presentan saturados.

En las captaciones presentes en la subcuenca, se realizaron mediciones periódicas de niveles freáticos con lo cual se pudo estructurar un mapa de la superficie equipotencial. Según éste, la dirección de escurrimiento del flujo subterráneo, en la zona del predio, es nor-noreste. Luego, hacia aguas abajo, adopta un sentido nor-noroeste en la zona cercana al embalse Rungue.

Con los gradientes hidráulicos definidos y la transmisividad determinada se calculó una velocidad de escurrimiento de 13,46 m/año. Asumiendo dicha velocidad media, el tiempo requerido para que el agua subterránea se desplace desde el predio hasta el área del tranque Rungue sería de unos 300 años aproximadamente.

Considerando que el coeficiente de almacenamiento se ubica en un rango entre 1 y 3% se obtienen valores para el volumen de agua subterránea embalsada entre 3.300.000 y 9.900.000 m³. Éstas, expresadas como caudal continuo para 50 años, corresponden a 2 y 6 l/s, respectivamente.

Por último, se realizaron 4 campañas de muestreo químico con los cuales se concluye que las aguas subterráneas son de tipo cálcicas bicarbonatadas con leve incremento del anión sulfato en sectores que presentan cierto grado de alteración. Si los resultados se comparan con las normas chilenas de Riego y de Agua Potable, se puede asegurar que éstas no cumplen con dichas normativas.

Conforme a lo señalado, se puede aseverar que, desde la perspectiva hidrogeológica, el área es apropiada para construir un vertedero de residuos tóxicos y peligrosos.

AGRADECIMIENTOS

Numerosas fueron las personas que aportaron de alguna forma u otra en esta memoria. Espero no dejar a nadie fuera.

Para comenzar quisiera agradecerle a mi familia por su constante apoyo a lo largo de toda la carrera, en especial a Paula, Jose y Chino, quienes ayudaron en la presentación de este trabajo.

También me gustaría agradecerles a los miembros de mi comisión. A mi profesor guía Carlos Parraguez por su gran disposición a enseñarme y ayudarme en todo lo relacionado a esta memoria y a la vida en general. A los integrantes Sofía Rebolledo y Fernando Krainz por su rápida y completa corrección y por su disposición a acompañarme a terreno como a responder mis dudas.

Agradezco a todos los integrantes de CPH; María Rosa, Mariño, Gonza, Isa, Sofía y Renzo, por su gran ayuda y paciencia en los últimos meses de trabajo.

Además quisiera incluir a Pablo y a don Manuel por su ayuda en el traslado y en los trabajos llevados a cabo en terreno. Sin ellos me hubiese sido imposible tener el registro de datos que se presenta.

Agradezco a todos mis amigos y amigas quienes protagonizan un rol importantísimo en mi vida. A mis amigas de la vida Isi, Feña, Maida y Cami, y a todos mis compañeros de geología en especial a Rayen, Moyra, Bucchi, Daniel, Nicos, Vichos, Turco y Perreo.

Por último, a quien conocí el mismo semestre que a la geología, a mi querido Marcos. Gracias por todo tu apoyo incondicional, por cuidarme y hacerme feliz.

TABLA DE CONTENIDO

1. Introducción	- 1 -
1.1 Formulación del estudio propuesto	- 1 -
1.2 Objetivos	- 2 -
1.2.1 Objetivo General.....	- 2 -
1.2.2 Objetivos Específicos	- 2 -
1.3 Metodología de trabajo	- 2 -
2. Antecedentes Generales	- 5 -
2.1 Ubicación y Accesos.....	- 5 -
2.2 Relieve	- 6 -
2.3 Clima y Vegetación	- 8 -
2.4 Usos de suelo sector Llanos de Rungue.....	- 8 -
2.5 Antecedentes de trabajos anteriores.....	- 9 -
3. Marco Geológico	- 11 -
3.1 Rocas Estratificadas	- 11 -
3.2 Depósitos no consolidados.....	- 14 -
3.3 Rocas Intrusivas.....	- 15 -
3.4 Estructuras	- 15 -
3.5 Alteración.....	- 18 -
4. Hidrología	- 19 -
4.1 Red hidrográfica	- 19 -
4.2 Subcuenca de estudio.....	- 20 -
4.3 Antecedentes meteorológicos	- 21 -
4.3.1 Precipitaciones anuales.....	- 21 -
4.3.2 Precipitaciones mensuales	- 21 -
4.3.3 Precipitaciones máximas en 24 horas	- 21 -

4.3.4	Temperatura media anual	- 22 -
4.3.5	Evaporación	- 22 -
4.3.6	Evapotranspiración	- 23 -
4.4	Recarga	- 23 -
4.4.1	Curva Número	- 23 -
4.4.2	Balance medio anual.....	- 25 -
5.	Hidrogeología	- 27 -
5.1	Unidades hidrogeológicas.....	- 27 -
5.1.1	Roca basal (Unidad Hidrogeológica 1)	- 27 -
5.1.2	Depósitos coluviales (Unidad Hidrogeológica 2).....	- 28 -
5.1.3	Depósitos aluviales (Unidad Hidrogeológica 3).....	- 28 -
5.2	Constantes hidráulicas	- 30 -
5.2.1	Prueba de bombeo en la Noria.....	- 31 -
5.2.2	Prueba de bombeo en el Pique minero	- 33 -
5.2.3	Prueba de bombeo Sondaje S4	- 35 -
5.3	Superficie equipotencial, direcciones y velocidad del flujo subterráneo.....	- 36 -
5.4	Volumen embalsado	- 42 -
5.5	Caracterización química	- 43 -
5.5.1	Calidad análisis químico.....	- 44 -
5.5.2	Clasificación química del agua.....	- 44 -
5.5.3	Calidad química de las aguas subterráneas.....	- 52 -
5.5.4	Evolución química de las aguas subterráneas en el sector del pasivo minero.....	- 55 -
6.	Conclusiones y Recomendaciones	- 57 -
7.	Referencias	- 60 -

8. Anexos	- 63 -
Anexo A: Descripción captaciones de agua	- 63 -
Anexo B: Perfiles Geofísicos	- 69 -
Anexo C: Registro manual pruebas de bombeo	- 83 -
Anexo D: Datos meteorológicos	- 99 -
Anexo E: Perfiles hidrogeológicos	- 105 -
Anexo F: Resultados análisis químico y comparación con normativas chilenas	- 109 -

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.- Ubicación zona de estudio	- 5 -
Figura 2.- Mapa geológico simplificado	- 7 -
Figura 3.- Fotografías zona de estudio	- 8 -
Figura 4.- Uso de suelo sector Llanos de Rungue.....	- 9 -
Figura 5.- Mapa geológico de la zona de estudio.....	- 12 -
Figura 6.- Fallas reconocidas por Wall et. al. (1999).....	- 16 -
Figura 7.- Disposición estructural de la Formación Las Chilcas y perfil esquemático del entorno geológico de la zona de estudio.....	- 17 -
Figura 8.- Subcuenca de estudio.....	- 20 -
Figura 9.- Bandas hipsométricas y valores de CN.	- 24 -
Figura 10.- Mapa hidrogeológico.....	- 29 -
Figura 11.- Registro fotográfico de la prueba de bombeo en la Noria.....	- 31 -
Figura 12.- Curva Nivel dinámico Noria v/s tiempo.....	- 32 -
Figura 13.- Registro fotográfico de la prueba de bombeo en el Pique minero.....	- 33 -
Figura 14.- Curva Nivel dinámico Pique v/s tiempo para distintos caudales.....	- 34 -
Figura 15.- Registro fotográfico de la prueba de bombeo en el Sondaje S4	- 35 -
Figura 16.- Variaciones de nivel freático en la Noria, el Pozo de los animales y en S1 y S2....	- 38 -
Figura 17.- Variaciones de nivel freático en el Pique minero y en los sondajes S3, S4 y S5. ...	- 39 -
Figura 18.- Mapa local de la superficie equipotencial.....	- 40 -
Figura 19.- Mapa inferido de la superficie equipotencial y posibles direcciones de flujo.....	- 41 -
Figura 20.- Diagrama de Piper Pozo de los animales (P1).....	- 46 -
Figura 21.- Diagrama de Piper Noria (P2).	- 47 -
Figura 22.- Diagrama de Piper Pique minero (P3).....	- 48 -
Figura 23.- Diagrama de Piper Sondajes S1, S2, S3 y S4	- 49 -
Figura 24.- Mapa de distribución de diagramas de Stiff.....	- 51 -
Figura 25.- Mapa ubicación piezómetros analizados en la cuarta campaña de muestreo.	- 56 -
Figura 26.- Ubicación pozos recomendados.....	- 59 -

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.- Registro precipitaciones mensuales promedio.....	- 21 -
Tabla 2.- Precipitación máxima diaria.....	- 22 -
Tabla 3.- Parámetros estadísticos de evaporación de estanque.	- 22 -
Tabla 4.- Precipitaciones máximas, escorrentía y recarga.....	- 25 -
Tabla 5.- Características de las obras donde se hicieron los ensayos de bombeo.	- 30 -
Tabla 6.- Caudales y transmisividades determinadas en el Pique minero.....	- 35 -
Tabla 7.- Niveles estáticos medidos	- 36 -
Tabla 8.- Volumen embalsado de agua subterránea	- 43 -
Tabla 9.- Resultados del balance aniónico-catiónico.	- 44 -
Tabla 10.- Composición química de cada captación.	- 45 -
Tabla 11.- Parámetros que exceden la Norma Chilena de Agua Potable NCh 409/1	- 53 -
Tabla 12.- Parámetros que exceden la Norma Chilena de Riego NCh 1.333/78	- 55 -

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1 Formulación del estudio propuesto

En nuestro país, cuando se desea implementar un cierto tipo de proyecto o actividad, éste debe someterse a una evaluación de impacto ambiental (E.I.A.). Esta evaluación es un instrumento que permite prevenir el deterioro del medio ambiente introduciendo la dimensión ambiental en el diseño, la ejecución y el abandono de dichos proyectos.

Previo a la ejecución de éstos, se debe describir el área de influencia de manera detallada (línea base). Esto permite superponer la situación actual de dicha zona con los aspectos ambientales generados por las distintas actividades del proyecto, con lo cual se puede concluir si habrán impactos o no, y de haberlos, poder determinar su magnitud.

El presente estudio hidrogeológico forma parte de la línea base de una evaluación de impacto ambiental asociado a un proyecto a cargo de la empresa Ciclo S.A. Dicho proyecto trata de la construcción de una planta de Revalorización, Tratamientos y Disposición Final de Residuos Industriales peligrosos y no peligrosos el cual tendrá una vida útil de 30 años. Para que dicha construcción pueda albergar variados volúmenes y tipos de residuos que produce la industria, se contará con al menos 5 unidades de procesos: planta general; planta de tratamiento de RISES; planta de RILES; planta de revalorización, reciclaje y reutilización; y depósito de seguridad.

El lugar escogido para la implementación de esta planta se determinó de acuerdo al Plan Regulador Metropolitano de Santiago (P.R.M.S.), artículo 8.3.2.2. de Interés Silvoagropecuario Mixto I.S.A.M.-6, el cual define 2 sectores donde se permite la instalación de este tipo de industrias: el sector de El Noviciado en la comuna de Lampa y el sector de Los Ciruelos en la comuna de Tilttil.

El trabajo se sitúa sobre el área autorizada de la comuna de Tilttil, en un predio de superficie aproximada 40 hectáreas, que se ubica a unos 5 kilómetros al sur del poblado de Rungue, en el kilómetro 51 de la Ruta-5 Norte, en la hoya hidrográfica del estero Tilttil, en la subcuenca de Rungue.

Para este estudio se realizaron diversas actividades. Algunas de ellas fueron llevadas a cabo por empresas externas, como por ejemplo; levantamiento topográfico, levantamiento de perfiles geofísicos, perforación de sondajes, pruebas de bombeo, entre otras. Éstas aportaron información fundamental para definir el modelo hidrogeológico conceptual de la subcuenca de estudio.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo General

Este trabajo tiene por objetivo general definir un modelo hidrogeológico conceptual para la subcuenca de Rungue, comuna de Tiltil, Provincia de Chacabuco, Región Metropolitana.

1.2.2 Objetivos Específicos

- a) caracterización geológica de la zona de estudio;
- b) definición de la cuenca de estudio;
- c) evaluación de la recarga del acuífero;
- d) caracterización de unidades hidrogeológicas;
- e) elaboración de un mapa hidrogeológico;
- f) determinación de parámetros hidráulicos para el acuífero;
- g) confección de mapas de isopiezas e isopropiedades del nivel estático;
- h) determinación de direcciones y velocidad de flujo subterráneo;
- i) cálculo de volumen de agua subterránea embalsada;
- j) caracterización hidrogeoquímica de las aguas.

1.3 Metodología de trabajo

- Referente al Objetivo Específico a:

Se recopiló la información preexistente de las unidades geológicas y las estructuras presentes en la zona de estudio. Luego, con la ayuda del programa MapInfo Professional 10.0, se estructuró el mapa geológico de la zona con el fin de que este sea un aporte para la definición del modelo hidrogeológico conceptual.

- Referente al Objetivo Específico b:

Se recopilaron los datos topográficos existentes en la zona de estudio. Con ellos se confeccionó un mapa en el programa MapInfo Professional 10.0 donde se ilustran las curvas de nivel. Luego, se definió la línea divisora de aguas siguiendo las altas cumbres y teniendo en cuenta que ésta debía cortar ortogonalmente a dichas curvas.

- Referente al Objetivo Específico c:

Se recopiló información de las estaciones pluviométricas presentes y/o cercanas a la zona de estudio, en las que se indica el régimen de precipitaciones, la evaporación y la temperatura con su año de registro. Luego, se procedió a calcular la recarga, o sea, la proporción de las precipitaciones que pasan a formar parte del acuífero, con el método que mejor se ajustaba a las características de dicha zona.

- Referente al Objetivo Específico d:

Se caracterizaron todas las unidades hidrogeológicas identificadas en cuanto a su ubicación, composición y comportamiento hidráulico. Para ello se realizaron las siguientes actividades:

- levantamiento de sondeos geoelectricos verticales del tipo transiente electromagnética (TEM y NanoTEM) con el fin de determinar las características de sub-superficie de la zona de estudio;
- descripción del material obtenido de la perforación de los sondajes y elaboración de columnas estratigráficas;
- recopilación de información geológica como se indica en la Metodología del Objetivo Específico a.

- Referente al Objetivo Específico e:

Se estructuró un mapa hidrogeológico en el programa MapInfo Professional 10.0. En él se ilustran las unidades hidrogeológicas vistas en planta, la ubicación de las distintas captaciones y de los perfiles geofísicos levantados.

- Referente al Objetivo Específico f:

Se realizaron pruebas de bombeo en tres distintas captaciones. Con los datos aportados en estas pruebas se obtuvieron, mediante el método que mejor se ajustó a cada captación, los valores de los parámetros hidráulicos del acuífero, tales como, transmisividad y almacenamiento.

- Referente al Objetivo Específico g:

A la mayor cantidad de captaciones ubicadas dentro de la subcuenca de estudio se les midió la profundidad del nivel estático periódicamente.

Con los valores más representativos de estas mediciones se confeccionó el mapa de isopiezas e isopropiedades en el programa MapInfo Professional 10.0 mediante la herramienta de interpolación de datos.

- Referente al Objetivo Específico h:

En el mapa de isopiezas, confeccionado tal como se indica en la Metodología del Objetivo Específico g, se trazaron las líneas de dirección de flujo de manera perpendicular a las isopiezas.

La velocidad del flujo subterráneo se calculó mediante la derivación de la Ley de Darcy y la porosidad eficaz. Para ello se utilizaron los datos de transmisividad calculados tal como se indica en la Metodología del Objetivo Específico f; el espesor saturado del acuífero determinado mediante los perfiles geofísicos y la descripción estratigráfica de sondajes; y el gradiente hidráulico más representativo de la zona de estudio.

- Referente al Objetivo Específico i:

Para realizar el cálculo del volumen embalsado se utilizó el espesor saturado promedio de la subcuenca de estudio. Con el trazado de dicha subcuenca realizado en el Objetivo Específico b, se logró estimar el área total de ella. Ésto, sumado a los valores de coeficiente de almacenamiento determinados en el Objetivo Específico f, permitió el cálculo del volumen embalsado.

- Referente al Objetivo Específico j:

Se llevaron a cabo 4 campañas de toma de muestras de agua en distintas captaciones ubicadas dentro de la subcuenca de estudio. Las muestras fueron llevadas al laboratorio del DICTUC, donde se les realizó un análisis químico.

Ya con la información entregada por el laboratorio, se procedió al análisis de datos para establecer la condición química actual de la calidad de las aguas subterráneas y su clasificación de acuerdo a su composición química. Eso se realizó con la ayuda de los diagramas de Piper y Stiff, los cuales fueron construidos con el programa Diagrammes 5.9.

CAPÍTULO 2: ANTECEDENTES GENERALES

2.1 Ubicación y Accesos

El área de estudio se localiza en la Región Metropolitana, Provincia de Chacabuco, comuna de Tiltil, en el sector sur de Rungue, a 4,6 km al sur del pueblo de Rungue y a 51 kilómetros al norte de la ciudad de Santiago (ver Figura 1).

La principal vía de acceso desde Santiago es a través de la carretera principal Ruta 5 Norte hasta el kilómetro 51. Luego, se sigue hacia el poniente a través de caminos secundarios de ripio, en regular estado de conservación.

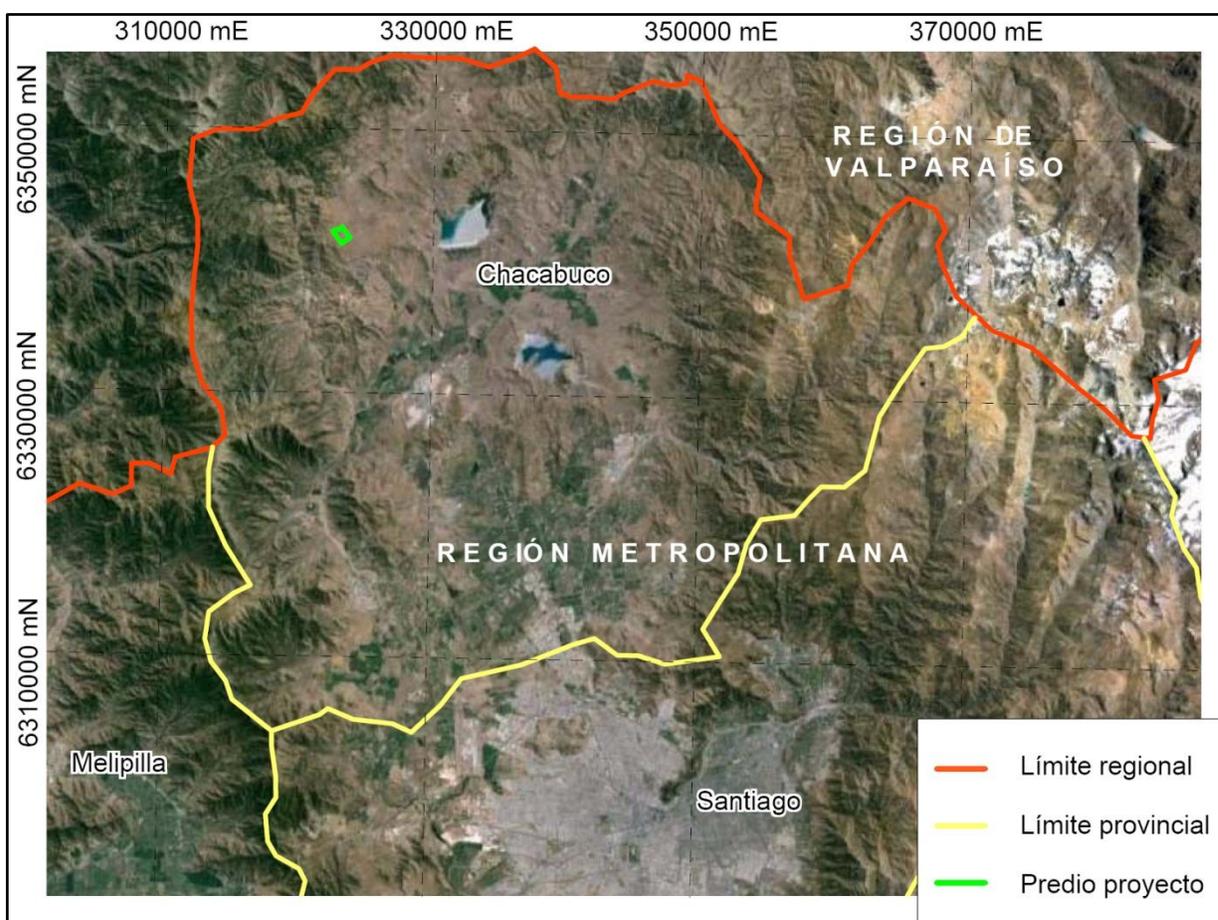


Figura 1.- Ubicación zona de estudio (imagen modificada de Google Earth).
Sistema de coordenadas UTM WGS84, huso 19 sur.

2.2 Relieve

La zona de estudio se emplaza en la macrounidad morfoestructural de Chile Central conocida como la Depresión Intermedia (ver Figura 2). Ésta, en la región de estudio, se encuentra separada por cordones montañosos que unen la Cordillera de la Costa y la Cordillera de los Andes dividiéndola en dos cuencas: Chacabuco al norte y Santiago al sur.

Dicha zona se encuentra adosada a la vertiente oriental de la Cordillera de La Costa, la cual presenta una orientación norte-sur y alturas cercanas a los 2.000 m s.n.m. en el sector nororiente. Ejemplo de ello son los cerros La Campana (1.920 m s.n.m.) y El Roble (2.222 m s.n.m.) (PAC Consultores, sin fecha).

Al oriente de la Cordillera de la Costa, se desarrollan cuencas de menor tamaño, las cuales han sido denominadas valles interiores. En Tiltil, estos valles son generados por fallas de orientación norte-sur, siendo el valle de menor altura el del estero Tiltil. Los fondos de valle van descendiendo en altura en la medida que se acercan a la confluencia de los esteros de Tiltil y Polpaico, los que van desde 800 m s.n.m. en Montenegro, 725 m s.n.m. en Rungue, 575 m s.n.m. en Tiltil y 520 m s.n.m. en Polpaico (PAC Consultores, sin fecha).

El Llano de Rungue presenta un terreno con poca pendiente la cual, durante períodos lluviosos, puede presentar fenómenos de flujos de barro y/o detritos en sectores de mayor pendiente, mientras que episodios de inundación pueden ser comunes en sectores de menor pendiente. La parte media de este llano presenta una altura aproximada de 715 m s.n.m. y se encuentra disectado por una serie de quebradas menores de actividad intermitente, cuyas cabeceras se localizan a una altura promedio de 950 m s.n.m. El desnivel existente entre la parte media y las cabeceras de las quebradas es de aproximadamente 250 m, con una pendiente de 8% en las partes altas, la que disminuye a 1,5% en la parte media (SERNAGEOMIN, 2005).

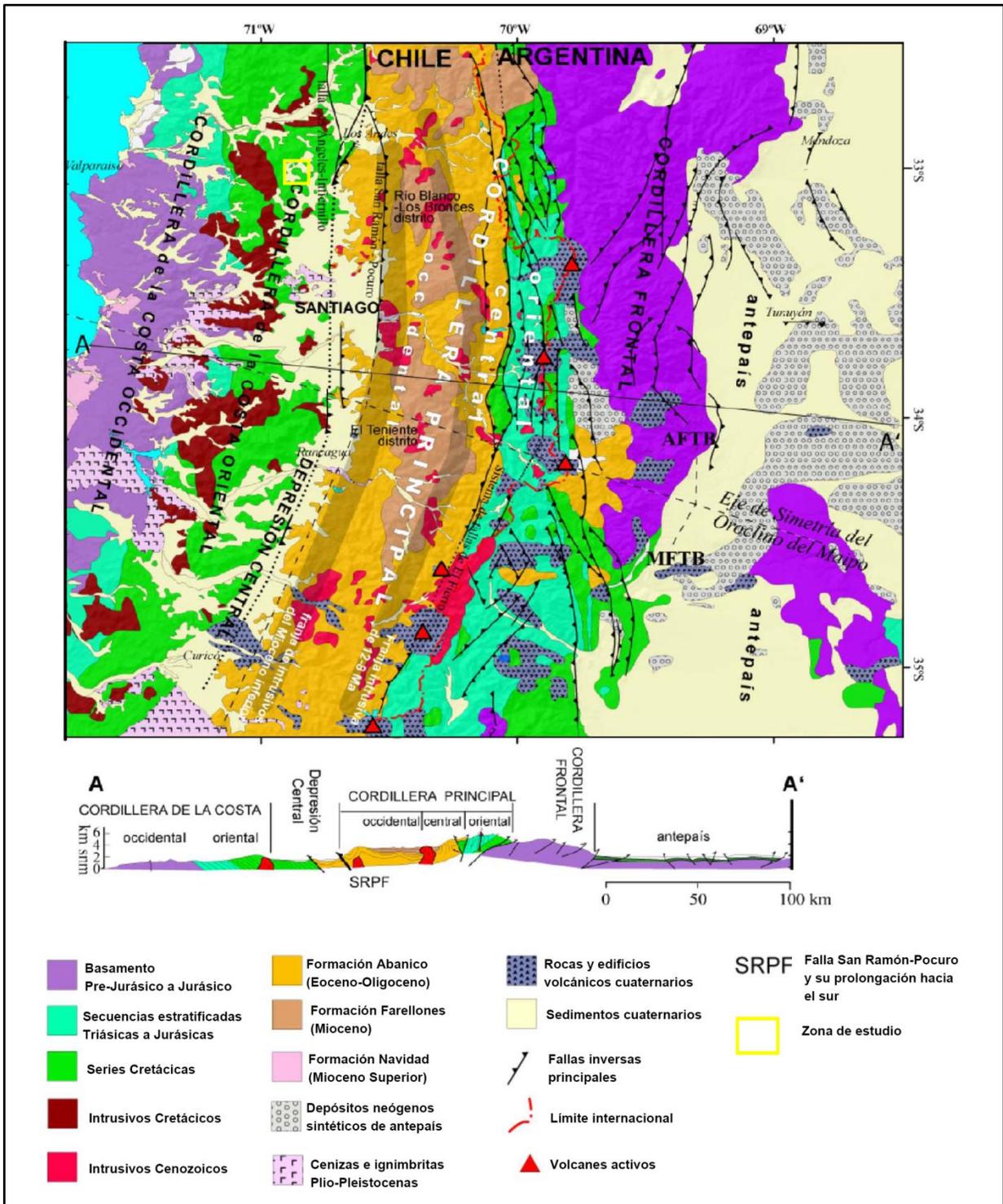


Figura 2.- Mapa geológico simplificado. Extraído de Farías et. al. (2007).

2.3 Clima y Vegetación

En el área de estudio se dan condiciones climáticas distintas a las zonas aledañas. Esto se explica por los cordones montañosos de la Cordillera de la Costa ubicados al poniente de la zona de interés. Ellos actúan como un biombo climático dificultando el ingreso de un clima con características marítimas dándole al sector condiciones de clima semi-árido, es decir, con déficit de lluvias, fluctuaciones térmicas y aire seco. Evidencia de aquello son los datos pluviométricos, los cuales indican que en los sectores cercanos a la Cordillera de la Costa, como Caleu, reciben mayor precipitación, la cual va disminuyendo a medida que se avanza hacia el este (Huechún).

La flora en la zona de estudio, está compuesta fundamentalmente de espino y, en menor medida, de algarrobos. Presenta una bajísima densidad, lo cual se explica por el escaso desarrollo de suelo y al afloramiento de material rocoso en superficie. Además, ambas especies están altamente adaptadas a hábitats áridos, lo que da cuenta del contexto climático de la zona.

El piso herbáceo se mantiene verde durante otoño e invierno y, durante el resto del tiempo, se halla seco (ver Figura 3). Esto último, asociado a la intensiva depredación de la ganadería, genera que los suelos quedan descubiertos, originando procesos erosivos laminares durante las primeras lluvias de otoño.



Figura 3.- Fotografías zona de estudio. Izquierda: foto tomada en noviembre de 2012. Derecha: foto tomada en junio de 2013.

2.4 Usos de suelo sector Llanos de Rungue

En la Figura 4 se muestra el uso de suelo asociado al fundo Llanos de Rungue el cual se ha dividido en 6 sectores conforme a los usos de suelo del Plan Regulador Metropolitano de Santiago (P.R.M.S.).

Según éste, el predio del proyecto donde se desea instalar la planta se ubica en una zona definida para uso de suelo de Interés Silvoagropecuario Mixto 6 (I.S.A.M. - 6).

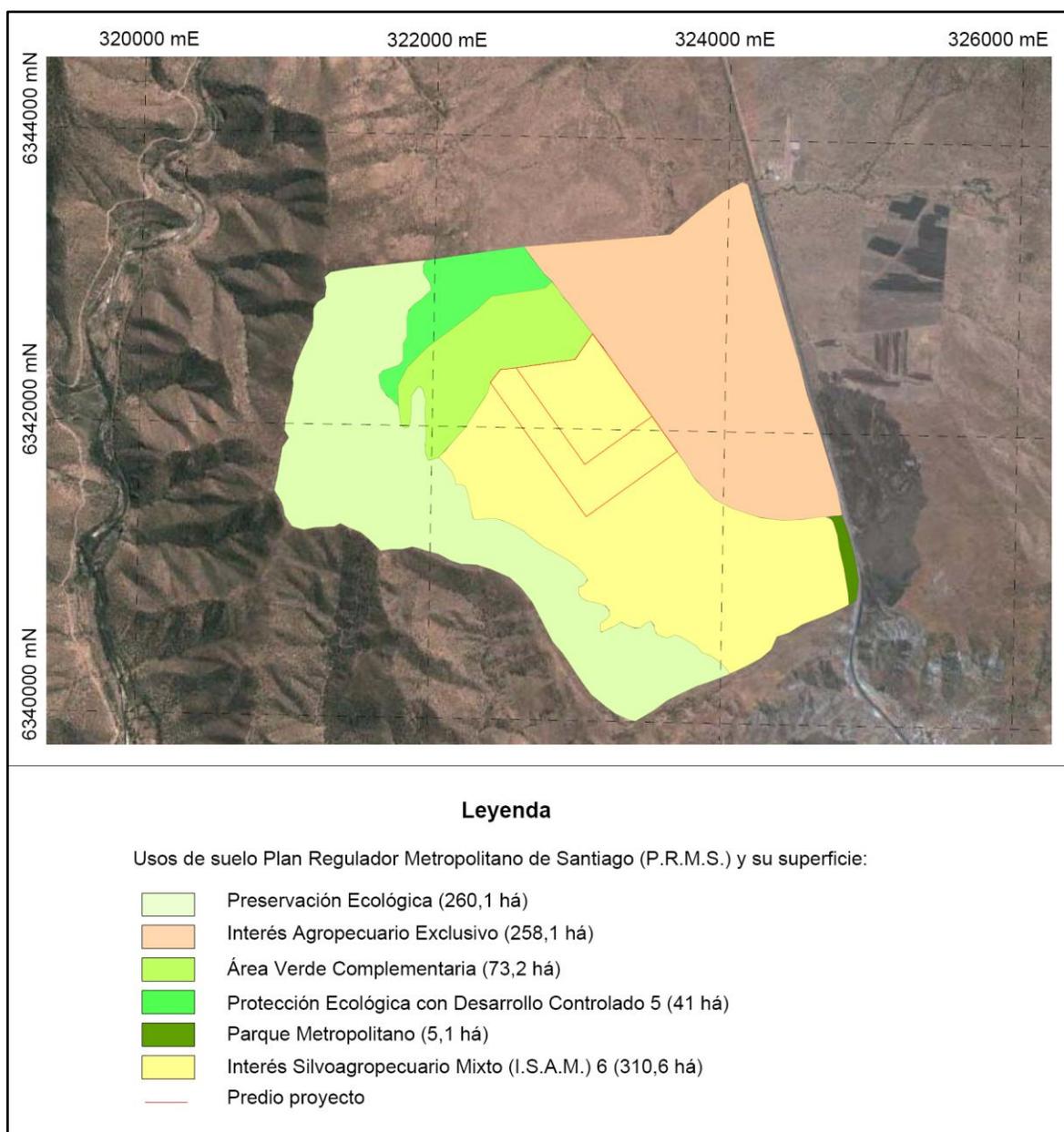


Figura 4.- Uso de suelo sector Llanos de Rungue. Sistema de coordenadas UTM WGS84, huso 19 Sur.

2.5 Antecedentes de trabajos anteriores

A continuación, se presentan los antecedentes de trabajos anteriores realizados en la zona de interés que aportan información fundamental a esta investigación.

El primero de ellos es un estudio realizado por Aguirre et. al. para el Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN) en conjunto con el Instituto Federal de Geociencias y Recursos Naturales de Alemania (BGR) el año 2005 denominado “Informe Fondo de REFIMET”. En éste se realizó un diagnóstico de la situación ambiental en la que se encontraba el

pasivo minero ubicado en dicho sector. Para ello se realizaron estudios geofísicos, hidrogeológicos e hidrogeoquímicos.

El estudio geofísico se orientó en determinar la geometría del acuífero, detectar la posible presencia de una pluma de contaminación y delimitar su extensión, y estimar el espesor de los depósitos de residuos mineros.

En el estudio hidrogeológico se caracterizaron hidrogeológicamente las unidades de roca presentes y se realizaron campañas de muestreo de aguas subterráneas, lo que permitió establecer la dirección, sentido y gradiente del flujo regional del agua subterránea, sus características hidroquímicas y la situación de éstas en el entorno del sitio de interés.

El estudio hidrogeoquímico consistió en el muestreo y análisis químico de aguas subterráneas y superficiales presentes en la subcuenca del fundo El Llano de REFIMET. Con esto, se estableció el carácter hidrogeoquímico del área.

Se cuenta, además, con otro estudio hidrogeológico el cual fue llevado a cabo por la empresa INGEDOS el año 2007 en el Llano de Rungue. En él se investigó la presencia, magnitud, características y condición de escurrimiento del agua subterránea en dicho sector. Para ello realizaron levantamientos topográficos en los piezómetros construidos por el SERNAGEOMIN con el fin de determinar la profundidad del nivel de agua y la posición relativa de cada uno en relación con los demás. Además, a estos piezómetros se les realizó un muestreo hidroquímico para determinar la concentración de arsénico.

Otro estudio que aportó información relevante es el informe publicado el año 2002 por la Dirección General de Agua (DGA). Éste trata de una zonificación hidrogeológica para las regiones Metropolitana y de Valparaíso. En él se define la localización espacial de cada uno de los sectores acuíferos reconocidos en las regiones y se dan a conocer las unidades hidrogeológicas de las distintas zonas acuíferas específicas estudiadas. Define la cuenca del estero Tilttil como una subcuenca del sector de Tilttil, el cual forma parte del sistema de Chacabuco, que a su vez, se ubica en la cuenca del río Maipo. En esta subcuenca existen tres unidades hidrogeológicas; Lampa 1, Lampa 2 y Lampa 3, las cuales corresponden principalmente a depósitos coluviales, conos de deyección y a depósitos fluviales actuales y antiguos aterrizados.

Fernández (2001), efectuó un estudio geológico-ambiental para la planificación territorial del sector Tilttil-Santiago. En el área de estudio reconoció la unidad geoambiental C2a correspondiente a la zona distal de los conos de deyección, la cual se encuentra rodeada por unidades rocosas, y a la zona apical de conos de deyección.

Por último, de acuerdo al estudio realizado por el Servicio Nacional de Geología (2003) llamado “Peligro de remociones en masa e inundaciones de la cuenca de Santiago” a escala 1:100.000, la zona de estudio se clasifica como un terreno de bajo a nulo peligro. Esto implica que dicho terreno es permeable y con buen drenaje, en el que las aguas lluvias escurren o se filtran sin ocasionar inundaciones mayores. Cabe destacar que la clasificación se realizó de acuerdo a la acumulación de aguas lluvias y al ascenso de nivel freático somero.

CAPÍTULO 3: MARCO GEOLÓGICO

Conforme a los antecedentes recabados y analizados, se estructuró el Mapa geológico que a continuación se adjunta (Figura 5). Además, se incluye la descripción de las unidades geológicas presentes en la zona de estudio clasificadas en estratificadas, no consolidadas o intrusivas, ordenadas cronológicamente.

3.1 Rocas Estratificadas

Estas rocas están representadas por las formaciones Las Chilcas y Lo Valle, definidas por Thomas (1958). Ellas afloran principalmente en la zona central y en el oriente, abarcando una superficie total aproximada de 30% (ver Figura 5).

Formación Las Chilcas – Kilc (Aptiano? – Albiano)

Esta formación de rocas sedimentarias y volcánicas, posee una distribución preferentemente norte-sur, la cual aflora desde Rungue y Montenegro por el norte hasta Polpaico por el sur, cubriendo al menos un 25% de la superficie de la zona de estudio (ver Figura 5).

Se dispone de manera concordante sobre el miembro superior de la Formación Veta Negra. Su límite superior está dado por la discordancia sobre la cual se dispone la Formación Lo Valle (Thomas, 1985). Otros autores, como Godoy (1981) y Padilla (1981), describen este contacto como concordante bajo la Formación Lo Valle.

Éstas rocas estratificadas se pueden subdividir en 3 niveles, concordantes entre sí, pero distintas según el carácter predominante (Thomas, 1958). En el nivel basal se reconocen rocas piroclásticas dacíticas a riolíticas con intercalaciones de lavas andesíticas y basálticas. Sobre este nivel se encuentra el miembro medio (a), compuesto por conglomerados y areniscas con restos vegetales, asociado a un nivel de calizas marinas. Hacia el techo de la formación, en el nivel denominado (b), se reconocen lavas basálticas y andesítico-basálticas.

Thomas (1958) propone un espesor de 6.050 m, al cual se le agregan 1.000 m correspondientes a capas basales que faltan en su perfil propuesto, quedando así un espesor máximo de 7.000 m. Por otro lado, Irrarázaval (1977) al sumar los espesores de cada unidad calcula un espesor promedio total de 2.650 m.

La edad de esta formación es estimada por diversos autores según los fósiles encontrados, las relaciones estratigráficas con otras formaciones y por dataciones radiométricas. Thomas (1985) propone una edad cenomaniana a turoniana, según fósiles de algas encontrados y la concordancia con la Formación Veta Negra. Además, correlaciona las formaciones Veta Negra y Las Chilcas con Colimapu, asignando una equivalencia entre estas unidades.

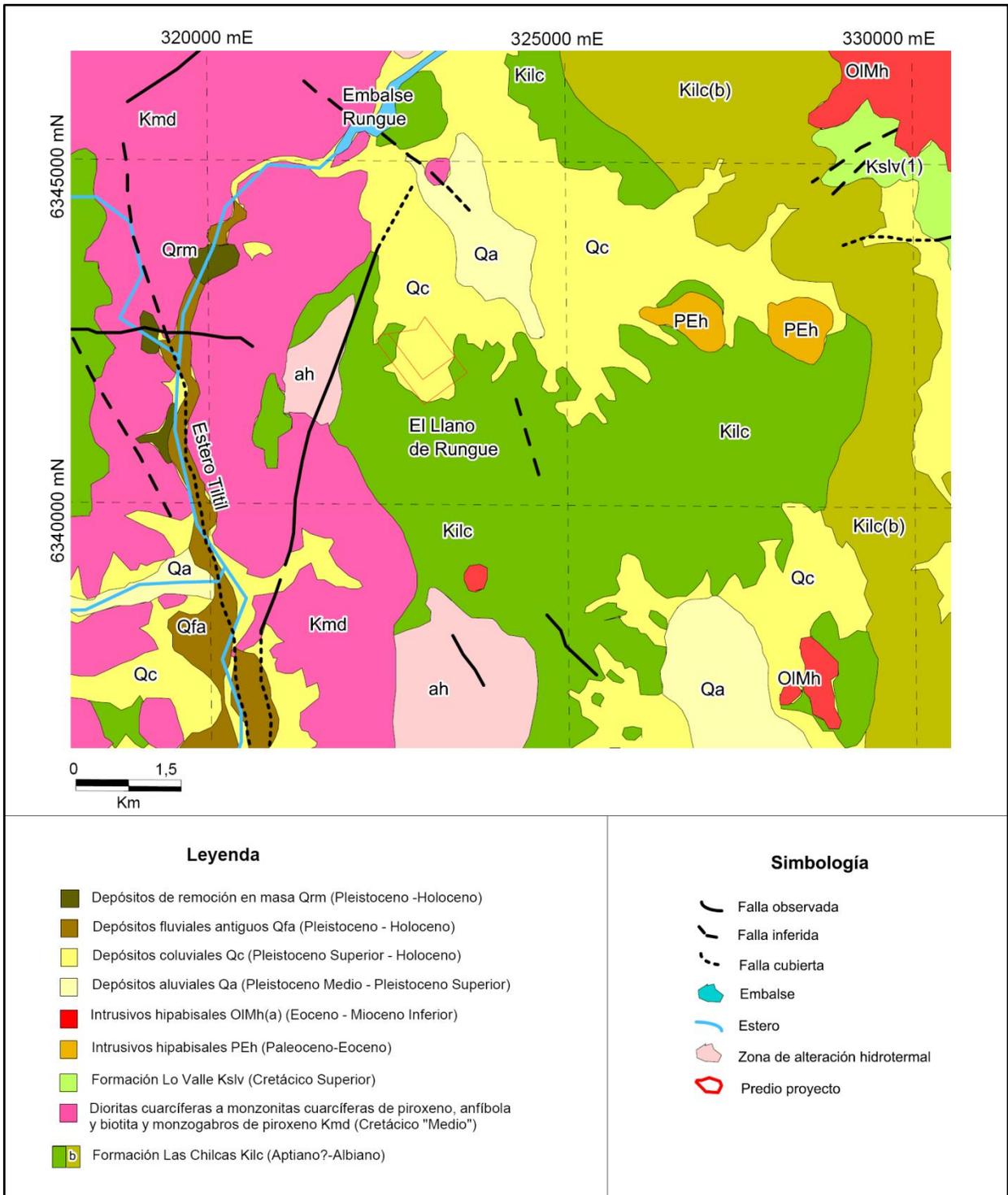


Figura 5.- Mapa geológico de la zona de estudio. Sistema de coordenadas UTM WGS84, huso 19 Sur.

Irrázaval (1977) postula que la edad de la Formación Las Chilcas es más joven que el Neocomiano, edad de la Formación Lo Prado, la cual subyace concordantemente a las formaciones Veta Negra y Las Chilcas. Además, por algas Pucaliptus (Cucaliptus) encontradas cerca de Polpaico, le asigna a esta formación una edad turoniana.

Vergara y Drake (1979) realizaron dataciones radiométricas en rocas que subyacen y sobreyacen a esta unidad encontrando valores entre 105 M.a. en andesitas de la Formación Veta Negra y entre 77,8 \pm 1 y 64,6 \pm 1 M.a. en la parte basal de la Formación Lo Valle. Esto indicaría que la Formación Las Chilcas tiene una edad que va desde el Cenomiano al Campaniano.

González (1987) postula que dichas edades se pueden deber a que se están datando cuerpos que intruyen al Miembro Noviciado de la Formación Veta Negra y que han sido asignados a la parte basal de la Formación Las Chilcas.

Formación Lo Valle – Kslv (Maastrichtiano – Paleoceno?)

Esta formación de rocas estratificadas se encuentra en la zona nororiente del área de estudio, cubriendo una parte muy reducida del mapa (ver Figura 5).

Fue definida por Thomas (1985) como una serie piroclástica de composición andesítica a riolítica, formada principalmente por depósitos volcánicos, lutitas, areniscas y conglomerados.

Aflora entre Chacabuco y Montenegro, al norte de Huenchún y de los cerros de Colina, y al este de Baños de Chacabuco y del cerro Colorado de Renca. Sobreyace en discordancia erosional a la Formación Las Chilcas y subyace a la Formación Abanico. Presenta un suave buzamiento hacia el este hasta la zona cercana a Batuco y presenta 2 sinclinales al sur del cerro Griego y en el Alto de Huenchún.

Está conformada por dos niveles estratigráficos. El nivel inferior (1) lo componen conglomerados y areniscas, intercalados con tobas. En este nivel se encuentran restos de madera silicificada. El nivel superior (2) presenta tobas dacíticas a riolíticas, cristalinas y brechosas cubiertas por tobas de lapilli y brechas piroclásticas andesíticas.

El espesor promedio calculado por Thomas (1985) para esta formación es de 700 m, pero estudios recientes arrojan valores de hasta 1.800 m.

Thomas (1985) correlaciona, litológica y estructuralmente, esta formación con la Formación Farellones en la alta Cordillera asignándole una edad de depositación cretácica superior post-Coniano. Con la edad asignada a la Formación Las Chilcas, cenomiana-turoniana, Thomas (1985) asume que el plegamiento que afectó a esta formación habría ocurrido durante el Coniaciano.

Dataciones realizadas por Gana y Wall (1997) a esta formación indican valores entre 72,4 \pm 1,4 y 65 \pm 2 M.a. (Maastrichtiano). Además, Vergara y Drake (1978) realizaron dataciones en el nivel superior al norte de los 33°S, arrojando valores entre 70,5 \pm 2,5 y 64,6 \pm 5 M.a., coincidiendo con la edad Maastrichtiano asignada por Gana y Wall (1997).

Dataciones radiométricas efectuadas por Vergara y Drake (1978) a la Formación Farellones, arrojan valores de $17,3 \pm 0,3$ y $18,5 \pm 0,2$ M.a. (Mioceno Inferior), con lo cual la correlación propuesta por Thomas (1985) no sería válida.

3.2 Depósitos no consolidados

Los depósitos no consolidados existentes en la zona de estudio abarcan aproximadamente un 20% de ésta (ver Figura 5) y son de variado tipo. De acuerdo con Varela (1991, 1996), Gana et. al. (1996) y Wall et. al. (1996) a nivel regional se distinguen seis tipos de depósitos no consolidados: coluviales; aluviales; lacustres; fluviales; de remoción en masa; y relleno artificial, con edades que van desde el Pleistoceno al Holoceno.

A continuación se entrega una descripción de estos sedimentos, compilada y modificada, a partir de los autores mencionados.

Depósitos aluviales – Qa (Pleistoceno Medio – Pleistoceno Superior)

Corresponden a sedimentos emplazados hacia el fondo del valle, relleno gran parte del depocentro del Llano de Rungue. Están formados por gravas, arenas y, en menor proporción, sedimentos finos. Se originan por variaciones o desvíos en los cursos de ríos y esteros, y por cursos de escurrimiento superficial intermitente interdigitados con sedimentos gravitacionales. Por su baja cobertura y espesor tienen escasa importancia hidrogeológica.

Depósitos fluviales antiguos – Qfa (Pleistoceno – Holoceno)

Corresponden a depósitos asociados a cursos fluviales inactivos. Estos se ubican a lo largo del estero Tilttil, entre 3 y 20 m sobre el curso fluvial actual formando niveles aterrazados. Están constituidos por ripios, gravas, gravas arenosas, arenas y limos. Presentan una cobertura de suelo bien desarrollada.

Depósitos de remociones en masa - Qrm (Pleistoceno – Holoceno)

Son depósitos no consolidados formados por flujos de detritos, flujos de barro, deslizamientos, desprendimiento de bloques, reptación y hundimiento. Se ubican a los lados del estero Tilttil y al nororiente de la zona de estudio.

Depósitos coluviales – Qc (Pleistoceno Superior – Holoceno)

Sedimentos no consolidados de muy mala selección granulométrica y matriz soportados. Presentan clastos angulosos a subangulosos producto de la descomposición de las rocas con escaso transporte.

Corresponden a escombros de falda y conos de deyección, los cuales se ubican a la salida de quebradas y en pequeños valles intermontanos, donde pueden tributar a causas mayores y, así, contribuir como fuente de material para otro tipo de depósitos.

Tienen escasa potencia y su importancia hidrogeológica radica en que, debido a su cobertura relativamente alta y a su permeabilidad media, constituyen un medio propicio para facilitar la infiltración de una fracción de las precipitaciones.

3.3 Rocas Intrusivas

Intrusivos hipabisales – OIMh

(34-19 M.a. (Eoceno – Mioceno Inferior))

Corresponden a ‘stocks’, filones manto, cuellos volcánicos y diques. En la zona de estudio se reconocen 2 grupos. El primero corresponde a gabros y microgabros de piroxeno y olivino, y dioritas y microdioritas de piroxeno que afloran entre Huechún y Portezuelo Manzano.

El segundo grupo está conformado por basaltos de olivino, andesitas basálticas de piroxeno y olivino y andesitas de piroxeno. Aflora en los cerros El Buitre, Coironal y Polpaico, intruyendo a las formaciones Las Chilcas y Lo Valle.

Intrusivos hipabisales – PEh

(64-53 M.a. (Paleoceno - Eoceno))

Corresponde a un conjunto formado por dos ‘stocks’ de composición basáltica con piroxenos y olivino. Intruyen a las formaciones Las Chilcas y Lo Valle y a plutones cretácicos.

Granitoides del Cordón Caleu – Alto de Lipague

(ca. 100-90 M.a. (Cretácico Medio))

Complejo multiplutónico cuya composición varía entre granodioritas y gabros. En la zona de estudio se reconoce solo una de sus facies (Kmd). Ésta está compuesta por dioritas cuarcíferas a monzonitas cuarcíferas de piroxeno, anfíbola y biotita, y monzogabros de piroxeno. Aflora en los alrededores de Tiltil y en las zonas de Lo Aguirre y Altos de Polpaico donde intruyen estratos del Cretácico Inferior.

3.4 Estructuras

A nivel regional, las principales estructuras y lineamientos presentan una orientación nor-noroeste y nor-noreste en la Cordillera de la Costa y norte-sur en la Cordillera de los Andes.

El borde occidental de la Cordillera de los Andes se ha interpretado como un sistema de fallas inversas de vergencia oeste, denominada sistema de fallas San Ramón- Pocuro (Charrier et. al., 2005) (ver Figura 2). Hacia el norte este sistema de fallas se extiende como una falla normal parcialmente invertida denominada falla Pocuro (Farías, 2007).

Por el eje de la Depresión Central, se reconoce el sistema de fallas Los Ángeles-Infiernillos (ver Figura 2), las cuales son fallas normales invertidas con inclinación este (Farías et. al., 2010) ubicadas a unos 30 km al este de la zona de estudio.

A escala local, Wall et. al. (1999) reconoce distintos tipos de fallas en los alrededores de la zona de estudio, tal como se ilustra en la Figura 6. En ella se distinguen 2 fallas inferidas de gran longitud. La primera de ellas -enmarcada con color azul en la Figura 6 -fue definida por Fuentes (2004) como una falla inferida de orientación N50°E la cual presenta rocas cataclásticas y planos estriados casi verticales a lo largo de su traza. La segunda es una falla inferida de orientación aproximada norte-sur ubicada a lo largo del estero Rungue. Además, reconoce un homoclinal asociado a la Formación Las Chilcas de rumbo nor-noroeste con manteo variable de 50° a 10°E el cual disminuye hacia el oriente.

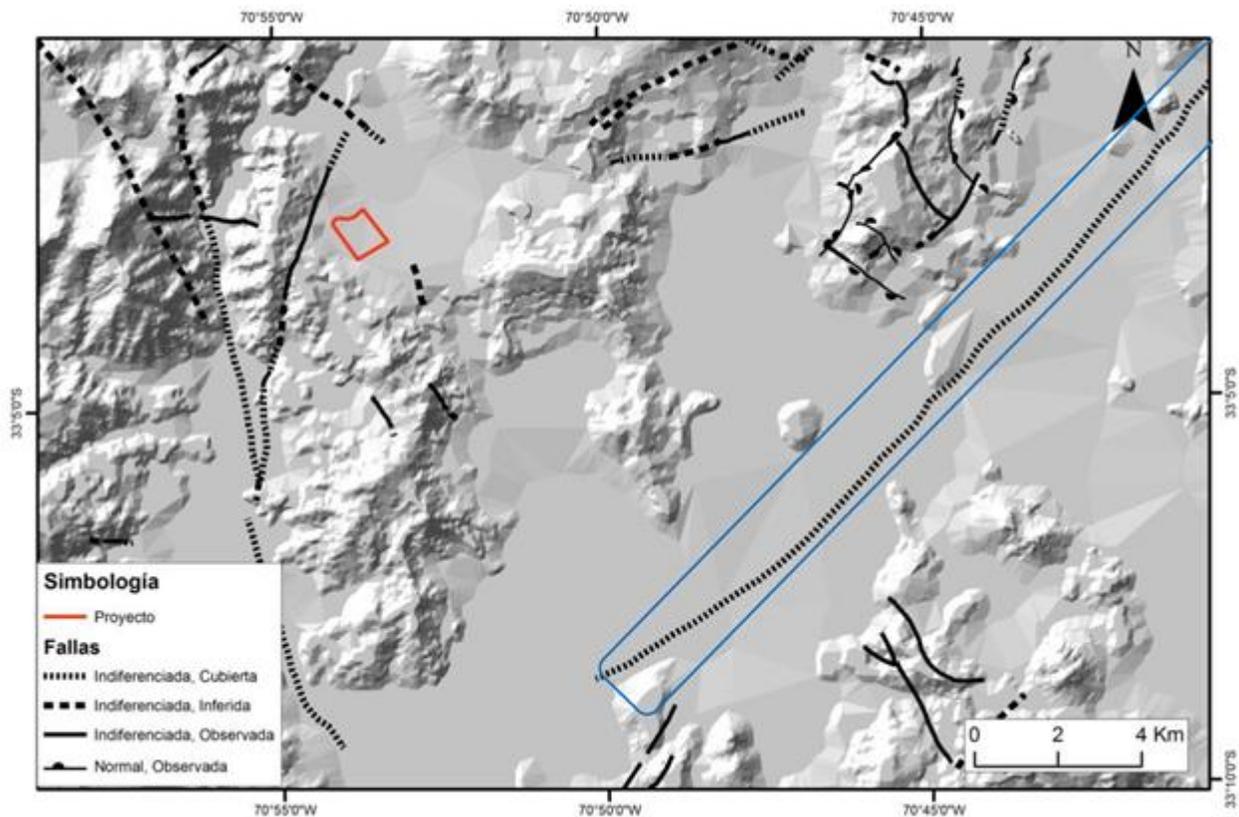


Figura 6.- Fallas reconocidas por Wall et. al. (1999) sobre una imagen de relieve topográfico. Imagen extraída de informe *Geología depósitos residuos peligrosos Rungue* de Rocmass Ingeniería Geológica (2013).

Aguirre et. al. (2005) también reconoce esta última estructura, pero observa un cambio de rumbo y una mayor inclinación en el manteo de esta formación, por lo que la define como un anticlinal de eje aproximado noreste-suroeste (ver perfil en Figura 7). Este pliegue presenta cizalle concentrado en planos paralelos a la estratificación, infiriendo un movimiento dextral-inverso. Además, se reconoce un trituramiento de las rocas entre dichos planos, reconociendo la presencia de arcillas (montmorillonita) y carbonatos blanquecinos relleno, pero no sellando, tanto planos de fractura como espacios creados producto del trituramiento de la roca. Su caracterización también señala al menos 100 m de largo (86,6 m de potencia real), con zonas con mayor concentración de fracturas separadas por zonas de roca más competente.

Este último autor reconoce tres estructuras más: dos fallas de orientación aproximada noroeste-sureste y otra noreste-suroeste de mayor longitud (Figura 7).

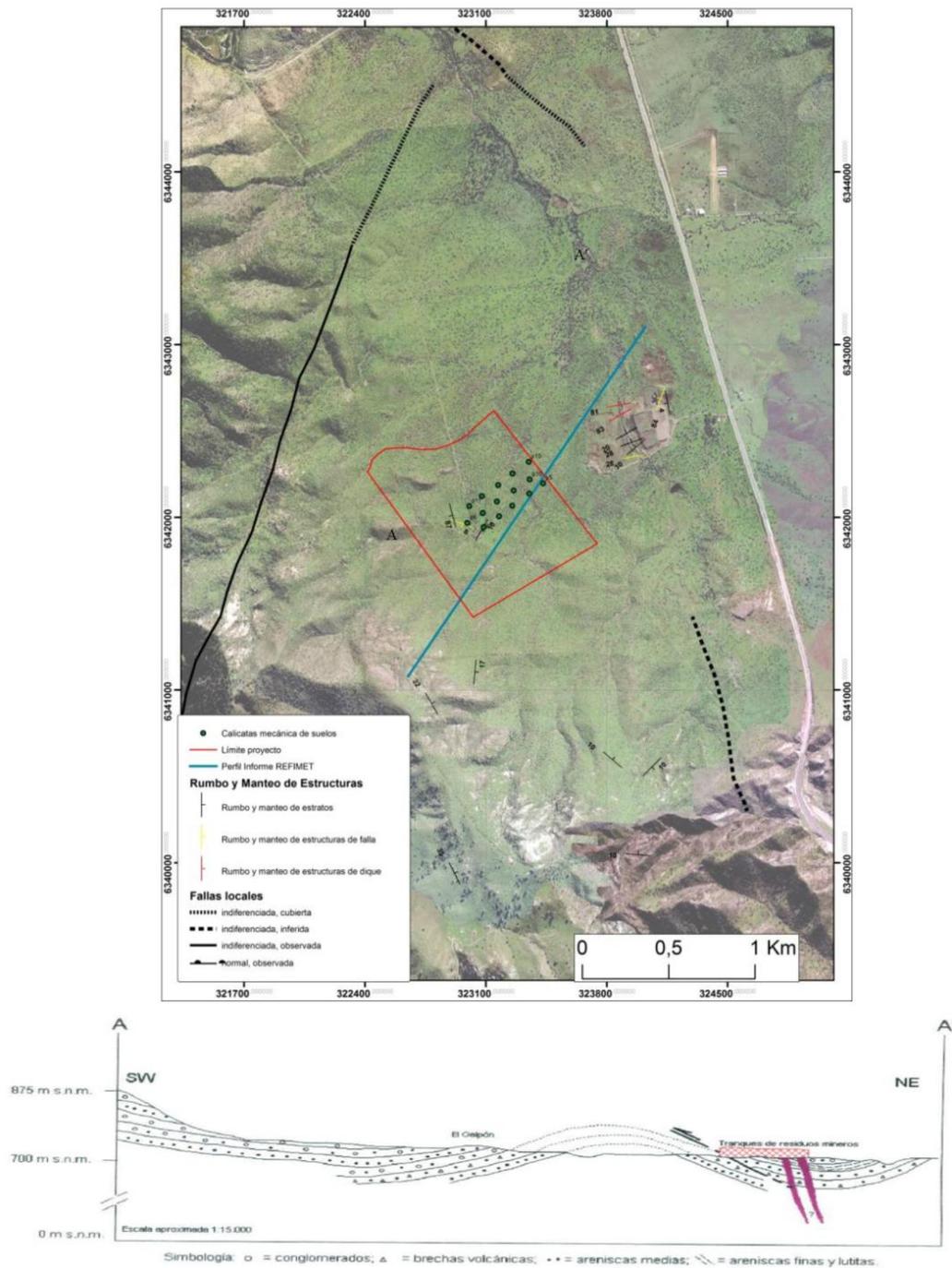


Figura 7.- Disposición estructural de la Formación Las Chilcas y perfil esquemático del entorno geológico de la zona de estudio. Imagen extraída de informe *Geología depósitos residuos peligrosos Rungue* de Rocmass Ingeniería Geológica (2013). Sistema de coordenadas UTM WGS84, huso 19 Sur.

3.5 Alteración

En el área de estudio se reconocen zonas de alteración hidrotermal. Según Irrázaval (1977) se diferencian 5 asociaciones minerales que pueden resumirse en 3 zonas principales: clorita-epidota, arcilla-sílice y sílice-sericita.

Las rocas que se ven afectadas por esta alteración en la zona de estudio son principalmente las andesitas porfíricas con lavas brechosas correspondientes a la Formación Las Chilcas. Los cambios mineralógicos manifestados en sus constituyentes han generado principalmente caolinita, muscovita y cuarzo, y localmente pirofilita y jarosita (González, 1987).

La asociación mineral de clorita-epidota corresponde a una fase propilítica caracterizada por clorita, epidota y, en menor cantidad, calcita, sericita, arcilla, caolita y piritita, superpuesta a una fase argílica en algunos sectores.

La asociación de arcilla-sílice es la predominante en la zona de estudio. Presenta caolinita, cuarzo en vetillas, montorillonita y clorita, y de manera accesoría, sericita, jarosita, halloysita y yeso.

En las rocas que presentan asociación de sílice-sericita, no es posible distinguir la textura original, sino que se observa una masa homogénea de sílice criptocristalina con textura sacaroidal.

CAPÍTULO 4: HIDROLOGÍA

En el presente capítulo se genera la información hidrológica necesaria para la determinación de datos hidrogeológicos relevantes. Para ello se recolectaron los antecedentes que describen completamente la red hidrográfica identificando los cauces principales, las cuencas drenadas, afluentes, etc. con lo que se pudo definir la subcuenca de estudio. Además, se recopiló antecedentes meteorológicos en estaciones pluviométricas que se encuentran cercanas a dicha subcuenca y donde se cuenta con los datos medios mensuales de precipitación, evaporación, temperatura, etc.

Con dichos antecedentes, se procedió a estimar la recarga del acuífero. Por las condiciones del lugar se supuso que ésta era esporádica y de modesta magnitud, por lo tanto, se utilizó el método de la Curva Número. Además de éste, se calculó la recarga por medio de un balance medio anual, con lo cual se obtuvieron valores relativamente similares para ambos métodos.

4.1 Red hidrográfica

De acuerdo a la denominación utilizada en el Mapa Hidrogeológico de Chile, escala 1:2.500.000 de la Dirección General de Aguas (1986), la zona de estudio se encuentra ubicada en la provincia Andina de Vertiente al Pacífico, en la sub-subcuenca del estero Tilttil, dentro de la subcuenca del río Mapocho Bajo, el cual forma parte de la cuenca del río Maipo.

La cuenca del río Maipo se ubica en la zona central de Chile, drena un área de 15.300 km² y abarca desde la Cordillera de los Andes hasta la costa, siendo una de las cuencas más grandes de Chile. El río Maipo es de régimen mixto nivo-pluvial y su afluente más importante es el río Mapocho, que drena la mayor parte de las aguas de la zona norte de la cuenca (DGA-MOP, 2004).

La subcuenca del río Mapocho Bajo se encuentra en el centro norte de la cuenca del río Maipo. El cauce principal de ella es el río Mapocho, el que drena la mayor cantidad de aguas lluvias de la zona urbana de Santiago y también aguas provenientes de deshielos cordilleranos. Esta subcuenca drena un área de 3.450 km², siendo sus cauces más importantes los esteros Colina y Lampa.

Finalmente, la sub-subcuenca del estero Tilttil, se ubica en el extremo noroeste de la subcuenca del Mapocho Bajo, específicamente en el sistema de Chacabuco en el sector de Tilttil. Sus límites norte y oeste corresponden a la línea que define el límite de la Región Metropolitana. En esta sub-subcuenca existe un escurrimiento de tipo exorreico y régimen pluvial, y sus principales cauces son los esteros Rungue, Tilttil y Polpaico. Este último se encuentra a la salida de la cuenca y drena sus aguas al estero Lampa. La cuenca drena un total de 430 km².

En el sitio de estudio las aguas superficiales son drenadas hacia el norte, hacia la quebrada de Las Pozas, y luego son evacuadas hacia el estero Rungue. Este estero se une con el estero Caleu y forman el estero Tilttil, el cual conduce las aguas hacia el sur hasta formar el estero

Polpaico. Este último desagua al estero Lampa, el que confluye luego con en el estero Colina para llegar al río Mapoch, y, finalmente, al río Maipo (Sustentable S.A., 2012).

Al nor-noroeste del lugar de interés, se ubica el embalse Rungue el que es parte fundamental del sistema de regadío de Tiltit, con una capacidad aproximada de 2.300.000 m³. Distribuye el agua por una red de canales, tuberías y sifones de conducción diseñados para regar una superficie aproximada de 500 ha en el valle del estero Tiltit.

4.2 Subcuenca de estudio

A partir de la cartografía vectorial del sector de Tiltit elaborada por el Instituto Geográfico Militar (IGM) en formato Shapefile (SHP) a escala 1:50.000 con curvas cada 50 metros, y de las imágenes satelitales tomadas de Google Earth, se logró delimitar la subcuenca de estudio. Para ello se trazó una línea que siguiera las altas cumbre teniendo en cuenta que debía cortar ortogonalmente a las curvas de nivel. Dicho trazado se ilustra en la Figura 8 que a continuación se adjunta.

La subcuenca definida posee un área de 37,9 km² y se ubica en un llano de orientación nor-noroeste a noroeste con inclinación hacia el norte y pendiente promedio de 1,5%. Presenta una serie de quebradas menores de actividad intermitente y una extensa hoya receptora de aguas superficiales. Estas características topográficas indican que la orientación de los flujos superficiales debiese ser nor-noroeste a noroeste, siguiendo las quebradas del entorno.

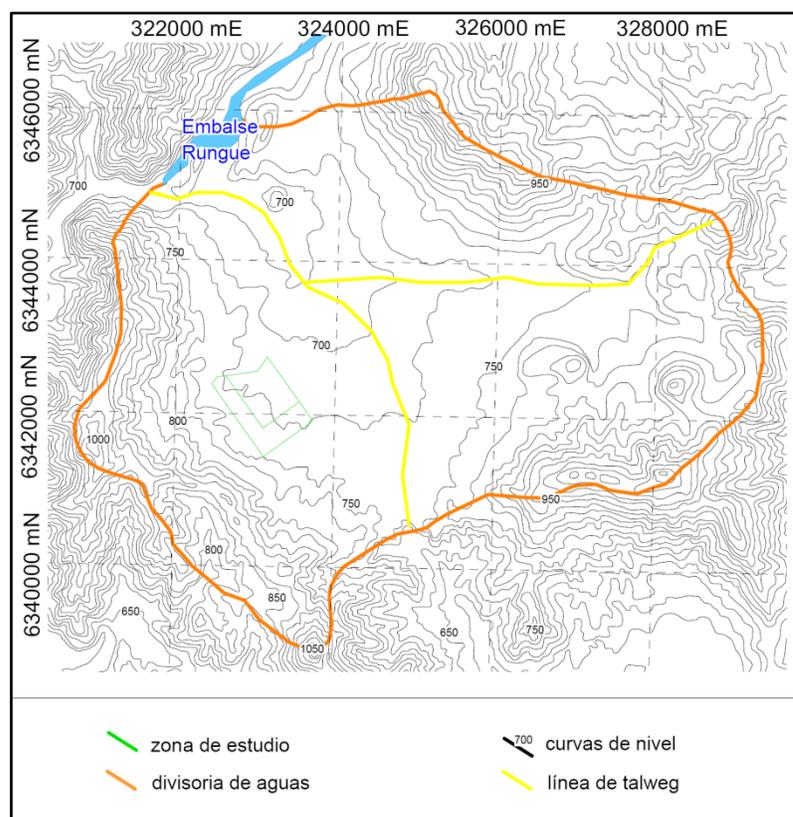


Figura 8.- Subcuenca de estudio. Sistema de coordenadas UTM WGS84, huso 19 Sur.

4.3 Antecedentes meteorológicos

La estación meteorológica que se encuentra más cercana a la zona de estudio es la estación pluviométrica Embalse Rungue, ubicada a un costado de dicho embalse, a menos de 4 km del sitio de interés, en las coordenadas 6.344.563 N y 321.575 E (Datum WGS84 huso 19S) a una altura de 750 m s.n.m.

Los antecedentes de dicha estación datan del año 1943 a la fecha, y contienen información sobre las precipitaciones totales anuales, precipitaciones mensuales y precipitaciones máximas diarias de cada año, datos que fueron aportados por la Dirección General de Aguas (DGA). El registro cubre un total de 53 años con información completa entre los años hidrológicos 1944/45 – 1946/47, luego entre 1957/58 – 2005/06 y, finalmente, el año 2010/2011.

4.3.1 Precipitaciones anuales

Según el registro de la estación meteorológica Embalse Rungue, el año hidrológico con mayor precipitación corresponde a 1997/98 con un total de 1.069,9 mm, mientras que el año con menor precipitación corresponde a 1968/69 con 66,3 mm (cf. Anexo D, Tabla D1). Al calcular la media anual a partir de los datos, este arroja un valor de 371,2 mm.

4.3.2 Precipitaciones mensuales

A partir de la información disponible de las precipitaciones mensuales de la estación meteorológica Rungue Embalse (cf. Anexo D, Tabla D2), se calculó la precipitación media mensual y los valores máximos y mínimos de cada mes (Tabla 1).

Los períodos más secos son los meses de diciembre y enero correspondientes a meses de verano, mientras que los más húmedos son los meses de junio y julio correspondientes a meses de invierno. Esto sugiere que las lluvias presentan un carácter estacional.

Tabla 1.- Registro precipitaciones mensuales promedio en estación meteorológica Rungue Embalse.

	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR
Promedio	12,3	60,6	98,1	99,4	56,2	23,8	7,0	6,9	1,3	0,6	2,4	2,5
Mínimo	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Máximo	120,4	283,5	492,8	621,4	218,5	119,0	74,0	70,1	34,0	25,6	77,0	31,6

4.3.3 Precipitaciones máximas en 24 horas

En el informe realizado por Sustentable S.A. el año 2012 denominado “Hidrología Rungue”, se calcularon las precipitaciones máximas en 24 horas para distintos períodos de retorno. Para ello tomaron el registro de precipitaciones máximas en 24 horas de la estación

Rungue Embalse aportados por la Dirección General de Agua (DGA) (cf. Anexo D, Tabla D3), el cual cubre el mismo período descrito anteriormente en el análisis de precipitaciones anuales (53 años de información completa) y contiene la precipitación máxima diaria de cada año.

A estos datos se les ajustó una distribución de Valores Extremos Generalizados (GEV) mediante el método de máxima verosimilitud, obteniéndose los parámetros $k = -0,039$; $\sigma = 25,23$ y $\mu = 52,20$. Luego, se calcularon las precipitaciones máximas diarias para distintos períodos de retorno, las cuales se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2.- Precipitación máxima diaria y coeficientes de frecuencia para distintos períodos de retorno utilizando ajuste GEV en estación Rungue Embalse calculados por Sustentable S.A. (2012).

Período de retorno (años)	5	10	50	100
Precipitación máxima en 24 hrs. (mm)	88,95	106,54	143,48	158,39
Coficiente de frecuencia	0,835	1,000	1,347	1,487

4.3.4 Temperatura media anual

La temperatura media anual se obtuvo a partir de los datos aportados por la Dirección General de aguas (DGA) de la estación meteorológica Embalse Rungue donde se tiene un registro de 36 años completos en el período abarcado entre los años 1966 y 2005. Según éstos, la temperatura media anual tiene un valor de 14,7°C (cf. Anexo D, Tabla D5).

4.3.5 Evaporación

Para el caso de la evaporación se utilizó, al igual que en el caso de la pluviometría, el registro de datos de la estación meteorológica Embalse Rungue aportados por la Dirección General de Aguas (DGA). Este registro cuenta con un total de 33 años completos, desde el año 1966 hasta el año 2005, con información mensual de evaporación (cf. Anexo D, Tabla D4).

Como se ilustra en la Tabla 3, se calcularon los valores máximos, mínimos y promedios de evaporación mensual y de evaporación total anual. Según ello, el promedio anual de evaporación es de 1.463 mm/año y los valores máximos y mínimos tienen un carácter estacional, observándose una mayor evaporación durante los meses de verano, mientras que en los meses de invierno la evaporación es mínima.

Tabla 3.- Parámetros estadísticos de evaporación de estanque en estación Rungue Embalse.

	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
Promedio (mm)	259,9	204,3	165,1	91,6	45,4	23,0	25,2	39,5	67,4	122,2	180,5	238,7	1462,7
Mínimo (mm)	152,9	69,8	125,1	38,2	14,7	6,3	8,8	20,1	32,8	70,5	84,4	130,0	1085,6
Máximo (mm)	344,7	269,5	220,8	152,1	91,9	43,4	44,4	66,1	110,3	197,8	259,2	331,7	1942,7

4.3.6 Evapotranspiración

La evapotranspiración está influenciada por los mismos factores que afectan a la evaporación pero, a diferencia de ella, incluye las pérdidas de agua que se generan por transpiración (proceso biológico mediante el cual las plantas eliminan el agua utilizada en su metabolismo).

Para el cálculo de ella se utilizó el método de Turc (1961), con el cual se obtuvo el valor de evapotranspiración real, o sea, aquella que efectivamente se produce en una zona sin que necesariamente exista disponibilidad continua de agua en el suelo. Este método ha sido validado por la autoridad en el documento denominado Balance Hídrico de Chile (DGA, 1987).

El método propone la siguiente expresión:

$$ETR = \frac{P}{(0,9 + P^2/L^2)^{1/2}}$$

donde ETR es la evapotranspiración real en mm/año, P es la precipitación media anual en mm/año y $L = 300 + 25 * t + 0,05 * t^3$, con t temperatura media anual en °C.

Los valores de precipitación media anual (P) y de temperatura media anual (t) fueron calculados anteriormente donde se obtuvieron valores de 371,2 mm/año y 14,7°C mm/año, respectivamente. Al remplazar estos valores en la ecuación, se obtiene una evapotranspiración real de 353,6 mm/año.

4.4 Recarga

Para determinar la recarga de la cuenca se aplicaron 2 métodos, Curva Número y Balance medio anual, los cuales se detallan a continuación.

4.4.1 Curva Número

En la zona de estudio la recarga del sistema hídrico subterráneo es muy esporádica y de modesta magnitud. Ésta se genera normalmente asociada a eventos meteorológicos extremos, razón por la cual se optó por calcularla mediante el método de la Curva Número.

Dicho método permite determinar la escorrentía que genera una precipitación intensa sobre el área que se estudia. A continuación, se adjunta una reseña explicativa del método en cuestión.

Lo primero que indica esta metodología es que se producirá escorrentía en la cuenca si se cumple con la siguiente condición:

$$P_p > 0,2 * S$$

donde Pp es la precipitación acaecida durante el evento meteorológico -expresada en pulgadas- y S es la retención máxima potencial de la cuenca, parámetro que se determina mediante la siguiente expresión:

$$S = \frac{1000}{CN} - 10$$

donde CN es el valor de Curva Número que se asocia a la cuenca y que depende del tipo de cobertura del suelo y de la pendiente del mismo. Los valores de Curva Número varían entre 0 y 100 de forma que 0 representa una permeabilidad enorme para el suelo y 100 un suelo absolutamente impermeable. Obviamente ambos extremos tienen un carácter sólo referencial.

Para determinar el valor de CN se dividió la cuenca en bandas hipsométricas que permitieran discriminar distintos valores conforme al tipo de cobertura y pendiente. Los valores de Curva Número asumidos para cada banda y la cobertura de éstas se muestran en la Figura 9.

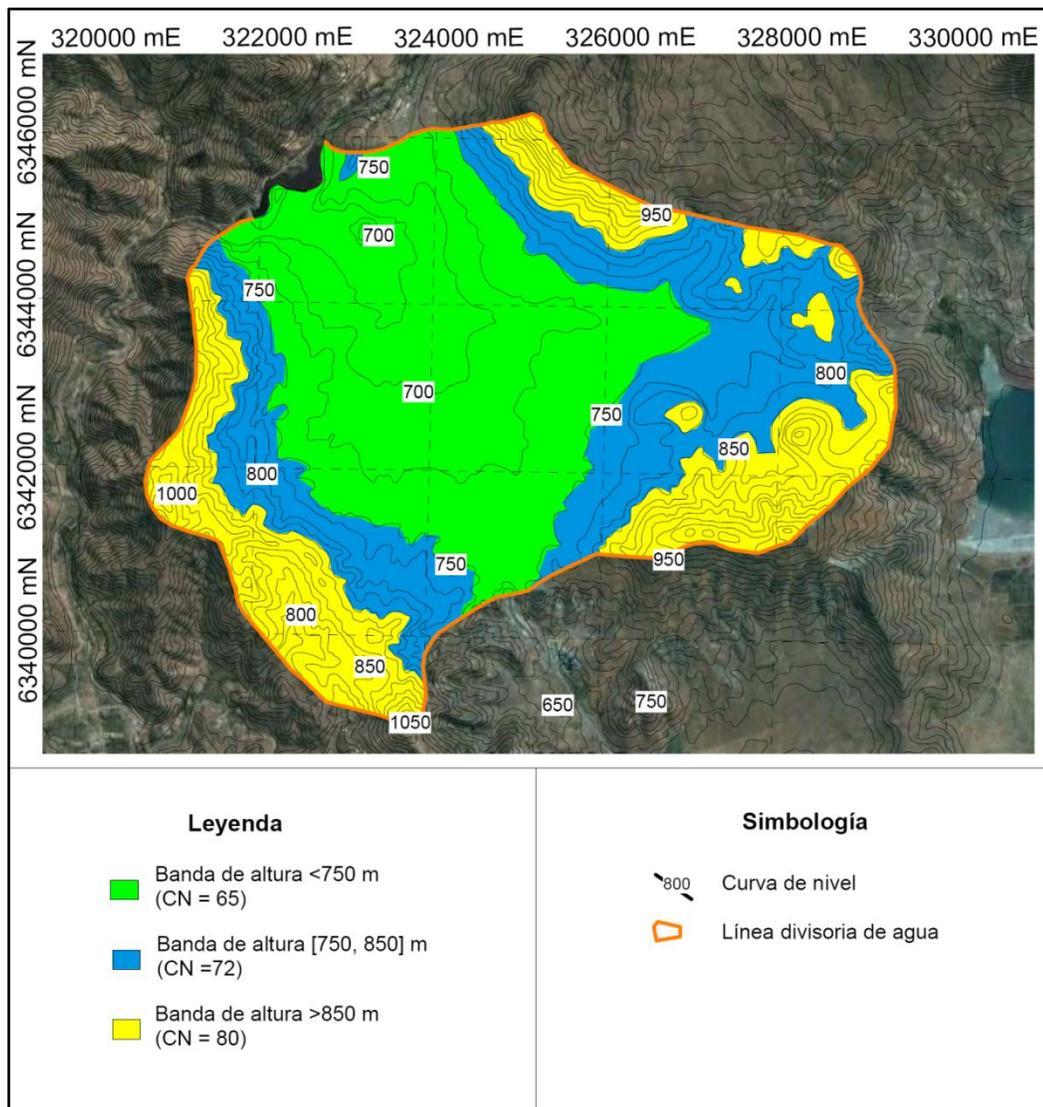


Figura 9.- Bandas hipsométricas y valores de CN. Sistema de coordenadas UTM WGS84, huso 19 Sur.

Ahora bien, calculado el valor ponderado de CN para la subcuenca (71) y considerando las precipitaciones máximas en 24 horas para períodos de retorno de 5, 10, 50 y 100 años de la estación meteorológica de la DGA denominada Rungue Embalse determinadas anteriormente, se demostró que el producto $0,2*S$ era menor que las precipitaciones y, por consiguiente, estos fenómenos sí generan escorrentía y recarga.

Conforme a lo señalado se aplicó entonces la expresión que permite determinar la escorrentía y que es la siguiente:

$$Es = \frac{(Pp - 0,2*S)^2}{(Pp + 0,8*S)}$$

Por último, se calculó la infiltración – correspondiente a la diferencia entre precipitación y escorrentía- para determinar la recarga que estos eventos generan en el acuífero. Luego, a este valor se le descontó la cantidad de agua que se evapora una vez ocurrido el evento.

Para calcular esta evapotranspiración se utilizó la fórmula empírica que asocia la capacidad de campo del suelo -que para este caso por tratarse de un suelo arcilloso se estimó en 10% -y el espesor de suelo desde el cual toda el agua contenida en él se evapora (5 cm). Esta evapotranspiración alcanzó a 5 mm después de unos dos días de lluvia, de manera que no se incorporan al acuífero.

La Tabla 4 muestra las precipitaciones máximas en 24 horas para los distintos períodos de retorno y los resultados de la escorrentía y recarga.

Tabla 4.- Precipitaciones máximas, escorrentía y recarga.

Períodos de retorno (años)	5	10	50	100
Precipitación máxima en 24 hrs (mm)	88,95	106,54	143,48	158,39
Escorrentía (mm)	27,1	38,8	66,5	78,5
Infiltración (mm)	61,9	67,7	77,0	79,9
Recarga (mm)	56,9	62,7	72,0	74,9
Recarga (l/s)	13,7	7,5	1,7	0,9

Conforme a los valores determinados, se puede asumir que la recarga de la subcuenca en la cual se ubicará el proyecto, debiera estar comprendida en el intervalo entre 7 l/s y 14 l/s.

4.4.2 Balance medio anual

El segundo método utilizado para determinar la recarga en la subcuenca de estudio fue el de Balance medio anual. Este método propone la siguiente expresión:

$$P - ETR = S$$

donde P corresponde a la precipitación media anual (mm/año); ETR a la evapotranspiración real (mm/año); y S a la escorrentía media anual total.

Al remplazar los valores de precipitación media anual (P) y de evapotranspiración real (ETR) en la ecuación -ambos calculados anteriormente- la escorrentía media en la subcuenca estudiada asciende a 17,5 mm/año o, lo que es lo mismo, 21,1 l/s.

Para calcular la recarga del acuífero, se estimó un porcentaje de infiltración importante (80%). Esta presunción pudo comprobarse el día 31 de mayo del presente año, cuando se visitó el terreno para ver los efectos de las intensas precipitaciones que afectaron el área durante dos días consecutivos. Casi no había evidencias de escorrentía superficial, las intensas precipitaciones se habían infiltrado en el subsuelo. Este valor alto de infiltración coincide con los resultados de la Curva Número que indican una infiltración de más o menos un 70%.

Conforme a lo señalado, se puede aseverar que la recarga del sistema hidrogeológico anidado en las rocas fracturadas de la Formación Las Chilcas según el método de Balance medio anula, asciende a 16,8 l/s aproximadamente.

Este valor es bastante similar a la recarga calculada mediante el método de la Curva Número calculada para 5 años de retorno. Por lo tanto, la recarga en la subcuenca de estudio fluctúa entre 10 y 17 l/s.

CAPÍTULO 5: HIDROGEOLOGÍA

El modelo hidrogeológico que se define en este capítulo ha considerado toda la información recabada mediante las siguientes tareas: descripción de sondajes, ejecución de ensayos de bombeo, interpretación de perfiles geofísicos de tipo TEM y NanoTEM, controles de niveles estáticos, muestreo y análisis químico de aguas y, muy especialmente, la caracterización geológica ejecutada en la zona por terceros.

En la primera parte del capítulo se describe, mediante los antecedentes disponibles, el acuífero de una manera cualitativa, mientras que en la segunda parte se analizan las variables cuantitativas a modo de caracterizar el acuífero.

5.1 Unidades hidrogeológicas

Conforme a las características geológicas del área, los resultados obtenidos en el levantamiento de los perfiles geofísicos tipo TEM y NanoTEM (cf. Anexo B) y la construcción de las columnas estratigráficas de los sondajes (cf. Anexo A), se han podido determinar las unidades hidrogeológicas presentes en el sitio de interés.

En la Figura 10, correspondiente al Mapa hidrogeológico, se muestra la distribución espacial de las unidades hidrogeológicas definidas en cuanto a su comportamiento y potencial hidrogeológico. Además, se puede ver la ubicación de los perfiles geofísicos, de las captaciones existentes (norias, sondajes y pique minero) y la divisoria de aguas que define la hoya hidrográfica en la zona de estudio. Podrá verse que en el extremo septentrional de la hoya se ubica el tranque Rungue emplazado en el valle del estero Tilttil al cual tributa la subcuenca estudiada.

A continuación se describen dichas unidades.

5.1.1 Roca basal (Unidad Hidrogeológica 1)

Esta unidad está conformada por variados tipos de rocas entre las cuales destacan: rocas sedimentarias clásticas continentales, lavas andesíticas, tobas y brechas del Cretácico Inferior, todas correspondientes a la Formación Las Chilcas (Kilc). También se han detectado diques afaníticos, como el observado en el sondaje S1 (cf S1 en Anexo A). Además, como se indica en la descripción de los sondajes (Anexo A), hacia la superficie se detectan unidades de rocas fracturadas y/o alteradas hidrotermalmente.

Presenta una muy modesta permeabilidad y, por consiguiente, constituye un acuífero de muy baja potencialidad.

5.1.2 Depósitos coluviales (Unidad Hidrogeológica 2)

Esta unidad está conformada por los depósitos coluviales (Qc) existentes en el área y que se emplazan en zonas de regular pendiente, sobreyaciendo a la Unidad Hidrogeológica 1. Poseen mala selección, poco espesor y cantidades de finos matriciales en proporción no despreciable.

La heterogeneidad granulométrica y la presencia de finos en la matriz permiten estimar, para esta unidad, una permeabilidad media-baja. No presenta saturación y su importancia radica en que facilita la infiltración de una proporción importante de las precipitaciones.

5.1.3 Depósitos aluviales (Unidad Hidrogeológica 3)

Sobreyaciendo a las rocas fracturadas y alteradas de la Unidad hidrogeológica 1, se reconoce en la zona una cobertura de depósitos no consolidados, de origen aluvial, conformados esencialmente por gravas, ripios y arenas con escasos finos. Podrá advertirse en el mapa de la Figura 10, que la cobertura areal de estos sedimentos es baja, restringiéndose sólo al sector de menor cota, en el tramo distal de la subcuenca.

De acuerdo a la granulometría que los caracteriza, se puede asumir una permeabilidad media-alta para estos rellenos, pero por su baja cobertura, modesto espesor y por ubicarse lejos del predio hacia aguas abajo, tiene nula importancia hidrogeológica para este estudio.

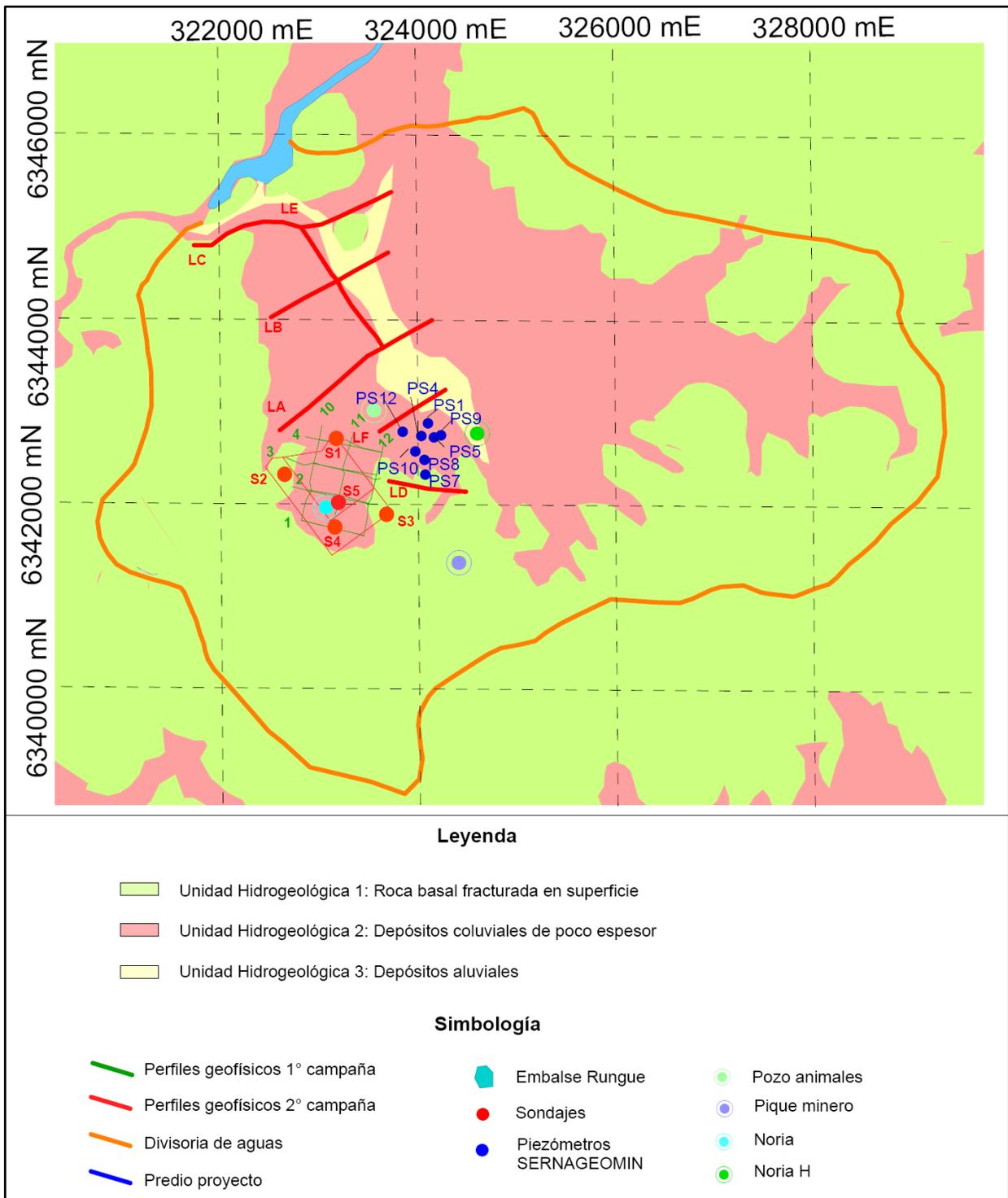


Figura 10.- Mapa hidrogeológico. Sistema de coordenadas UTM WGS84, huso 19 Sur.

5.2 Constantes hidráulicas

Para determinar la transmisividad (T, capacidad de transmitir agua) del acuífero, se realizaron tres pruebas de bombeo que fueron ejecutadas por la empresa Quinta Ingeniería y Construcción Ltda. Estos ensayos se practicaron en una noria, un sondaje y un antiguo pique minero.

Es importante indicar que durante el desarrollo de este estudio se construyeron dos pozos susceptibles de ser bombeados, el sondaje S1 y el sondaje S4, sin embargo, sólo fue posible intentar un ensayo en el pozo S4 ya que en el otro, debido a la nula productividad de la obra, no fue posible practicar bombeo alguno.

Una prueba de bombeo consiste en bombear un pozo y medir el descenso de nivel en una o más captaciones de observación. Existen dos grandes grupos de pruebas de bombeo: gasto variable -que sirve para determinar la capacidad de producción del pozo y la posición de la bomba dentro del sondaje y tienen una duración de 12 a 24 horas- y gasto constante -utilizada para determinar las propiedades elásticas o hidrogeológicas del acuífero y tienen una duración mínima de 24 horas, o bien, el tiempo hasta el cual se haya conseguido la estabilización de los niveles de a lo menos 6 horas.

Las características de las obras donde se practicaron los ensayos se resumen en la Tabla 5 que a continuación se adjunta.

Tabla 5.- Características de las obras donde se hicieron los ensayos de bombeo.

Tipo de captación	Ubicación (WGS84 19S)		Profundidad (m)	Nivel estático promedio (m)	Cota (m s.n.m.)	Diámetro (m)
	Este	Norte				
Noria	323.026	6.341.889	6,5	1,39	756	1,2
Pique minero	324.381	6.341.335	30	16,75	759	2
Sondaje 4	323.092	6.341.693	30	9,10	765	0,152

Para obtener los parámetros hidráulicos existen varios métodos de interpretación de los datos. El método utilizado para la prueba de bombeo en la Noria y el Pique minero es el de Papadopulous – Cooper, ya que estos pozos poseen gran diámetro.

Este método consiste en sobreponer la curva de campo a curvas tipo y elegir aquella curva tipo que mejor se ajuste con la de campo. Luego, se elige un punto arbitrario A en la parte en que ambas curvas se traslapan y a partir de éste se determinan los valores de $F(u_w, \alpha)$, $1/u_w$, s_w y t . Finalmente, se determinan los valores de transmisividad (T) y almacenamiento (S) sustituyendo los valores determinados anteriormente en las siguientes fórmulas:

$$T = \frac{Q}{4 \pi s_w} F(u_w, \alpha) \quad S = \frac{4 T t u_w}{r_w^2} \quad \alpha = \frac{S r_w^2}{r_c^2}$$

donde T es la transmisividad del acuífero en $m^2/día$; Q es el caudal bombeado durante la prueba en $m^3/día$; r_w es el radio de la noria en el tramo ranurado (m); r_c es el radio de la noria en el tramo no ranurado (m); u_w parámetro adimensional; $F(u_w, \alpha)$ función del pozo adimensional; y α valor de la curva tipo seleccionada.

A continuación, se presenta una descripción de los ensayos de bombeo ejecutados y los resultados obtenidos. Los registros se adjuntan en el Anexo C.

5.2.1 Prueba de bombeo en la Noria

La prueba de bombeo en la Noria comenzó el día 25 de octubre de 2012 a las 15:05 horas y se prolongó por 4 horas y 15 minutos. Debido a su baja productividad sólo fue posible ensayar un caudal de 0,4 l/s. Para estos efectos se utilizó una bomba sumergible Acuaría 37-6 trifásica, de 400 V, con motor de 3 HP de potencia, que fue instalada a 6 m de profundidad.



Figura 11.- Registro fotográfico de la prueba de bombeo en la Noria.

Como se indicó, esta prueba se realizó con un caudal único de 0,4 l/s, iniciándose con un nivel de 1,39 m que no correspondía al nivel estático real debido a que la captación había sido utilizada el día anterior por sus dueños. Al final del ensayo, el nivel dinámico se ubicaba a 3,64 m de profundidad, con descensos del orden de 10 cm cada 10 minutos.

Una vez finalizado el bombeo, se controlaron las recuperaciones manualmente durante 20 horas y mediante un sensor de nivel durante 93 horas y 25 minutos. Al final de la recuperación el nivel estático se ubicaba a 0,95 m de profundidad.

Con los valores obtenidos de esta prueba de bombeo se determinó la transmisividad del acuífero. Para ello se procedió a trabajar los datos mediante el método de Papadopoulos-Cooper ya que, como se indicó anteriormente, éste permite calcular el parámetro señalado en pozos de gran diámetro.

En la Figura 12 se presenta el conjunto de curvas propias del método y la curva resultante de los datos obtenidos en la Noria. La transmisividad determinada fue de $9 m^2/día$ lo que coincide con la muy baja potencialidad de la captación. En este caso, se espera que el parámetro hidrogeológico señalado debiera fluctuar entre 8 y $15 m^2/día$ en los entornos de la captación.

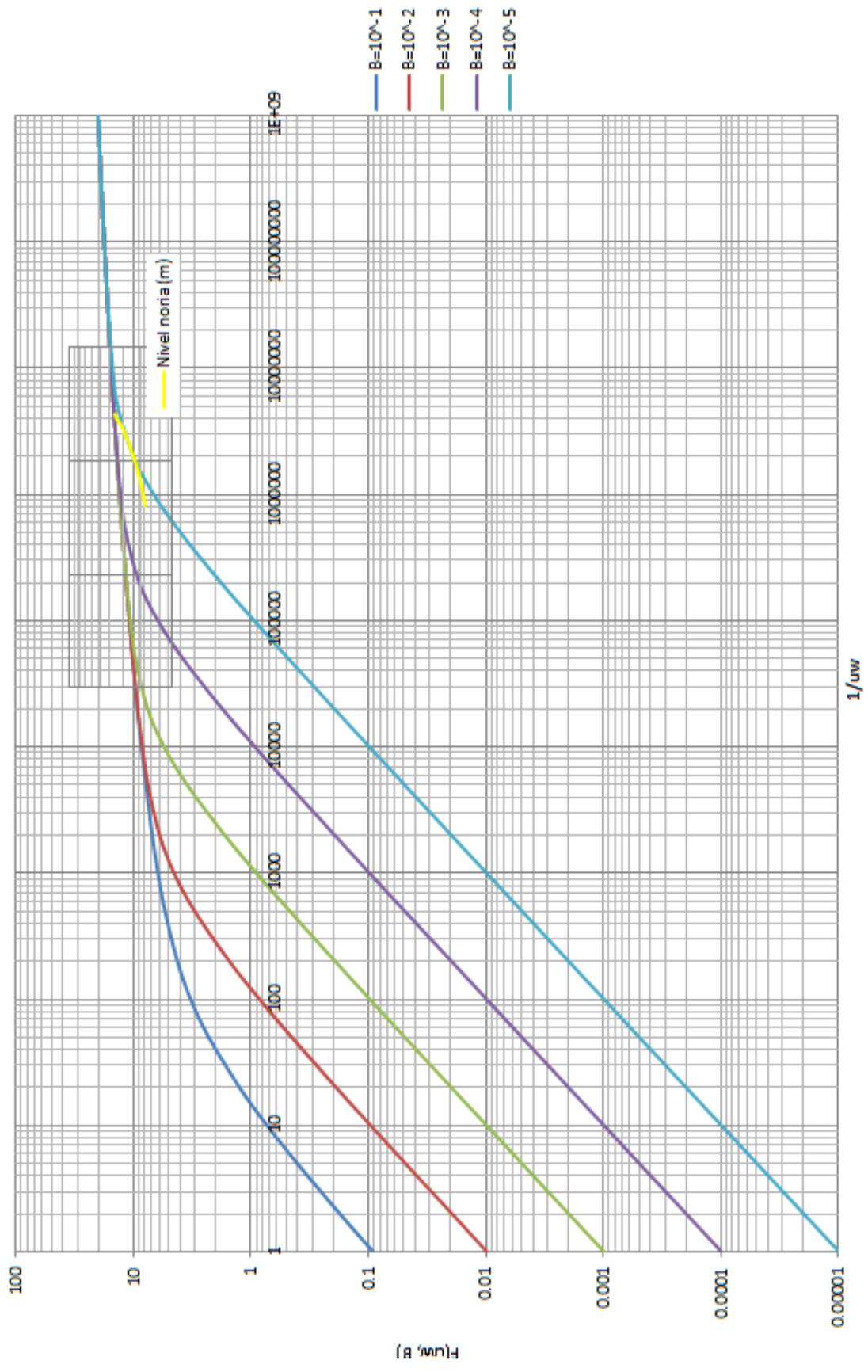


Figura 12.- Familia de curvas Papadopoulos-Cooper y Curva Nivel dinámico Noria v/s tiempo.

5.2.2 Prueba de bombeo en el Pique minero

En la prueba de bombeo practicada en el Pique minero se utilizó la misma bomba que en la prueba de bombeo en la Noria, la que fue instalada a 28,5 metros de profundidad.

En este caso se ejecutó una prueba de gasto variable durante la cual se bombearon los siguientes caudales: 0,2 l/s; 0,4 l/s; 0,5 l/s y 1,3 l/s. Dichos gastos se mantuvieron durante 660, 780, 240 y 1.480 minutos respectivamente, alcanzándose niveles dinámicos a las siguientes profundidades: 17,28 m; 18,35 m; 18,51 m y 23,71 m. Estos caudales se aplicaron de forma ascendente comenzando el día 27 de octubre de 2012 a las 9:10 horas con un nivel estático de 16,75 m.



Figura 13.- Registro fotográfico de la prueba de bombeo en el Pique minero.

Al finalizar la prueba, se detuvo la bomba y se tomaron recuperaciones de forma manual durante 3 horas y con un sensor de nivel las siguientes 184 horas. Al final de este control, el nivel había alcanzado el nivel estático inicial, vale decir, los 16,75 m de profundidad.

Es muy importante señalar que la obra en comento es utilizada habitualmente para extracción de agua mediante camiones aljibe, de forma que el nivel que exhibe no representa la condición de equilibrio en el largo plazo. La baja permeabilidad del medio lítico fracturado y alterado obligaría a largos períodos sin extracción para que el nivel gradualmente alcanzase su punto de equilibrio.

Con los antecedentes obtenidos en este extenso ensayo de bombeo se determinaron, mediante el método de Papadopoulos-Cooper (ver Figura 14) los valores de transmisividad que muestra la Tabla 6 que más adelante se adjunta. Podrá advertirse en ella que los valores son muy similares y extraordinariamente bajos, lo que resulta coincidente con aquellos calculados para el área de la Noria.

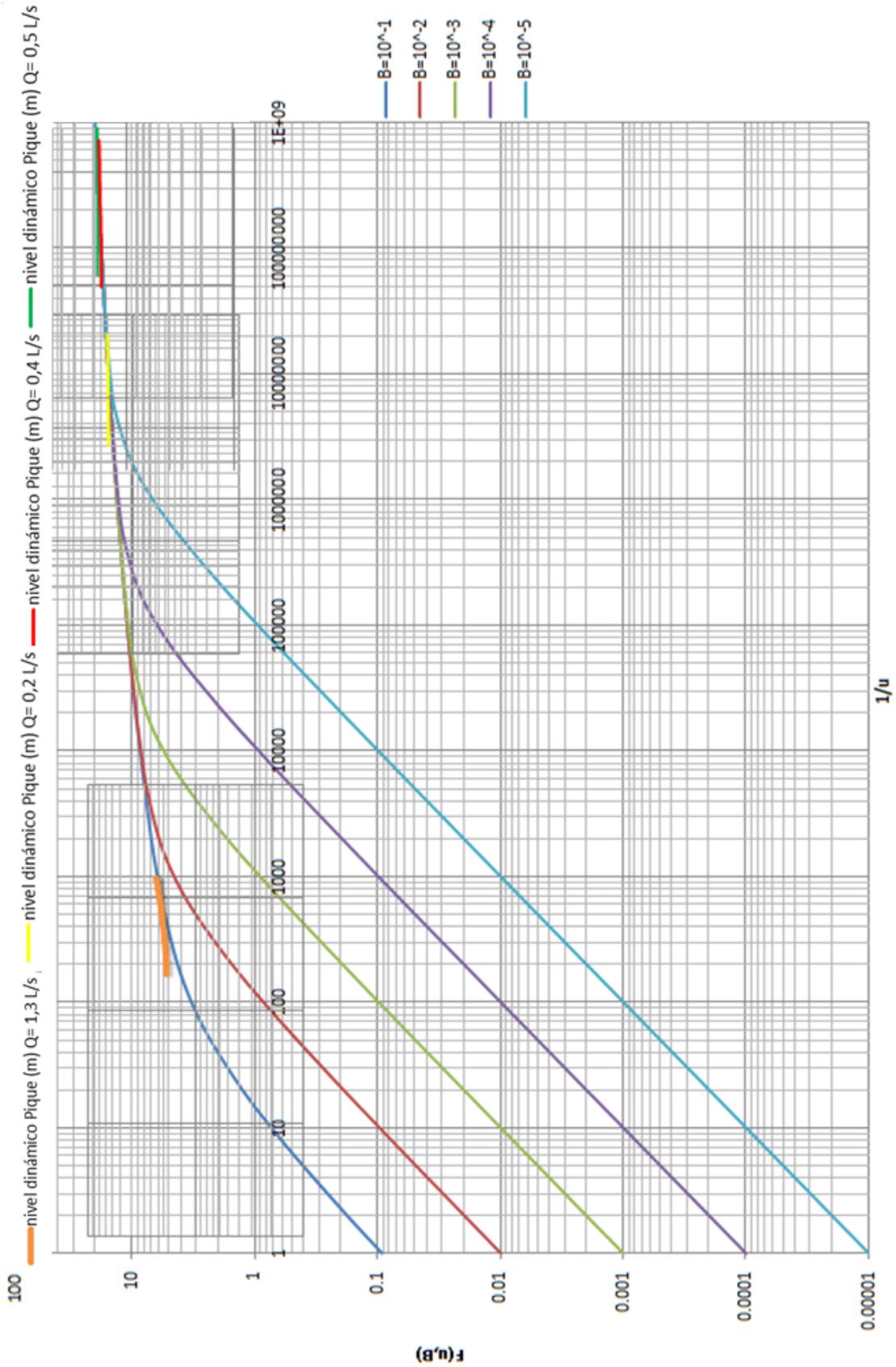


Figura 14.- Familia de curvas Papadopoulos-Cooper y Curva Nivel dinámico Pique v/s tiempo para distintos caudales.

Tabla 6.- Caudales y transmisividades determinadas en el Pique minero.

Caudal (l/s)	Transmisividad (m ² /día)
0,2	2,45
0,4	2,97
0,5	3,62
1,3	2,56

Es importante advertir que no fue posible determinar la geometría de la obra captante (en este caso el Pique minero) lo que otorga cierto grado de incertidumbre a los resultados obtenidos. Sin desmedro de lo indicado, es un hecho de que los valores de transmisividad definidos representan muy bien la baja potencialidad hidrogeológica que caracteriza al acuífero de la subcuenca.

5.2.3 Prueba de bombeo Sondaje S4

En la prueba de bombeo del Sondaje S4 se utilizó una bomba HP Grundfos SQ7-40 con motor B/B P1035, la cual fue instalada a 27,83 m de profundidad.

Esta prueba se llevó a cabo el día 11 de marzo del 2013, tuvo una duración de tan sólo 2 horas y 10 minutos y el caudal bombeado fue de 0,2 l/s. El nivel estático al inicio se encontraba a 9,10 m y al finalizar el ensayo se emplazaba a 27,67 m de profundidad. Fue precisamente esto último lo que obligó a detener el bombeo e iniciar la toma de recuperaciones. A las 16 horas de recuperación el nivel había ascendido 2,66 m.



Figura 15.- Registro fotográfico de la prueba de bombeo en el Sondaje S4.

Dada a la escasez de datos obtenidos en este ensayo, no es posible aplicar los métodos habituales de interpretación. Sólo se puede aseverar, con total certeza, que el medio lítico donde se emplaza el pozo, tiene una permeabilidad extremadamente baja.

5.3 Superficie equipotencial, direcciones y velocidad del flujo subterráneo

Durante el desarrollo de este estudio se realizaron un total de 15 corridas de niveles, para lo cual se utilizaron las captaciones existentes más aquellas construidas durante el período. La Tabla 7 muestra los resultados de cada una de ellas.

Tabla 7.- Niveles estáticos medidos.
En color naranja: niveles alterados ya sea por bombeo, labores de perforación, etc.

Captación	Nivel estático (m)														
	29-nov	06-dic	19-dic	15-ene	06-feb	19-feb	15-abr	09-may	09-may	14-may	20-may	28-may	03-jun	11-jun	19-jun
Noria	3,98	4,1	2,35	4,39	3,63		3,26	3,34		3,34			1,26	1,6	1,74
Pozo animales	7,3	7,3	7,35	7,49	7,53		7,78	7,91		7,87			7,97	7,97	7,98
Pique minero	21,2	22,5	23,75	24,8	28,3		27,8	26,4		25,47			25,65	25,15	24,87
Sondaje S1					28,26		23,69	22,36	28,92	28,57	28,47	>30	25,23	24,72	24,24
Sondaje S2				8,58	9,17		10,66	10,84	14,5	14,12	14,21		11,72	12,44	12,75
Sondaje S3				12,67	13,15		14,06	14,14		14,16	14,29	21,82	14,64	14,55	14,56
Sondaje S4					8,77		9,18	8,91	29,35	18,73	13,35	12,75	10,57	9,64	9,21
Sondaje S5												14,28	12,23	12,13	12,13
Piezómetro 1						9,23	9,58								10
Piezómetro 4						6,28	6,64								6,32
Piezómetro 5						8,87	9,18								9,44
Piezómetro 7						10,45	10,98								11,5
Piezómetro 8						5,51	5,62								5,84
Piezómetro 9						7,52	7,88								8
Piezómetro 10						4,21	4,7								4,54
Piezómetro 12						12,32	12,88								15,1
Noria H						12,64	-								12,38

Las figuras 16 y 17 **Figura 17** ilustran las variaciones de nivel freático de las distintas captaciones, observándose que los fuertes cambios de nivel se deben a extracciones de agua, no representando, por tanto, las condiciones de equilibrio del sistema.

Ejemplo de ello es el caso del Pique minero, en donde a causa de la explotación a la que es sometido, los niveles se muestran alterados. En efecto, en varias oportunidades se advirtió la presencia de camiones aljibe extrayendo agua subterránea de la obra. Estos niveles no se alcanzan a recuperar entre un proceso extractivo y el siguiente debido a la baja permeabilidad del medio. Tal vez el caso más extremo corresponda al del sondaje S4, que, luego de extraerse un bajísimo caudal (0,2 l/s), demoró varios días para sólo aproximarse al valor original.

Así la única captación que sí refleja condiciones de equilibrio, con una leve tendencia al descenso, es el Pozo de los animales.

En el caso puntual del control realizado el día 3 de junio, los resultados acusan un ascenso en todas las captaciones. Esta situación tendría su origen en las intensas precipitaciones acaecidas en la zona el día 31 de mayo del presente año.

Basándose en la medición realizada el 19 de junio de 2013, se procedió a definir la superficie equipotencial del área mediante la interpolación de datos en el programa MapInfo Professional 10.0. Los resultados se muestran en la Figura 18 en la cual se indican las direcciones de escurrimiento del flujo subterráneo.

En virtud de que los niveles medidos no corresponden a los representativos de un estado de equilibrio de largo plazo, se ha trazado tentativamente una superficie equipotencial aproximada que representaría dichas condiciones de equilibrio. Ésta, define un flujo subterráneo hacia el nororiente en la zona del predio, cuya dirección cambia a noroeste en el tramo distal de la subcuenca, para tributar finalmente al sector del embalse Rungue (cf. Figura 19).

Haciendo uso de los datos obtenidos en la última medición de niveles, se estructuraron los perfiles hidrogeológicos que se adjuntan en el Anexo E. Dichos perfiles, se trazaron entre los sondeos construidos, cubriendo la totalidad de la superficie del predio donde se emplazaría el proyecto. En ellos, se desea mostrar las zonas donde la profundidad del nivel freático es menor a 10 m. Este valor se determina en función a 2 parámetros.

El primero de ellos, se encuentra definido en el Decreto de Salud n°148 Sobre Manejo de Residuos Peligroso (2004) cuyo artículo 56 señala que el fondo del relleno de seguridad debe estar ubicado por sobre 3 metros del nivel freático más alto.

El segundo, se determinó a partir del diseño de la obra donde se considera que se excavarán, a los más, 6 metros bajo la cota de terreno en algunas zonas. Por lo tanto, al sumar estos 2 valores, la profundidad de nivel freático que se considerará como conflictiva es cuando este valor es menor a 10 metros.

En consecuencia, se tendrían inconvenientes en la zona sur del predio, cercana al sondeo S4.

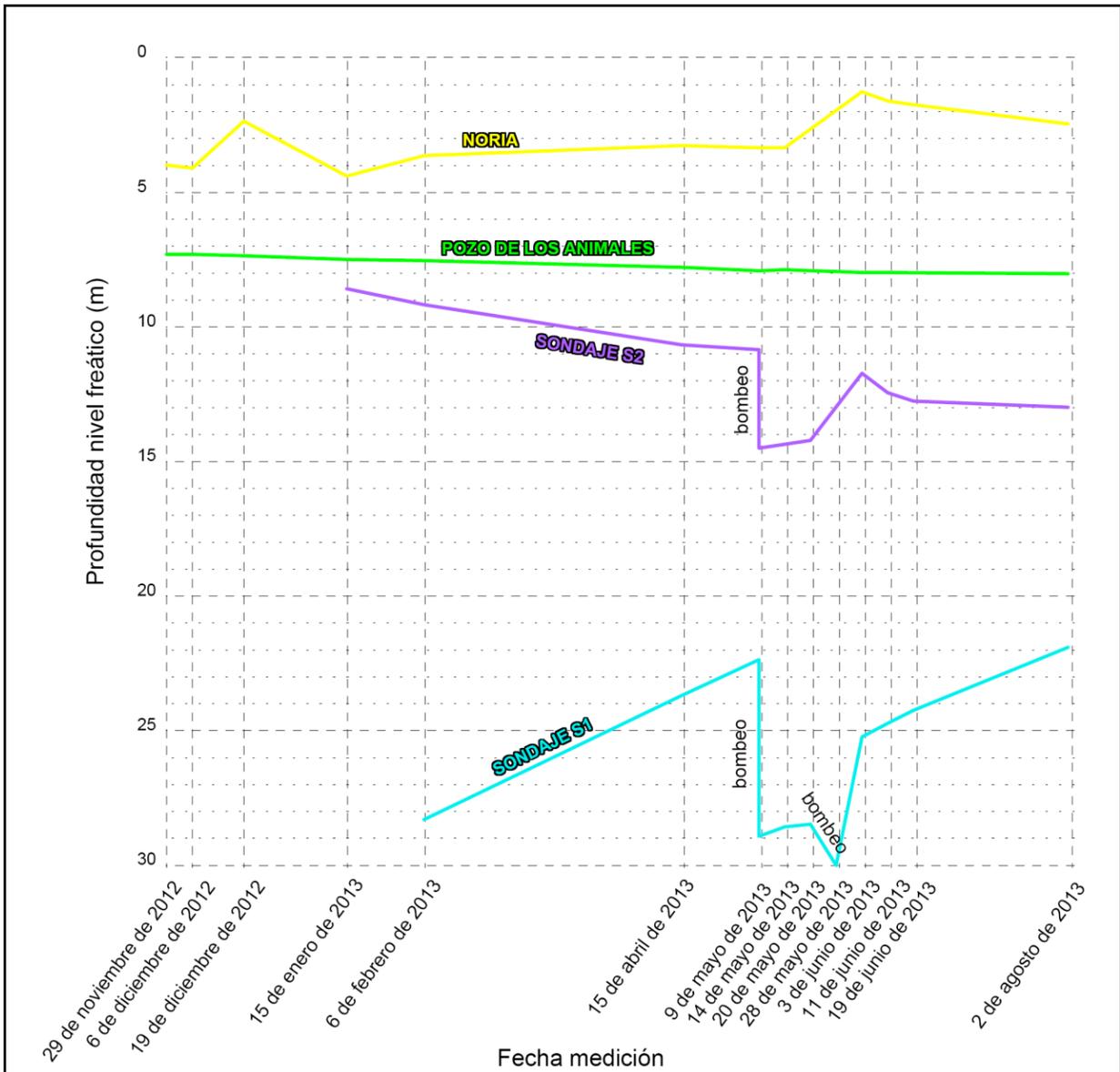


Figura 16.- Variaciones de nivel freático en la Noria, el Pozo de los animales y en los sondajes S1 y S2.

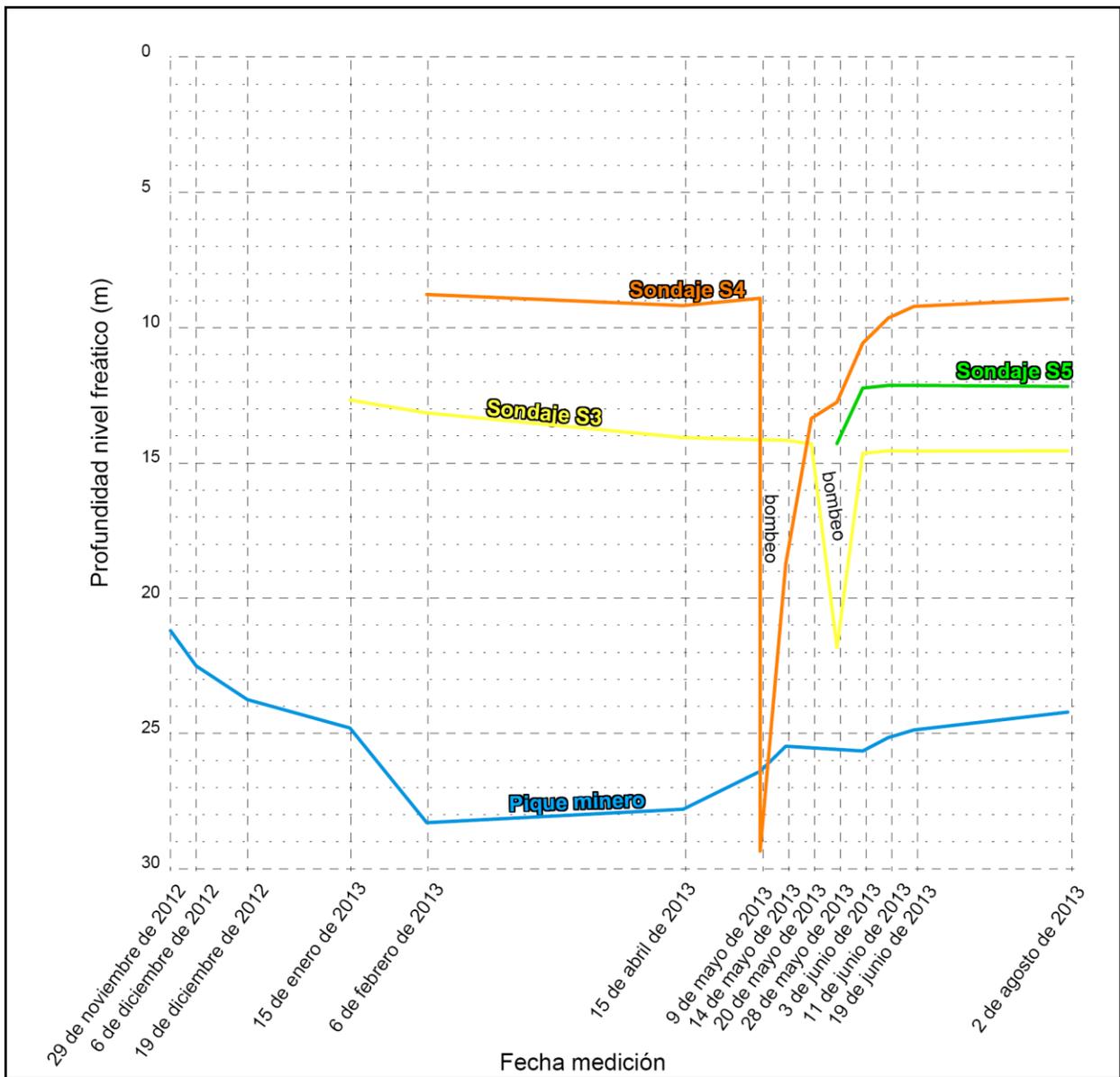


Figura 17.- Variaciones de nivel freático en el Pique minero y en los sondajes S3, S4 y S5.

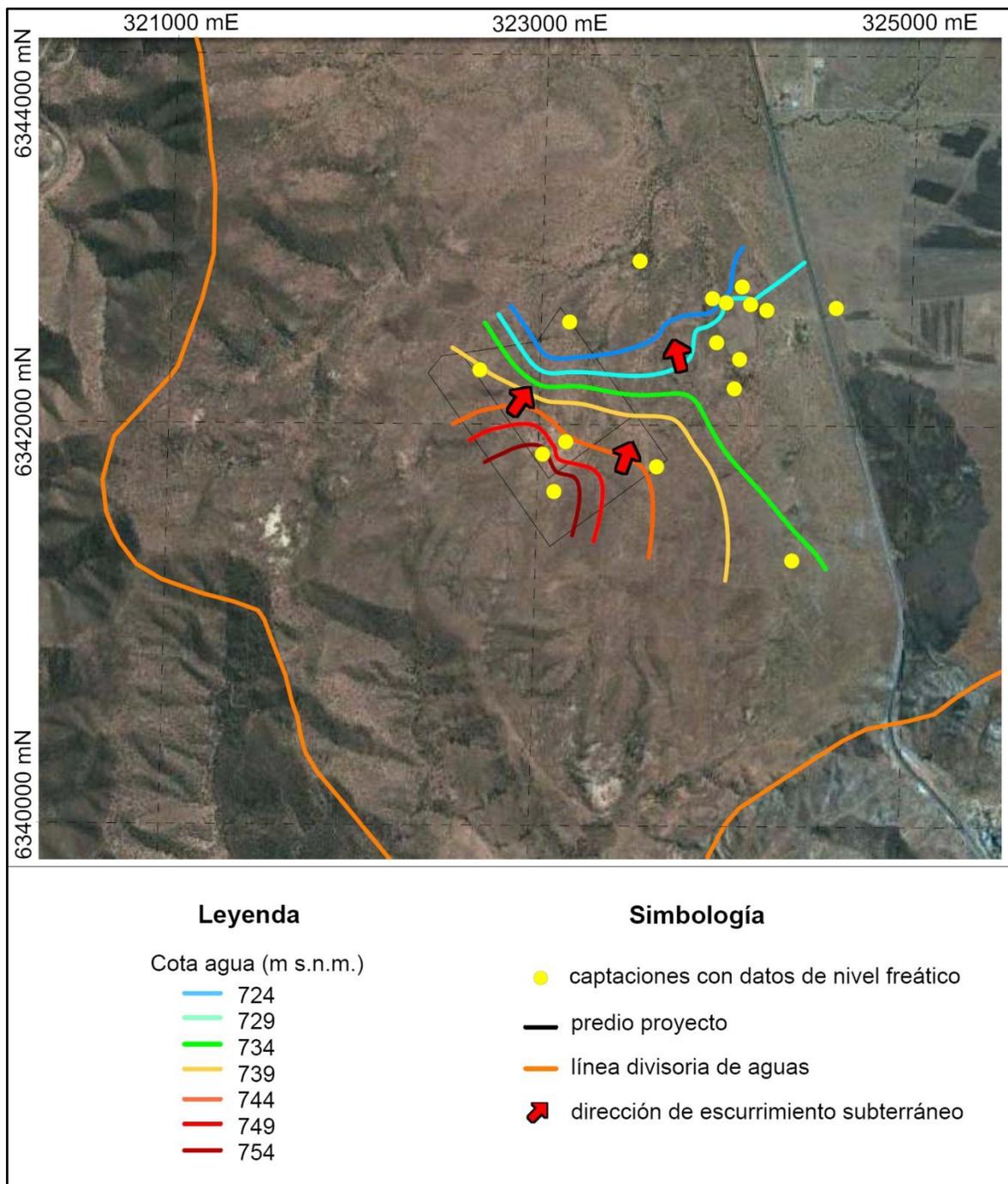


Figura 18.- Mapa local de la superficie equipotencial con datos medidos el día 19 de junio de 2013. Sistema de coordenadas UTM WGS84, huso 19 Sur.

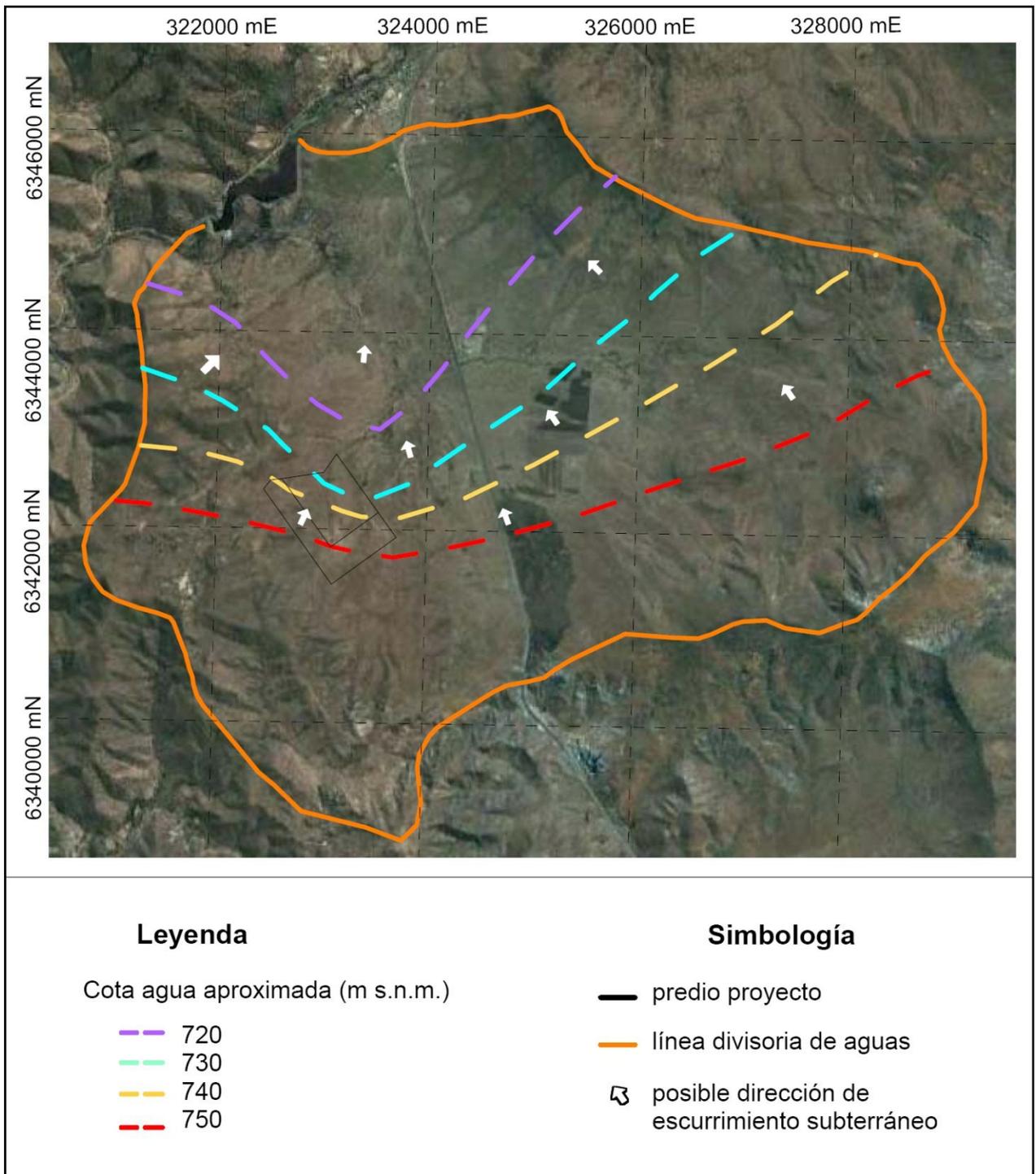


Figura 19.- Mapa inferido de la superficie equipotencial y posibles direcciones de flujo. Sistema de coordenadas UTM WGS84, huso 19 Sur.

Apoyándose en los datos de transmisividad determinados para el sistema subterráneo, se procedió a calcular la velocidad del flujo subterráneo en este medio lítico fracturado de baja permeabilidad. Para estos efectos se utilizó una derivación directa de la Ley de Darcy cuya expresión es la siguiente:

$$V = K * i$$

siendo i el gradiente hidráulico de la superficie equipotencial (adimensional) y K el coeficiente de permeabilidad de Darcy, que tiene la dimensión de una velocidad y es propio de cada medio permeable. Este último parámetro (K) se obtiene a partir de las transmisividades determinadas y los espesores saturados de acuífero.

Considerando la ubicación y cotas (de terreno y de nivel estático) de las distintas captaciones, se procedió a calcular los gradientes hidráulicos existentes entre ellas. A modo de ejemplo, se puede aseverar que entre el sondaje S5 y S1 éste alcanza a 4,1% y que entre los piezómetros PS10 y PS12 el valor es de 3,5%.

Ahora bien, estos gradientes definidos en el área del proyecto son posiblemente bastante mayores a los existentes en el sector medio y bajo de la subcuenca. Es debido a esto que para calcular la velocidad de escurrimiento del agua subterránea, se optó por el gradiente definido entre el sondaje S4 y el Pozo de los animales que alcanza a 2,3%.

Por su parte, la transmisividad utilizada en este caso fue la determinada en la prueba de bombeo practicada en la Noria, alcanzando un valor de 9 m²/día de forma que, suponiendo un espesor saturado de 20 m, se tiene una permeabilidad de 0,45 m/día.

Considerando los valores indicados, se determina una velocidad de 1,03 cm/día, lo que equivale a 3,77 metros al año. Estos valores no corresponden a la velocidad real, ya que para calcular esta última se requiere conocer el valor de la porosidad eficaz. Este parámetro, por las características del medio, se estimó en 28%, de manera que la velocidad real alcanza a 3,67 cm/día o lo que es igual a 13,46 m/año.

De esta forma, para que el flujo subterráneo cubra la distancia entre el sector del proyecto y el área del tranque Rungue, se requeriría un tiempo de aproximadamente 300 años.

5.4 Volumen embalsado

Para estimar el volumen de agua subterránea embalsada en la subcuenca se consideró el área emplazada bajo los 750 m s.n.m. (cf. Figura 9) y un espesor saturado de 20 m. Este último valor se fijó en el entendido de que a mayores profundidades las permeabilidades son aún menores a las ya muy bajas que caracterizan a los 20 m superiores.

En relación al coeficiente de almacenamiento, es importante indicar que la baja permeabilidad del acuífero hizo imposible contar con puntos de control del nivel durante la ejecución de las pruebas de bombeo. Es debido a esto que el valor de dicho parámetro se supuso entre 1% y 3%, considerando que el sistema subterráneo es de tipo freático. La Tabla 8 muestra los valores determinados.

Tabla 8.- Volumen embalsado de agua subterránea.

Espesor saturado (m)	Área cuenca bajo los 750 m s.n.m. (km ²)	Volumen saturado (m ³)	Volumen embalsado (m ³)	
			S = 1%	S = 3%
20	16,5	330.000.000	3.300.000	9.900.000

Ahora bien, si estos valores se expresan como caudal continuo para 50 años, se obtienen valores de 2 l/s y 6 l/s para los coeficientes de almacenamiento de 1% y de 3%, respectivamente. Además, si se toma un valor de almacenamiento intermedio de 6 millones de m³ y se expresa éste como caudal continuo para 10 años, el valor es de 19 l/s. Todos estos valores permiten apreciar lo exiguo del recurso.

5.5 Caracterización química

El objetivo de esta caracterización química es obtener antecedentes hidroquímicos que aporten al modelo hidrogeológico información sobre la composición química de los iones mayoritarios y las propiedades físicas del agua subterránea.

Para ello, se realizaron 17 análisis químicos los cuales se llevaron a cabo en 4 campañas de muestreo con la siguiente cronología: primer muestreo el día 27 de septiembre de 2012; segundo muestreo el día 8 de noviembre de 2012; tercer muestreo el día 6 de enero de 2013; y cuarto muestreo el día 23 de abril de 2013.

En las tres primeras campañas se tomaron muestras en el Pozo de los animales (P1), la Noria (P2) y el Pique minero (P3). En la tercera campaña, además de las captaciones anteriormente mencionadas, se tomaron muestras en los 4 sondajes verticales (S1, S2, S3 y S4) descritos en el Anexo A. Los muestreos en estas campañas se ejecutaron según las indicaciones del Laboratorio Químico del DICTUC, obteniéndose 2 muestras en envases de vidrio; una de capacidad de 500 ml de tipo natural y otra de 250 ml estéril; y 2 muestras en envases de plástico; una de 2 lt natural y otra de 1 lt con NaOH.

Para la obtención de todas las muestras, se contó con un bailer de 1 ½’’ el cual, atado a una cuerda se introdujo por el pozo hasta alcanzar una profundidad bajo el nivel freático. Luego de esperar un par de minutos, tiempo suficiente para lograr llenar el instrumento, se subió la muestra y sin realizar ningún tipo de filtrado se vació el contenido en los envases anteriormente rotulados con el código de muestra, la fecha y la hora de muestreo. Esto se realizó varias veces por pozo hasta llenar las botellas de cada set. A continuación, se guardaron los envases en un cooler para mantenerlos refrigerados y se ató la cuerda a otro bailer para realizar el mismo procedimiento en otro pozo.

Las muestras fueron entregadas al laboratorio inmediatamente después de colectarse, donde luego se determinaron los cuatro cationes mayores, los cuatro aniones principales y todos los elementos consignados en la Norma Chilena de Riego (NCh 1.333/78). Los resultados

entregados por DICTUC y los elementos considerados en la norma señalada, se presentan en el Anexo F.

En la cuarta y última campaña se muestrearon 4 piezómetros: PS5; PS4; PS10; y PS8. Éstos se encuentran rodeando al tranque de residuos mineros pertenecientes a la empresa REFIMET, cuya actividad comenzó a principios de los 80' y desde la década de los 90' han estado sin actividad. El objetivo de esta última campaña es conocer el estado de contaminación de las aguas subterráneas en metales pesados causados, posiblemente, por el antiguo pasivo minero. Para ello se tomaron muestras en envases de medio litro con ácido nítrico, las cuales, al igual que las muestras de las campañas anteriores, fueron entregadas al Laboratorio Químico del DICTUC donde se determinaron los contenidos de arsénico, hierro, cadmio y plomo. Los resultados se muestran en el Anexo F.

5.5.1 Calidad análisis químico

Con los antecedentes de los análisis químicos de las tres primeras campañas, se estableció el balance aniónico-catiónico para verificar la calidad del análisis químico de elementos mayores. Para estos efectos se consideraron los cationes: calcio, magnesio, sodio y potasio; y los aniones: cloruro, sulfato, bicarbonato y nitrato.

La expresión utilizada para esta tarea fue la siguiente:

$$\% \text{ Balance Iónico} = \frac{\sum (\text{Cationes, meq/l}) - \sum (\text{Aniones, meq/l})}{\sum (\text{Cationes, meq/l}) + \sum (\text{Aniones, meq/l})} * 100$$

En la Tabla 9 se muestran los resultados de los balances para las diferentes muestras. Es importante señalar que, generalmente, se define como aceptable un análisis químico que arroja un porcentaje de 10% o menor. En el caso que nos ocupa, las muestras tomadas en la Noria en las campañas 1 y 3 son las únicas que exceden este valor y, por lo tanto, se tendrá sumo cuidado cuando se realicen interpretaciones con ellas.

Tabla 9.- Resultados del balance aniónico-catiónico (Pn=Captación; Cn=Campana).

Muestra	P1C1	P2C1	P3C1	P1C2	P2C2	P3C2	P1C3	P2C3	P3C3	S1C3	S2C3	S3C3	S4C3
Balance iónico (%)	6,65	11,68	3,09	7,49	6,47	3,96	6,19	14,43	4,57	7,77	10,29	7,07	9,03

5.5.2 Clasificación química del agua

Conforme a los resultados obtenidos en los análisis químicos, se estructuraron los diagramas de Piper para cada captación (figuras 20, 21, 22 y 23) mediante el programa Diagrammes 5.9.

Este tipo de diagramas se utilizan para mostrar la tendencia de los iones mayores. Representan tres componentes (aniones y/o cationes) en forma simultánea, pudiéndose realizar muchos análisis en un mismo gráfico.

Las aguas químicamente semejantes se encuentran agrupadas y, según su ubicación en el diagrama, se han determinado los tipos de agua de cada captación (Tabla 10).

Tabla 10.- Composición química de cada captación.

Tipo de captación	Tipo de agua
Pozo de los animales (P1)	Agua bicarbonatada cálcica
Noria (P2)	Agua bicarbonatada cálcica
Pique minero (P3)	Agua sulfatada cálcica
Sondaje 1 (S1)	Agua sulfatada sódica
Sondaje 2 (S2)	Agua bicarbonatada sódica
Sondaje 3 (S3)	Agua bicarbonatada sódica
Sondaje 4 (S4)	Agua bicarbonatada sódica

Diagrama de Piper Pozo Animales

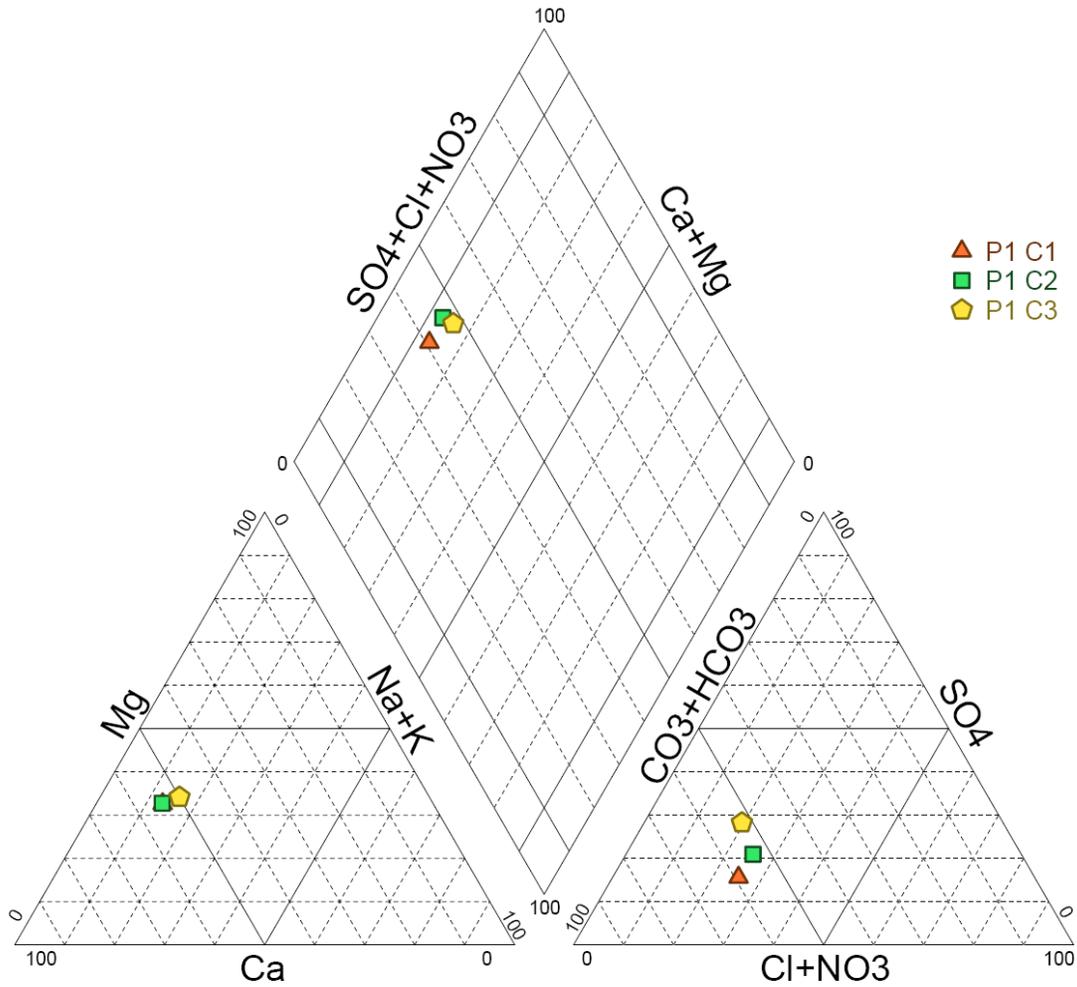


Figura 20.- Diagrama de Piper Pozo de los animales (P1).
 Notar que la ubicación de la muestra P1C1 coincide con la de P1C2 en el diagrama de cationes.

Diagrama de Piper Noria

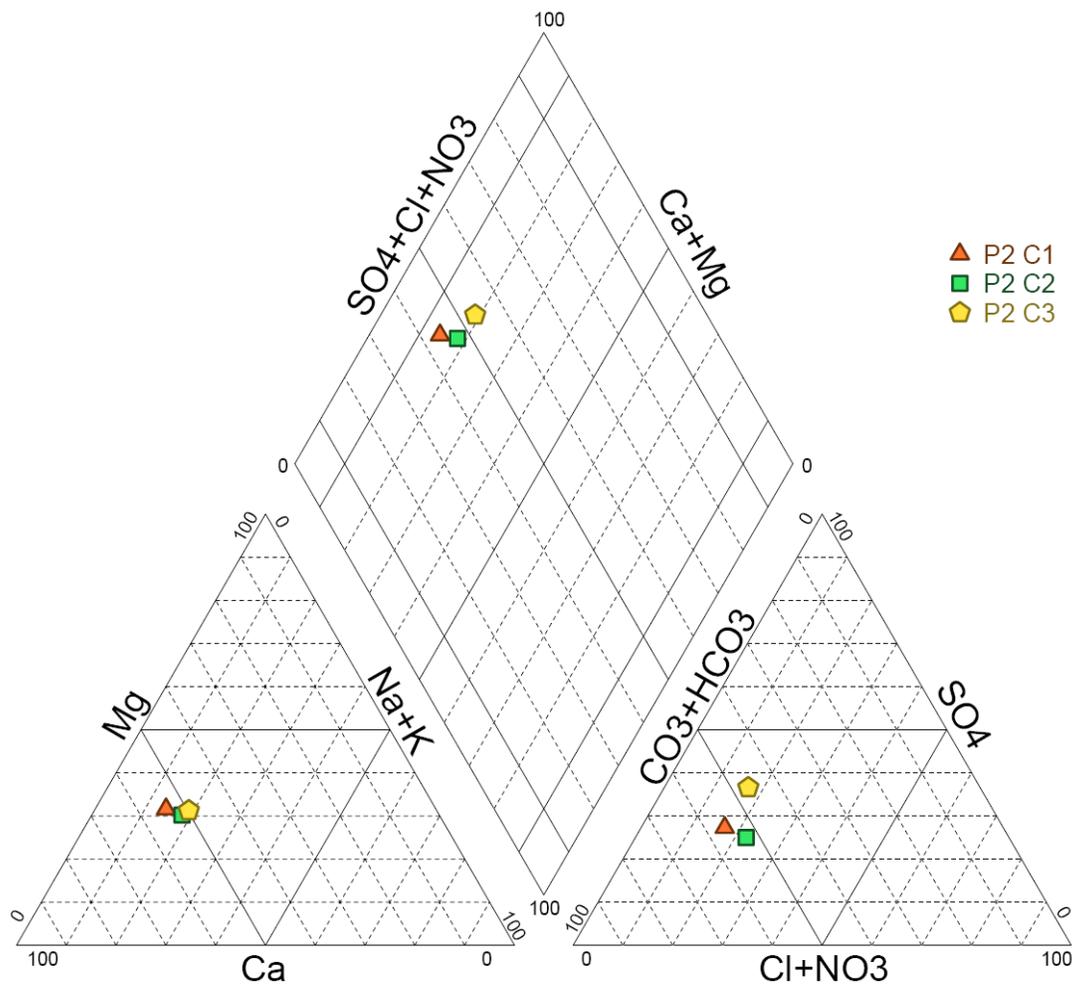


Figura 21.- Diagrama de Piper Noria (P2).

Diagrama de Piper Pique Minero

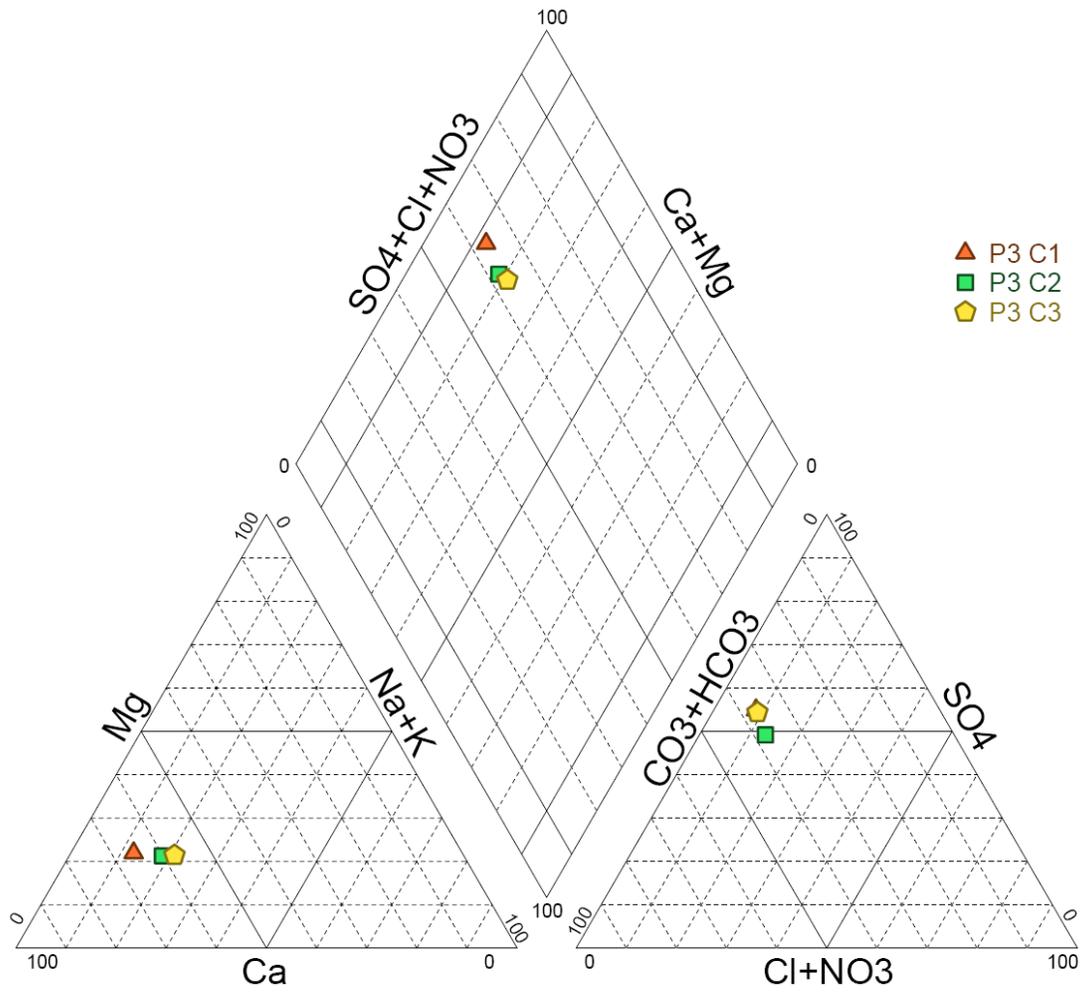


Figura 22.- Diagrama de Piper Pique minero (P3).
Notar que la ubicación de la muestra P3C1 coincide con la de P3C3 en el diagrama de aniones.

Diagrama de Piper Sondajes

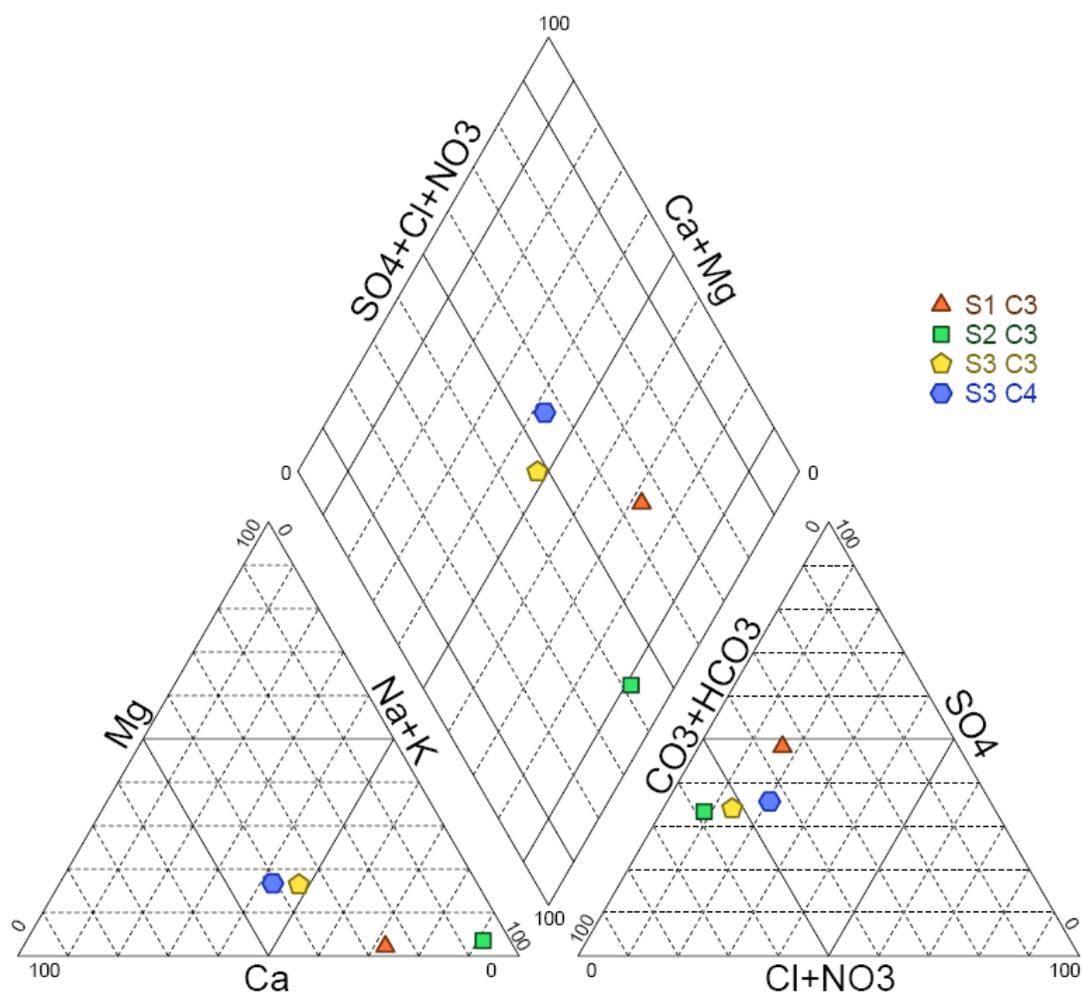


Figura 23.- Diagrama de Piper Sondajes S1, S2, S3 y S4.

Un sumario análisis de los diagramas de Piper permite señalar lo siguiente:

- las tres muestras tomadas en el Pozo de los animales (P1) y en la Noria (P2) resultan cálcicas bicarbonatadas;
- en el caso de las muestras del Pique minero (P3), éstas son claramente cálcicas pero del tipo sulfatado-bicarbonatadas. Es probable que esto tenga relación con las alteraciones de tipo hidrotermal que existen en las inmediaciones de esta captación;
- en los sondajes S1 y S2 el catión mayoritario claramente es el sodio, sin embargo, la muestra de S2 es bicarbonatada y la proveniente de S1 es de tipo sulfato-bicarbonatada;
- en el caso de los pozos S3 y S4 las muestras son sódico-cálcicas bicarbonatadas, sin embargo, aquella extraída del sondaje S4 muestra también una clara tendencia al aumento del anión sulfato;
- el hecho de que en los sondajes el catión mayoritario sea sodio y que en las captaciones antiguas (P1, P2 y P3) éste sea el calcio induce a pensar que, debido a la bajísima permeabilidad del medio, las muestras colectadas estén influenciadas por los aditivos de perforación.

Mediante el mismo programa utilizado para realizar los diagramas de Piper (Diagrammes 5.9), se estructuraron los diagramas de Stiff para cada muestra. Éstos sirven para representar los macroelementos separados en aniones y cationes. En él se indican las proporciones relativas entre los diferentes iones (hacia la derecha aniones y hacia la izquierda cationes) formando un polígono al unir los extremos y cuyo tamaño se refiere a la concentración de éstos. A diferencia del diagrama de Piper, permite ir observando esto muestra a muestra.

A continuación, se ilustra el Mapa de distribución de los diagramas de Stiff el cual fue realizado mediante el programa MapInfo Professional 10.0 (Figura 24).

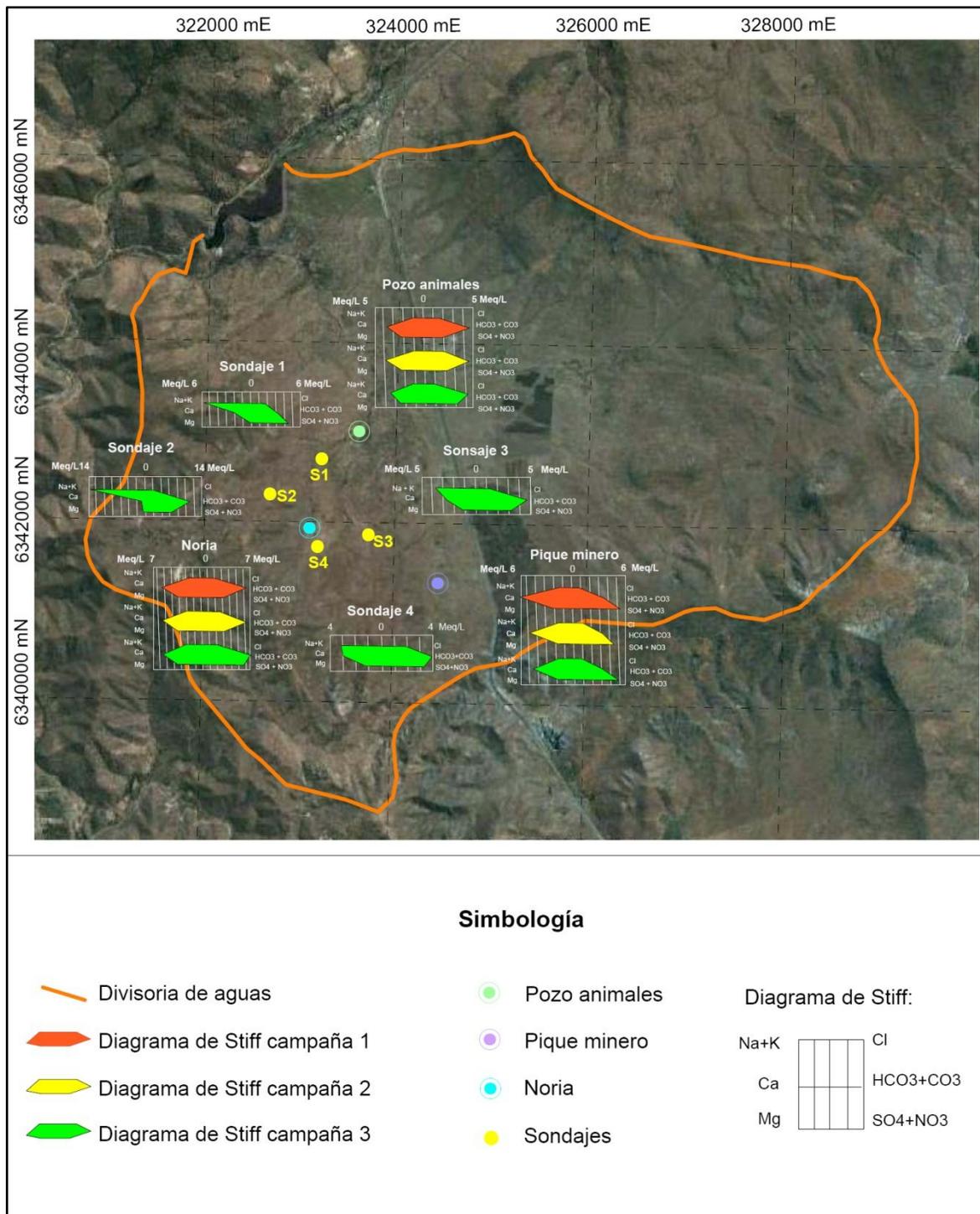


Figura 24.- Mapa de distribución de diagramas de Stiff. Sistema de coordenadas UTM WGS84, huso 19 Sur.

Un aspecto que debe considerarse en la caracterización hidroquímica es que las muestras extraídas de las captaciones antiguas (Pozo de los animales, Noria y Pique minero) son verdaderamente representativas del agua del acuífero. Esta aseveración se fundamenta en que desde dichas captaciones se extrae agua subterránea habitualmente lo que genera el posterior ingreso de agua desde el acuífero y así sucesivamente.

En el caso de las obras construidas durante este estudio (S1, S2, S3 y S4) todas son de bajísima productividad. De hecho los dos pozos de bombeo que se construyeron no fueron capaces de soportar caudales muy bajos, de manera que fue imposible la ejecución de los ensayos tradicionales para la determinación de las constantes elásticas del medio permeable. Como se señaló anteriormente, el pozo S4 ni siquiera fue capaz de entregar 0,2 l/s. Lo indicado implica que las muestras extraídas desde los pozos, debido a las muy lentas recuperaciones, pueden presentar aún influencia de los aditivos de perforación, representando deficientemente al acuífero donde se emplazan.

Los diagramas de Stiff que se presentan en la Figura 24 muestran una alta coincidencia entre las muestras tomadas en la Noria y en el Pozo de los animales y una buena similitud entre éstas y las tomadas en el Pique minero. Los diagramas de los otros pozos, en especial los correspondientes a los pozos S2 y S1, son distintos a los anteriores. Sólo a modo de ejemplo, en las captaciones antiguas el catión mayoritario es el calcio y en las nuevas el sodio.

En conformidad a lo señalado, se puede aseverar que las aguas subterráneas del sector son del tipo cálcicas bicarbonatadas con leve incremento del anión sulfato en sectores como los tipificados por el Pique minero.

5.5.3 Calidad química de las aguas subterráneas

A continuación, se procederá a analizar la calidad química de las aguas subterráneas según las dos normativas chilenas vigentes; la primera para Agua de Beber (NCh 409/1 Of.2005) y la segunda para Agua de Riego (NCh 1.333/78). Dichos análisis se realizarán a cada muestra y, según ellos, se definirán sus posibles usos.

5.5.3.1 Agua Potable

En la Tabla 11, que se muestra a continuación, se resumen los parámetros que sobrepasan el valor máximo permitido en la Norma Chilena 409/1 Of. 2005 para Agua de Beber en cada muestra. Es importante destacar que los análisis en las tres primeras campañas, al realizarse según la Norma Chilena NCh 1.333/78 para Riego, no incluyen los parámetros amoníaco, detergentes, estroncio, fenoles y nitritos. Para las muestras tomadas en la cuarta campaña sólo se comparan los valores de arsénico, hierro, cadmio y plomo.

Tabla 11.- Parámetros que exceden la Norma Chilena de Agua Potable NCh 409/1 en cada muestra.

Captación	Código de muestra	Parámetros	Valor medido	Máximo permitido NCh 409/1
Pozo de los animales	P1 C1	Nitrato (mg/L)	30,4	10
		Nitrato (mg/L)	19,8	10
		Nitrato (mg/L)	51,2	10
Noria	P2 C2	Manganeso (mg/L)	0,45	0,10
	P2 C3	Manganeso (mg/L)	2	0,10
		Nitrato (mg/L)	23,2	10
		Sulfatos (mg/L)	257,4	250
Pique minero	P3 C1	Manganeso (mg/L)	0,12	0,10
		Nitrato (mg/L)	11	10
		Sulfatos (mg/L)	252,1	250
	P3 C2	Manganeso (mg/L)	0,11	0,10
	P3 C3	Manganeso (mg/L)	0,44	0,10
Sondaje 1	S1 C3	Manganeso (mg/L)	0,19	0,10
		Plomo (mg/L)	0,424	0,05
Sondaje 2	S2 C3	Hierro (mg/L)	0,48	0,3
		Sulfatos (mg/L)	299,1	250
Sondaje 3	S3 C3	Hierro (mg/L)	0,66	0,3
		Manganeso (mg/L)	4,22	0,10
Sondaje 4	S4 C3	Manganeso (mg/L)	0,28	0,10
Piezómetro 5	PS5	Hierro (mg/L)	19	0,3
Piezómetro 4	PS4	Arsénico (mg/L)	0,055	0,05
		Hierro (mg/L)	38,7	0,3
Piezómetro 10	PS10	Hierro (mg/L)	155,4	0,3
		Plomo (mg/L)	0,188	0,05
Piezómetro 8	PS8	Arsénico (mg/L)	4,911	0,05
		Hierro (mg/L)	91,6	0,3
		Cadmio (mg/L)	0,113	0,01
		Plomo (mg/L)	0,155	0,05

Lo primero que se puede notar es que en la Noria (P2) y en el Pique minero (P3) los parámetros que exceden dicha norma son los mismos, o sea, manganeso, sulfatos y nitrato. Este último también se encuentra con valores sobre la norma en el Pozo de los animales (P1).

Los parámetros que sobrepasan esta normativa en el sondaje S1 son el plomo y el manganeso. Este último también sobrepasa la norma en el sondaje S4 y en el sondaje S3, donde además se excede el valor del hierro. En el sondaje S2 se supera el límite permitido de hierro y de sulfatos.

En los cuatro piezómetros muestreados se observa que el hierro supera los valores límites definidos en la norma NCh 409/1. Más aún, en los piezómetros PS8 y PS10 éste se supera considerablemente. El arsénico se encuentra en altas concentraciones en las muestras PS4 y PS8, siendo en este último, superior a 9.000 veces el valor permitido. El plomo también presenta valores por sobre la norma en los piezómetros PS10 y PS8, triplicando el valores permitido. El cadmio solo supera el valor máximo en el piezómetro PS8.

A modo de resumen, se puede decir que en todas las captaciones existe al menos un parámetro que supera el valor máximo permitido por la Norma Chilena de Agua Potable, lo cual permite afirmar que las aguas subterráneas del acuífero no son aptas para el consumo humano.

5.5.3.2 Agua de Riego

Como se mencionó anteriormente, en las tres primeras campañas de muestreo se realizaron los análisis químicos según la Norma Chilena de Riego NCh 1.333/78 (Anexo F). Los parámetros de cada muestra que sobrepasan el valor máximo permitido en dicha norma se presentan en la Tabla 12 que a continuación se adjunta. En ella, además, se incluyen los parámetros analizados en la cuarta campaña (arsénico, hierro, cadmio y plomo) que superen dichos límites.

A modo de ejemplo, los antecedentes del Pique minero indican que el manganeso, el boro y sulfato se encuentran en concentraciones que transgreden la normativa. De igual manera, en la Noria, específicamente en la tercera campaña de toma de muestras, molibdeno, manganeso, sulfatos y coliformes fecales arrojan valores sobre dicha norma. Cabe destacar que estos datos pueden no estar del todo correctos ya que, como se indicó anteriormente, el error de balance iónico en la muestras P2C3 es mayor al 10% permitido. En los pozos S3 y S4 también existe un exceso de manganeso y en todos los sondajes (S1, S2, S3 y S4) el sodio está en concentraciones superiores a lo establecido en la norma.

En el caso del análisis químico realizado en los piezómetros, se puede observar que en todas las muestras el hierro supera los valores máximos permitidos en la Norma Chilena de Riego. De hecho, en el caso de los piezómetros PS10 y PS8 dichos valores superan enormemente el límite máximo permitido. En el piezómetro PS8 existen además excesos en los valores de cadmio y arsénico. Este último sobrepasa el valor permitido en más de un 4.000%.

Según esto, las aguas subterráneas del acuífero no son aptas para riego, a excepción del Pozo de los animales, el cual presenta valores aceptables según la normativa.

Tabla 12.- Parámetros que exceden la Norma Chilena de Riego NCh 1.333/78 en cada muestra.

Captación	Código de muestra	Parámetros	Valor medido	Máximo permitido NCh 1.333
Noria	P2 C2	Sulfatos (mg/L)	252,1	250
	P2 C3	Manganeso (mg/L)	2	0,2
		Molibdeno (mg/L)	0,05	0,01
		Sulfatos (mg/L)	257,4	250
		Coliformes fecales (NMP/100ml)	23000	1000
Pique minero	P3 C1	Sulfatos (mg/L)	252,1	250
	P3 C2	Boro (mg/L)	2,66	0,75
	P3 C3	Boro (mg/L)	2,66	0,75
		Manganeso (mg/L)	0,44	0,2
Sondaje 1	S1 C3	Sodio Porcentual (%)	72	35
Sondaje 2	S2 C3	Sodio Porcentual (%)	90	35
		Sulfatos (mg/L)	299,1	250
Sondaje 3	S3 C3	Manganeso (mg/L)	4,22	0,2
		Sodio Porcentual (%)	47,1	35
Sondaje 4	S4 C3	Manganeso (mg/L)	0,28	0,2
		Sodio Porcentual (%)	42,3	35
Piezómetro 5	PS5	Hierro (mg/L)	19	5
Piezómetro 4	PS4	Hierro (mg/L)	38,7	5
Piezómetro 10	PS10	Hierro (mg/L)	155,4	5
Piezómetro 8	PS8	Arsénico (mg/L)	4,911	0,1
		Hierro (mg/L)	91,6	5
		Cadmio (mg/L)	0,113	0,01

5.5.4 Evolución química de las aguas subterráneas en el sector del pasivo minero

Con la información disponible de los análisis químicos realizados por la empresa Golder Associates el año 2006 se ha podido determinar la evolución química de las aguas subterráneas en el sector del pasivo minero de REFIMET.

Para ello, se compararon los análisis químicos realizados en los 4 piezómetros ubicados en los alrededores de dicho pasivo minero (ver Figura 25), donde se analizaron los contenidos de hierro, cadmio, plomo y arsénico, con los análisis realizados el año 2006 donde también se muestrearon dichos parámetros (Anexo F).

Esta comparación permite notar que, en general, los contenidos de estos metales pesados se han incrementado en estos últimos 7 años, en especial el hierro, lo cual se podría explicar por posibles filtraciones del pasivo.

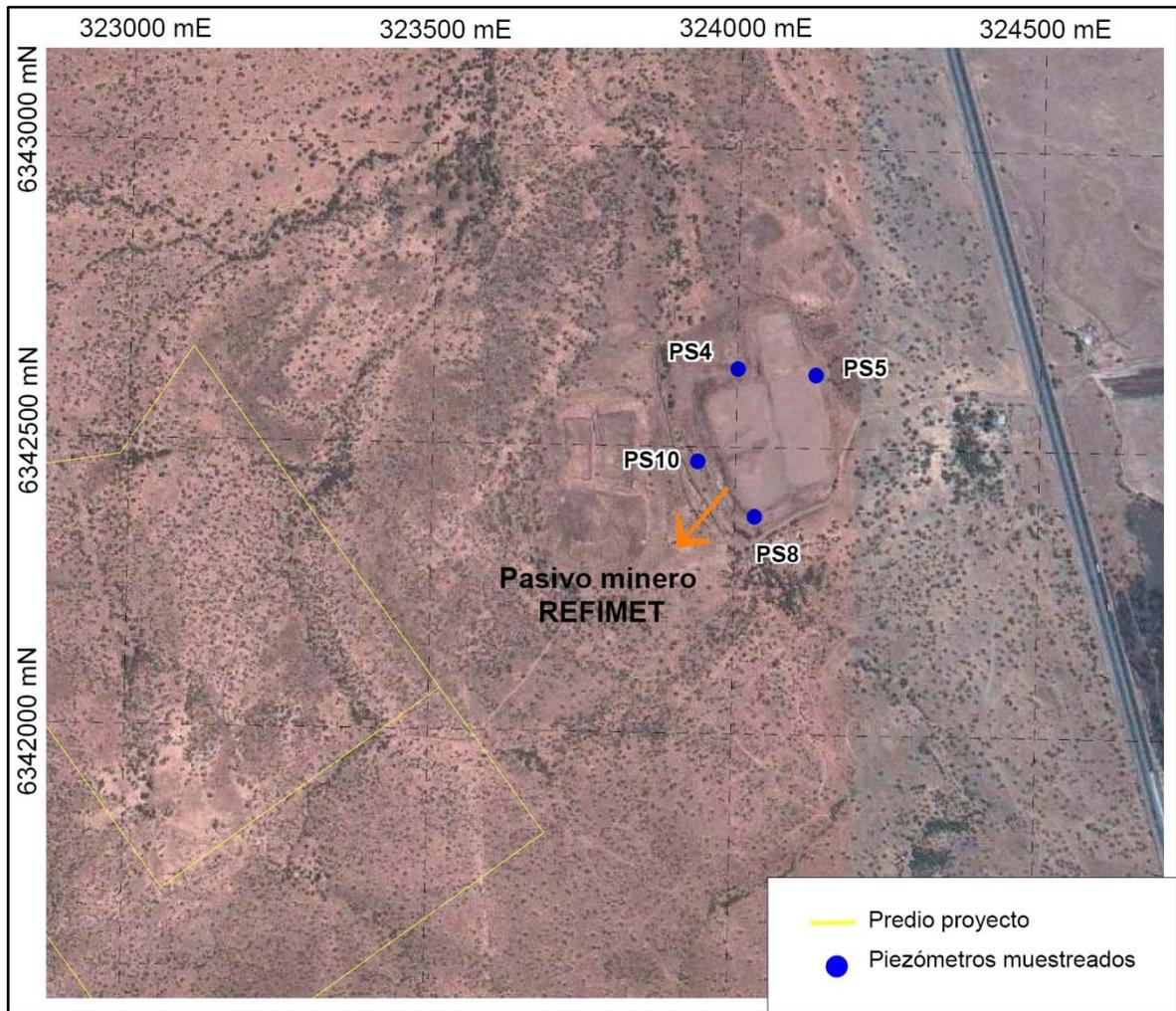


Figura 25.- Mapa ubicación piezómetros analizados en la cuarta campaña de muestreo. Sistema de coordenadas UTM WGS84, huso 19 Sur.

CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

• Conclusiones

Del estudio realizado es posible extraer las conclusiones relevantes que se indican a continuación:

- De acuerdo a la caracterización hidrogeológica, la subcuenca de Rungue se divide en tres clases o categorías de acuerdo a su potencial hidrogeológico (unidades hidrogeológicas 1, 2 y 3), donde el acuífero se restringe a la Unidad Hidrogeológica 1, correspondiente a un medio rocoso de muy baja permeabilidad.

- La transmisividad fue determinada a partir de las pruebas de bombeo realizadas en una noria, un pique minero y un sondaje. Los valores obtenidos fluctúan entre 2 y 15 m²/día, indicando la muy baja eficiencia hidráulica del medio permeable.

- Los registros de niveles freáticos presentan algunas anomalías producto de la constante explotación a la que son sometidas ciertas captaciones y a la baja permeabilidad del acuífero, por lo tanto, los niveles freáticos medidos, y por ende el mapa de superficie equipotencial, no representan el estado de equilibrio de largo plazo. De todas maneras, al trazar la superficie equipotencial aproximada que refleja las condiciones de equilibrio, el flujo subterráneo posee una dirección de flujo hacia el nor-noroeste hacia el fondo de la quebrada tributando finalmente al sector del embalse Rungue.

- Con la descripción estratigráfica de los sondajes y con los perfiles geofísicos se estima un espesor saturado promedio para toda la cuenca de 20 m. Con este valor y el de la transmisividad calculada a partir de la prueba de bombeo en la Noria, se determina un coeficiente de permeabilidad de 0,45 m/día.

Utilizando este valor y el gradiente hidráulico calculado entre la sondaje S4 y el Pozo de los Animales, se determina, en función a la ley de Darcy y a la porosidad eficaz (28%), una velocidad real de escurrimiento del flujo subterráneo para la subcuenca de 3,67 centímetros al día o lo que es equivalente a 13,46 metros al año.

Si se toma una gota dentro del predio del proyecto, cercana al sondaje S4, el tiempo que demoraría esta en llegar al sector del embalse Rungue sería de aproximadamente 300 años.

- La estimación de la recarga se realizó mediante el método de la Curva Número, determinándose que ésta debiera estar comprendida entre 10 y 15 l/s. Además, se estimó este parámetro hidrogeológico mediante un balance medio anual, utilizando la expresión de Turc para la evapotranspiración real. El valor resultante fue de 17 l/s, mostrando un resultado bastante coherente entre ambos métodos.

- El volumen de agua subterránea embalsada se estimó asumiendo un espesor saturado de 20 m, un valor del coeficiente de almacenamiento entre 1 y 3%, y un área de 16,5 km². De esta

forma se alcanzaron valores entre 3.300.000 y 9.900.000 m³. Expresando estos valores como caudal continuo para 50 años se obtienen 2 l/s y 6 l/s respectivamente.

- Se realizaron 4 campañas de muestreo químico en distintas captaciones que se ubican dentro de la subcuenca de estudio. Según los resultados de los análisis químicos se llegó a la conclusión de que las aguas subterráneas son de tipo cálcicas bicarbonatadas con leve incremento del anión sulfatos en algunos sectores. Además, estas aguas no cumplen con la Norma Chilena de Riego (NCh 1.333/78) ni con la Norma Chilena de Agua Potable (NCh 409/1) respecto a algunos cationes o aniones tales como sulfato, manganeso y sodio.

- Con respecto al análisis químico realizado en los piezómetros se puede concluir que éstos presentan altos niveles de hierro y arsénico, además de cadmio en algunos sectores específicos, los cuales sobrepasan enormemente los límites impuestos en la Norma Chilena de Riego (NCh 1.333/78). También se observa un incremento en la concentración de estos elementos en comparación con otros análisis realizados el año 2006, lo cual puede indicar una posible filtración del pasivo minero.

- Conforme a la información recabada durante el presente estudio se puede aseverar que las características hidrogeológicas de la zona de estudio son muy pobres y, por lo tanto, el sitio escogido es propicio para el emplazamiento de una planta de revalorización, tratamientos y disposición final de residuos industriales tóxicos y peligrosos.

- **Recomendaciones:**

- Realizar mediciones de nivel freático mensuales en todas las captaciones existentes en la zona de estudio, por al menos 6 meses, con el fin de tener un catastro de niveles de 1 año completo.

- Muestreo hidroquímico -a lo menos semestral -en el sondaje S5, la Noria y el Pozo de los animales, con el objetivo de conocer con mayor detalle la evolución química de las aguas subterráneas del sector.

- Construir 2 pozos ubicados aguas abajo del predio del proyecto con el fin de tener un mayor control de las aguas subterráneas. La posible ubicación de estos pozos se ilustra en la Figura 26 y sus coordenadas en datum WGS84 huso 19S son:

→ PR1: 323.590 Este, 6.343.798 Norte, ubicado en la zona intermedia entre el predio y el embalse Rungue. En él se podría detectar una posible contaminación proveniente del pasivo minero y/o de la futura planta de residuos

→ PR2: 322.550 Este, 6.344.793 Norte, ubicado en el sector del embalse Rungue. En él se podría detener la contaminación detectada en PR1. Para ello se bombearía el agua contaminada con el fin de que no llegue al sector del embalse Rungue.

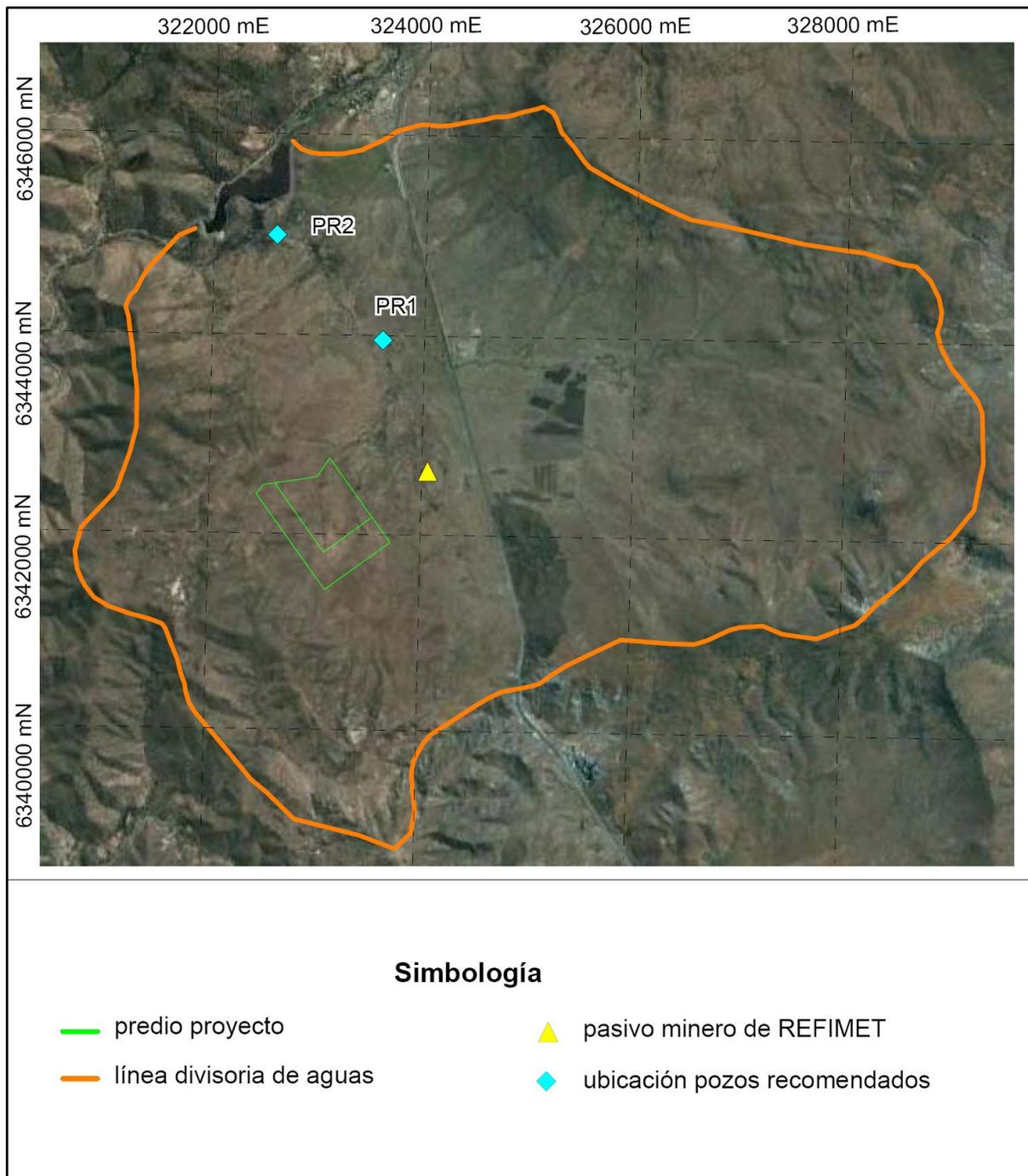


Figura 26.- Ubicación pozos recomendados. Sistema de coordenadas UTM WGS84, huso 19 Sur.

CAPÍTULO 7 REFERENCIAS

1. Aguirre, I., Welkner, D., Cañuta, J., 2005. Informe Fundo El Llano de REFIMET. Servicio Nacional de Geología y Minería en conjunto con el Instituto Federal de Geociencias y Recursos Naturales de Alemania. Chile.
2. Aravena, G., 2011. Metodología para realizar una evaluación hidrogeológica ambiental de un proyecto minero de sulfuros de cobre. Aplicación a un estudio de caso. Memoria para optar al título de Ingeniero civil. [en línea] <<http://www.tesis.uchile.cl/handle/2250/104063>>
3. Atiao, J., 2003. Peligro de remociones en masa e inundaciones de la cuenca de Santiago, Región Metropolitana, escala 1:100.000. Servicio Nacional de Geología y Minería, Subdirección Nacional de Geología, Santiago.
4. Comisión Nacional del Medio Ambiente, 2001 Reglamento del Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental. [en línea] <http://www.sernageomin.cl/pdf/mineria/ambiente/Reglamento_SEIA.pdf>
5. DICTUC, 2012. Informe de mecánica de suelos, terreno en km 51, TilTil. Santiago.
6. Dirección Meteorológica de Chile, 2013. Climas de la Región Metropolitana [en línea] <http://www.meteochile.cl/climas/climas_region_metropolitana.html>
7. Espinoza, C., 2004. Apuntes del curso Hidráulica de Aguas Subterráneas y su aprovechamiento. Departamento de Ingeniería Civil, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Universidad de Chile, Santiago.
8. Farías, M., 2007. Tectónica y erosión en la evolución del relieve de los Andes de Chile Central durante el Neógeno. Tesis para optar al grado de Doctor en Ciencias, mención Geología. Departamento de Geología, Universidad de Chile.
9. Farías, M., Comte, D., Charrier, R., Martinod, J., David, C., Tassara, A., Tapia, F., Fock, A., 2010. Crustal-scale structural architecture in central Chile based on seismicity and surface geology: Implications for Andean mountain building. Revista Tectonics, vol. 29. [en línea]
10. Fernández, J., 2001. Estudio geológico-ambiental para la planificación territorial del sector Tilttil-Santiago. Tesis para optar al grado de Magister en Ciencias, mención Geología. Departamento de Geología, Universidad de Chile.
11. Golder Associates, 2006. Informe Preliminary Quantitative Risk Assessment for human and ecological receptors REFIMET waste site Chile. Golder Associates, British Columbia.
12. Gonzáles, E., 1987. Prospección y evaluación de yacimientos de caolín, cuarzo y caliza en el sector de Tilttil, Región Metropolitana. Memoria para optar al título de geólogo. Departamento de Geología, Universidad de Chile, Santiago.

13. INGEDOS, 2007. Estudio hidrogeológico Llano de Rungue, REFIMET, Rungue, comuna de Tilttil, Región Metropolitana. INGEDOS. Santiago.
14. Instituto Geográfico Militar. Carta topográfica regular escala 1:50.000 Tilttil (E-050) versión digital. Instituto Geográfico Militar, Santiago.
15. Irrázaval, V., 1977. Estudio geológico y geoquímico de la zona de alteración hidrotermal de Tilttil. Área Metropolitana. Memoria de Título. Departamento de Geología, Universidad de Chile, Santiago.
16. Iriarte, S., 2003. Vulnerabilidad a la contaminación de los acuíferos de la cuenca de Santiago, Región Metropolitana. Servicio Nacional de Geología. Carta Geológica de Chile, Serie Geología Ambiental, No. 4, mapa escala 1:100.000, Santiago.
17. Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas (DGA). 1986. Mapa hidrogeológico de Chile 1:2.500.000.
18. Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas (DGA). 1987. “Balance Hídrico de Chile”.
19. Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas (DGA), Departamento de Recursos Hídricos, 2002. Informe de zonificación hidrogeológica para las regiones Metropolitana y V. [en línea] <<http://documentos.dga.cl/SUB2740.pdf>>
20. Ministerio de Salud, 2004. Reglamento Sanitario sobre Manejo de Residuos Peligrosos, Decreto 148. [en línea] <<http://www.leychile.cl/Navegar?idNorma=226458>>
21. Ministerio de Vivienda y Urbanismo (MINVU), 2010. Plan Regulador Metropolitano de Santiago. Ordenanza actualizada abril 2010. [en línea] <www.minvu.cl>
22. PAC Consultores, sin fecha. Plan de desarrollo comunal de TilTil, Etapa 1 Caracterización comunal. [en línea] <<http://caleu-lo-marin.wikispaces.com/file/view/Etapa+01.pdf>>
23. Parraguez, C., 2009, Apuntes del curso de Hidrogeología. Departamento de Geología, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Universidad de Chile, Santiago.
24. Quarzo Ingeniería Tecnología y Servicios, 2012. Levantamiento Topográfico Llanos de Rungue. Santiago.
25. Quiroz, G., 2011. Metodología para la realizar una evaluación hidrogeológica ambiental de un proyecto minero de sulfuros de cobre. Aplicación a un estudio de caso. Memoria de Título. Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile, Santiago.
26. Rebolledo, S., 2013. Informe Geología depósito residuos peligrosos Rungue. Rocmass Ingeniería Geológica. Santiago.

27. Sánchez, M., 2001. Métodos de estimación de evapotranspiración utilizados en Chile. Instituto de Geografía, Pontificia Universidad Católica de Chile. [en línea] <http://www.geo.puc.cl/html/revista/PDF/RGNG_N28/art01.pdf>
28. Sustentable S.A., 2012. Informe Hidrología Rungue. Sustentable S.A., Santiago.
29. Thomas, H., 1958. Geología de la Cordillera de la Costa entre el Valle de La Ligua y la Cuesta de Barriga. Instituto de Investigaciones Geológicas, Boletín n°2, 86 pág., Santiago.
30. Wall, R., Sellés, D., Gana, P., 1999. Área Tiltil-Santiago, Región Metropolitana. Servicio Nacional de Geología y Minería. Mapas Geológicos, No. 11, 1 mapa escala 1:100.000, 1 anexo, Santiago.

CAPÍTULO 8: ANEXOS

Anexo A: Descripción captaciones de agua

El estudio hidrogeológico realizado en Rungue cuenta con diversas captaciones, todas ellas ubicadas tal como lo ilustra la Figura A1.

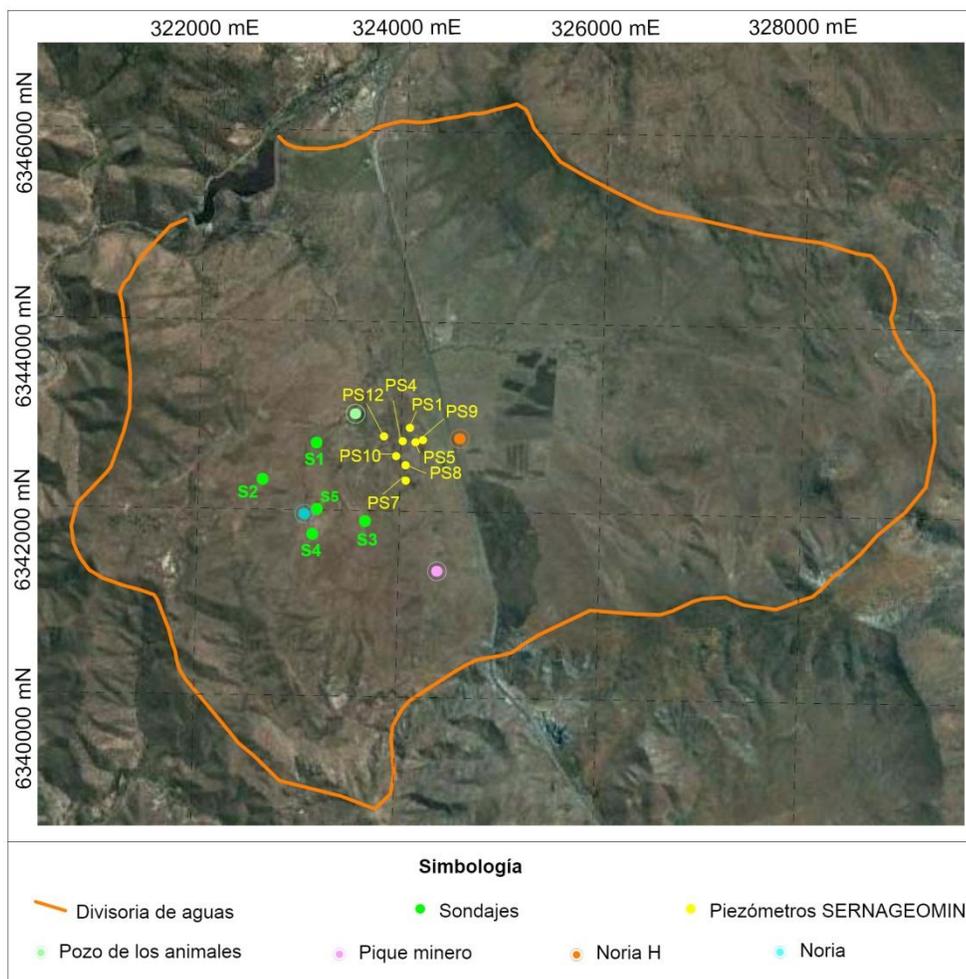


Figura A1.- Ubicación captaciones. Sistema de coordenadas UTM WGS84, huso 19 Sur.

Inicialmente, se contó con cuatro captaciones: un pique minero de profundidad aproximada 30 metros y diámetro promedio 2 metros; una noria ubicada dentro del predio del proyecto de profundidad 6,5 metros y diámetro 1,2 metros; otra noria ubicada al oriente de la carretera de diámetro promedio 2,4 metros; y un pozo para dar de beber a los animales de diámetro promedio 2,25 metros.

Se contó también con 10 piezómetros construidos por el SERNAGEOMIN el año 2005 con el objetivo de servir como una red de monitoreo del pasivo minero. Los antecedentes estratigráficos de éstos se encuentran en el informe *Estudio hidrogeológico Llano de Rungue*,

REFIMET, Rungue, comuna de Tiltil, Región Metropolitana realizado por INGEDOS el año 2006.

Durante los meses de noviembre y diciembre del año 2012 se construyeron 4 sondajes; S1; S2; S3 y S4, ubicados dentro del predio del proyecto; a cargo de la empresa Quinta Ingeniería y Construcción Ltda. Los sondajes S1 y S4 se perforaron con diamantina en 6'' hasta una profundidad de 30 metros y los sondajes S2 y S3 se perforaron también con diamantina pero en 2'' hasta los 15 metros. Estos dos últimos fueron profundizados con rotoperusión a 30 metros durante el mes de mayo de 2013, fecha en la cual también se construyó el sondaje S5. Éste se perforó con rotoperusión en 6'' hasta los 30 metros de profundidad, con el fin de corroborar la información otorgada por los otros sondajes en cuanto al nivel freático.

La descripción realizada en los sondajes S1, S2, S3 y S4 indica que en superficie existe una capa de suelo arcilloso arenoso de espesor entre 0,5 y 3,5 metros. Luego, comienza una alternancia de roca sedimentaria-volcánica de textura brechosa. El espesor de los distintos estratos y el tamaño va variando en cada sondaje.

El sondaje S1, ubicado en el sector norte del predio (Figura A1), presenta el suelo de mayor espesor (3,5 metros) y un dique afanítico de 80 cm ubicado a los 11 metros de profundidad. Los sondajes S2, S3 y S4 no presentan una gran variación; en todos se observa una capa de suelo de espesor 1,5 metros y no se observan estructuras especiales.

Un aspecto hidrogeológico muy importante definido en función a los pozos construidos, dice relación con el grado de fracturamiento de la roca que subyace a los rellenos superiores que más adelante se describen. La empresa Rocmass (2013) realizó un estudio sobre la calidad de la roca por medio del índice RQD. Según los resultados de éste, el sondaje S1 tiene un valor bajo de RQD (roca muy fracturada) hasta los 12 metros. Bajo esta profundidad la roca mejora hasta que en el metro 19,5 hasta los 22,5 el RQD baja otra vez, encontrándose en una zona fracturada. En el sondaje S2 la roca tiene un RQD cercano a 50. El sondaje S3 también presenta un valor cercano a éste hasta el metro 10,5 donde se observa una zona fracturada de 1,5 metros de espesor. El sondaje S4, al igual que S2 y S3, presenta un valor de RQD cercano a 50, a excepción de los metros entre 4,5 y 7,5 donde existe una zona fracturada.

En resumen, esto indicaría que la roca bajo los 12 metros de profundidad presenta una calidad regular a buena, a excepción del sondaje S1 el cual, entre los metros 19,5 y 22,5, la roca tiene un RQD de 0 a 12%.

Esta peculiaridad tiene gran relevancia hidrogeológica ya que permite asumir, con alto grado de certidumbre, que los niveles que presentan fracturamiento conforman un medio de permeabilidad moderada que lo transforma en un acuífero que facilita el tránsito subterráneo en las zonas estrechas.

A continuación, se adjuntan las columnas estratigráficas levantadas en base a la información aportada por el informe *Geología depósitos residuos peligroso Rungue* realizado por Rocmass (2013). Para estos efectos se utilizó el software desarrollado por CPH y Asociados S.A. denominado SONDATA, que permite, en una sola figura, incorporar la información indicada.

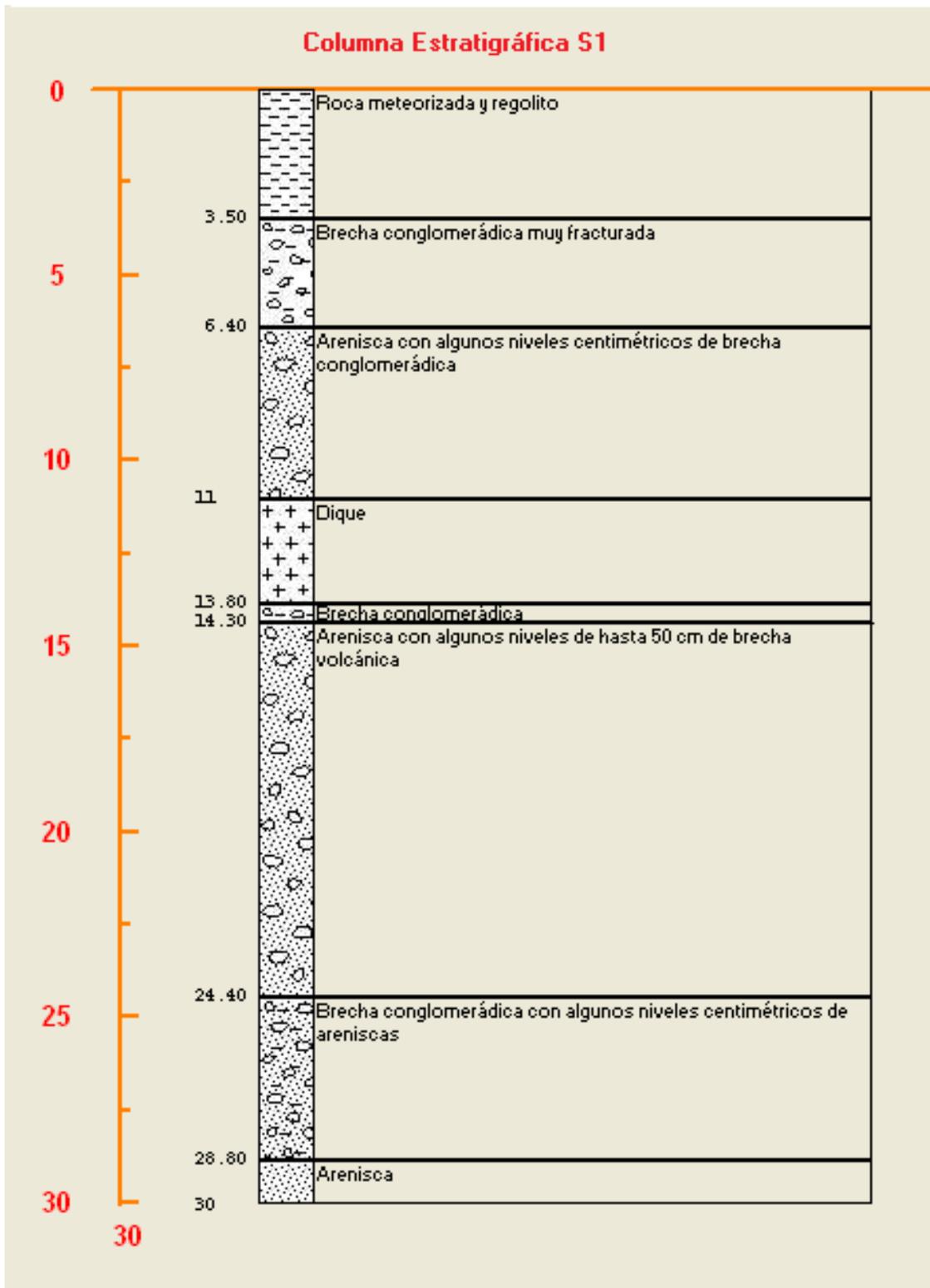


Figura A2. Columna Estratigráfica del sondaje S1.

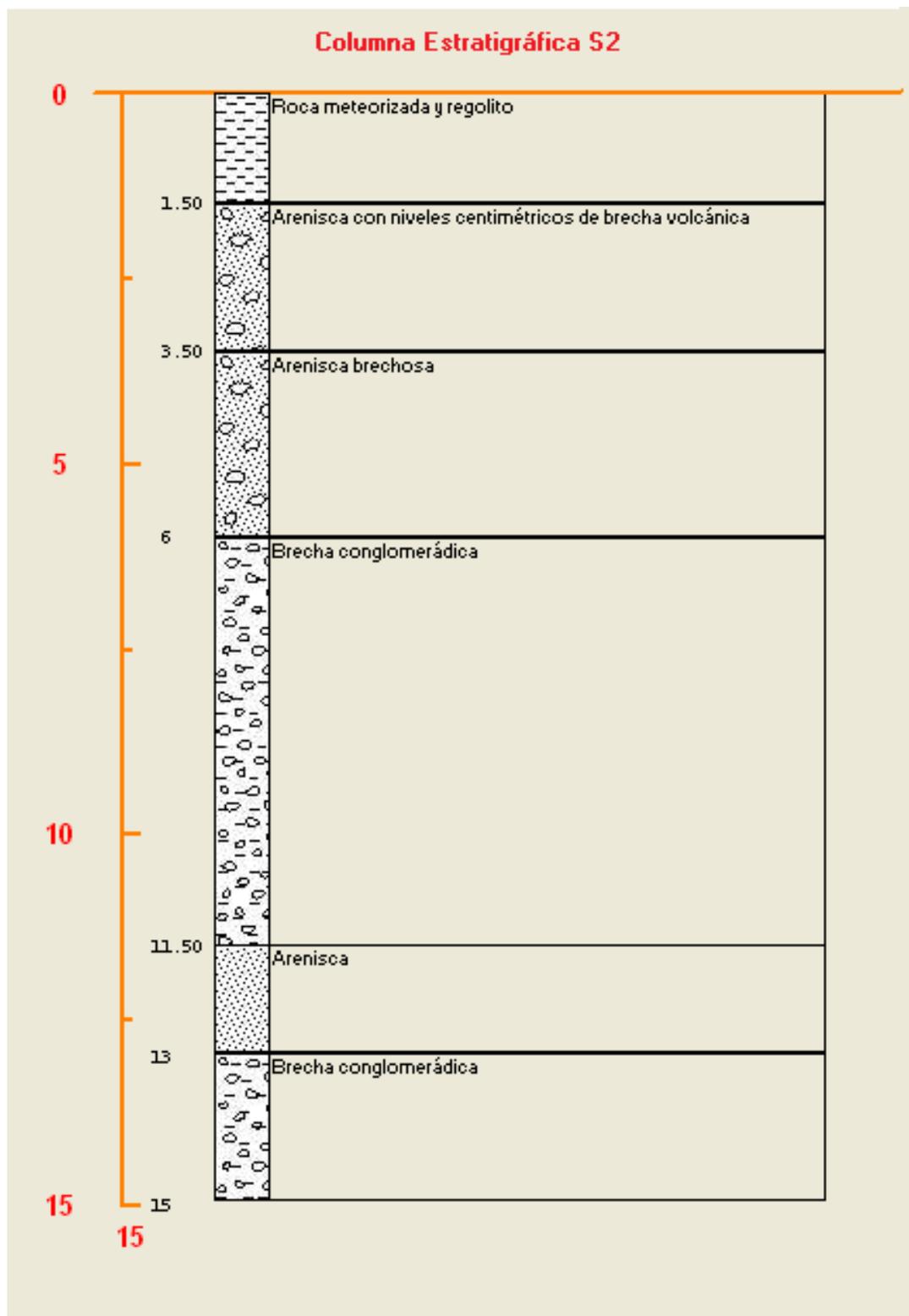


Figura A3. Columna Estratigráfica del sondaje S2.

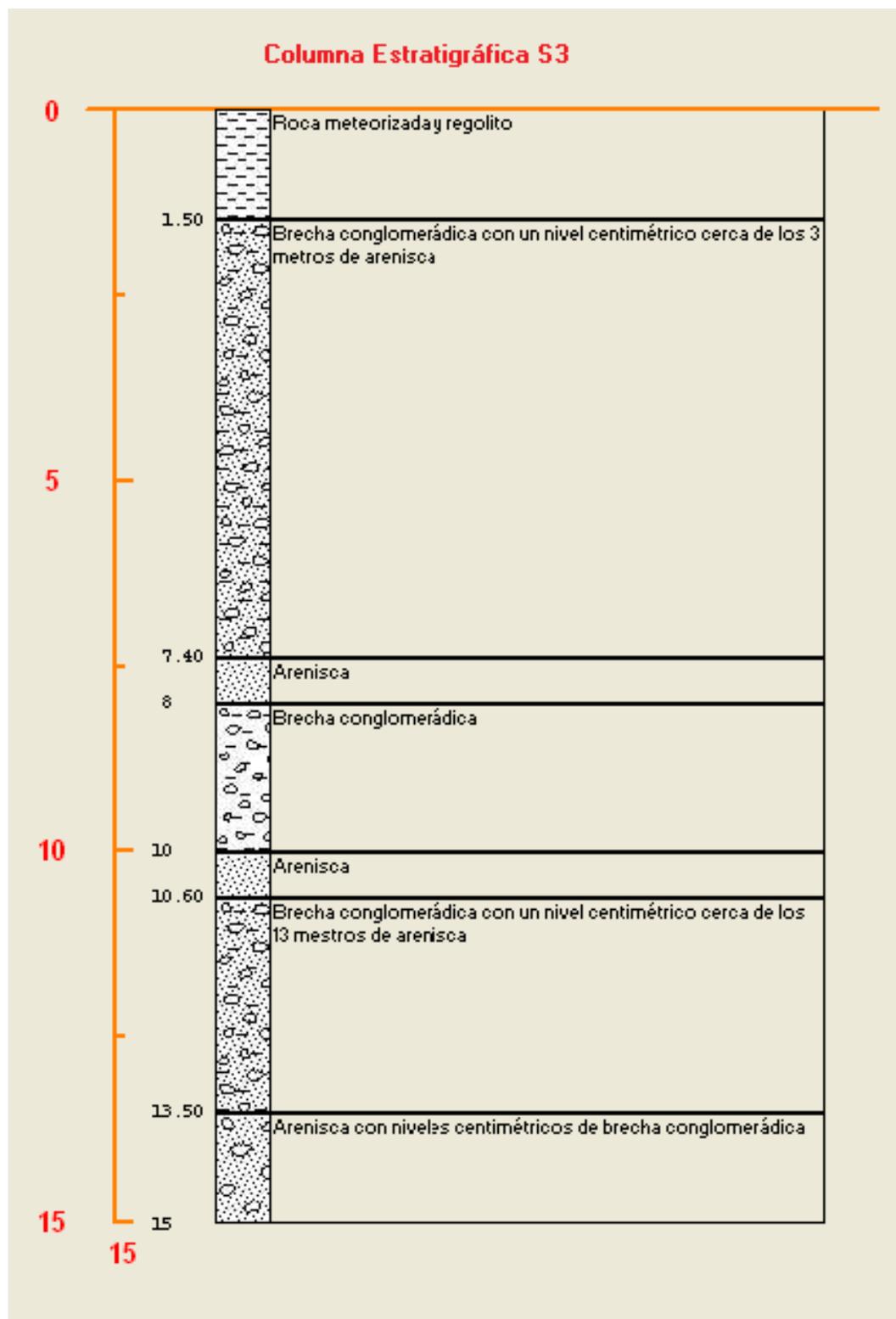


Figura A4. Columna Estratigráfica del sondaje S3.

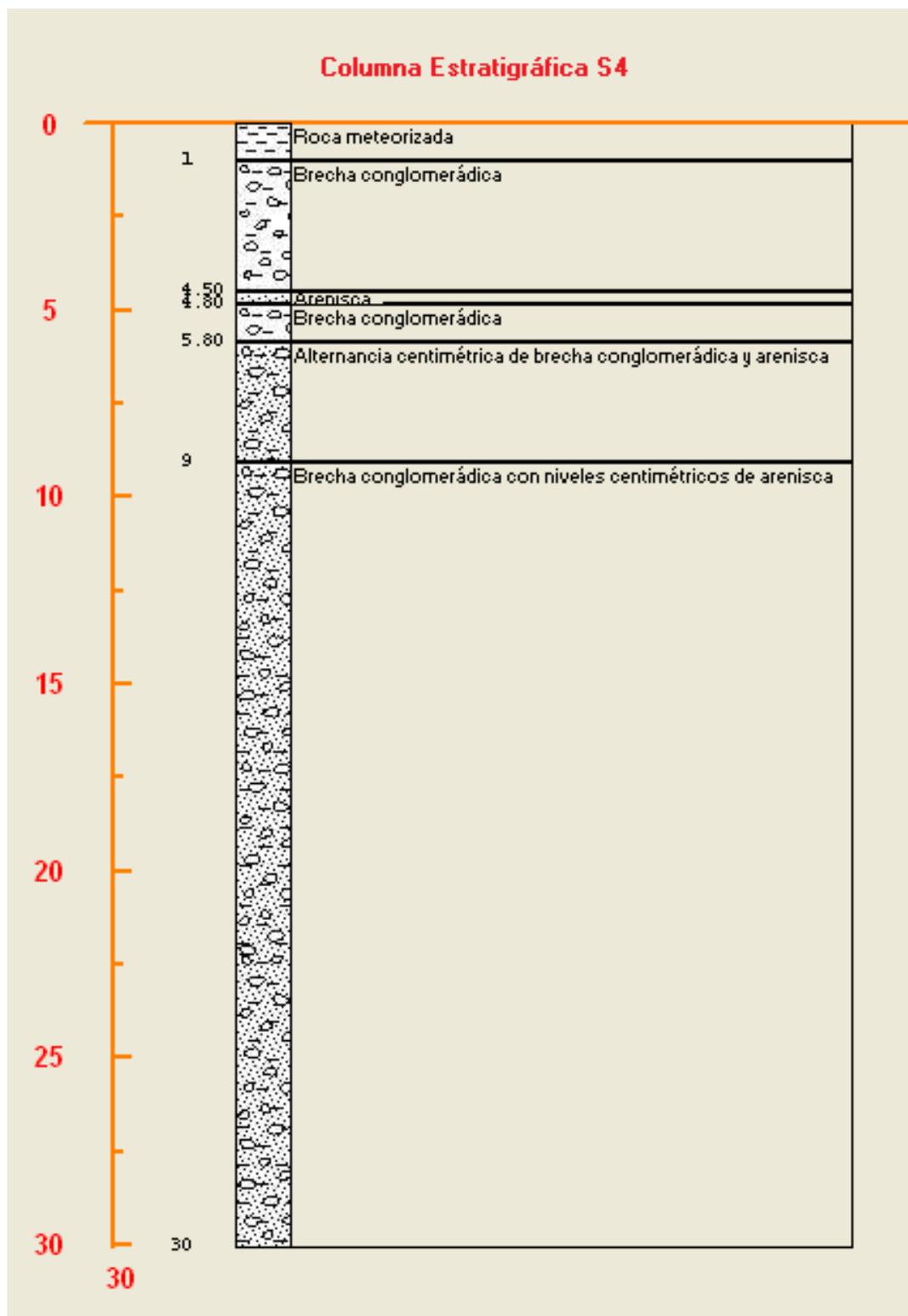


Figura A5. Columna Estratigráfica del sondaje S4.

Anexo B: Perfiles Geofísicos

Los perfiles geofísicos levantados en la zona por Geodatos S.A.I.C., se efectuaron en dos campañas. La primera fue realizada entre los días 28 de agosto y 2 de septiembre del año 2012 donde se midieron 40 estaciones NanoTEM y 12 estaciones TEM. Éstos se disponen como se ilustra en la Figura B1, abarcando el total del área del predio del proyecto. La segunda campaña se llevó a cabo entre los días 27 de noviembre y 7 de diciembre del mismo año donde se midieron 40 estaciones NanoTEM. La Figura B2 muestra la ubicación de estos perfiles. Cabe mencionar que en la última campaña el estudio geofísico abarcó un área mayor que en el estudio anterior.

El objetivo de estos estudios es la determinación cuantitativa de las propiedades eléctricas del subsuelo en la zona de interés, constituido por formaciones sedimentarias y, eventualmente, rocas impermeables del basamento. Estas propiedades geoelectricas dependen de la mineralogía (litología) y microestructura (porosidad, granulometría y fracturamiento) de las rocas, las cuales varían significativamente según la profundidad. Afecta de manera importante a la resistividad el tipo de fluidos que contengan las rocas (grado de saturación, salinidad, etc.). La existencia de estructuras y fenómenos de alteración también producen cambios de la resistividad que pueden ser detectados con un estudio geoelectrico.

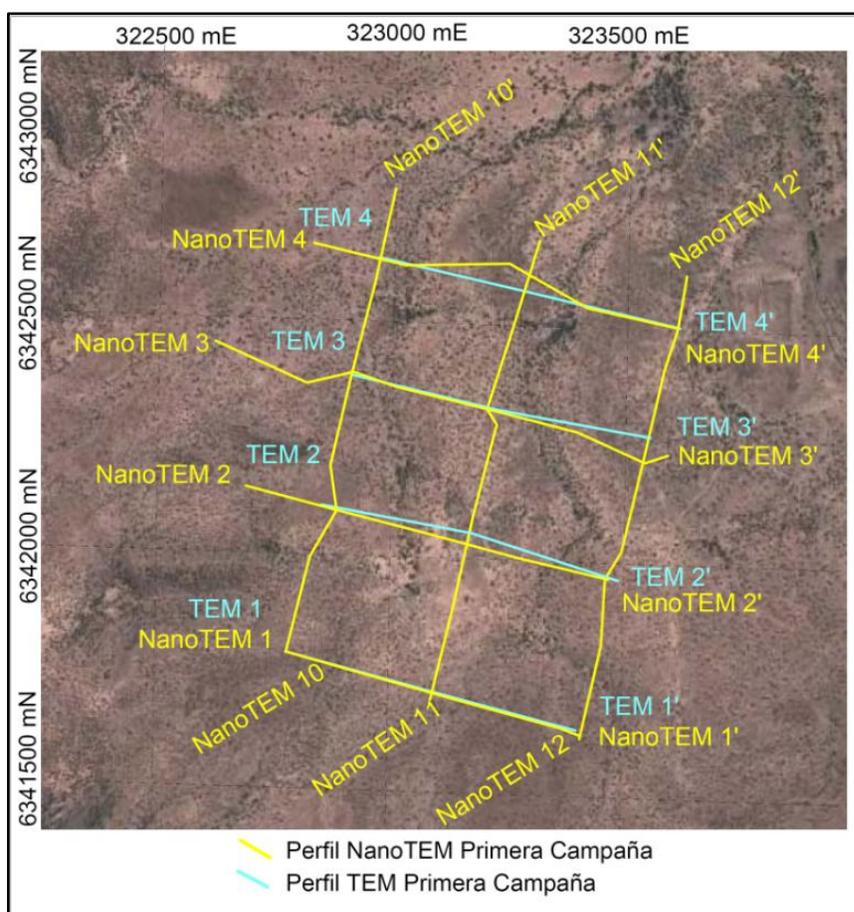


Figura B1.- Ubicación perfiles geofísicos primera campaña. Sistema de coordenadas UTM WGS84, huso 19 Sur.

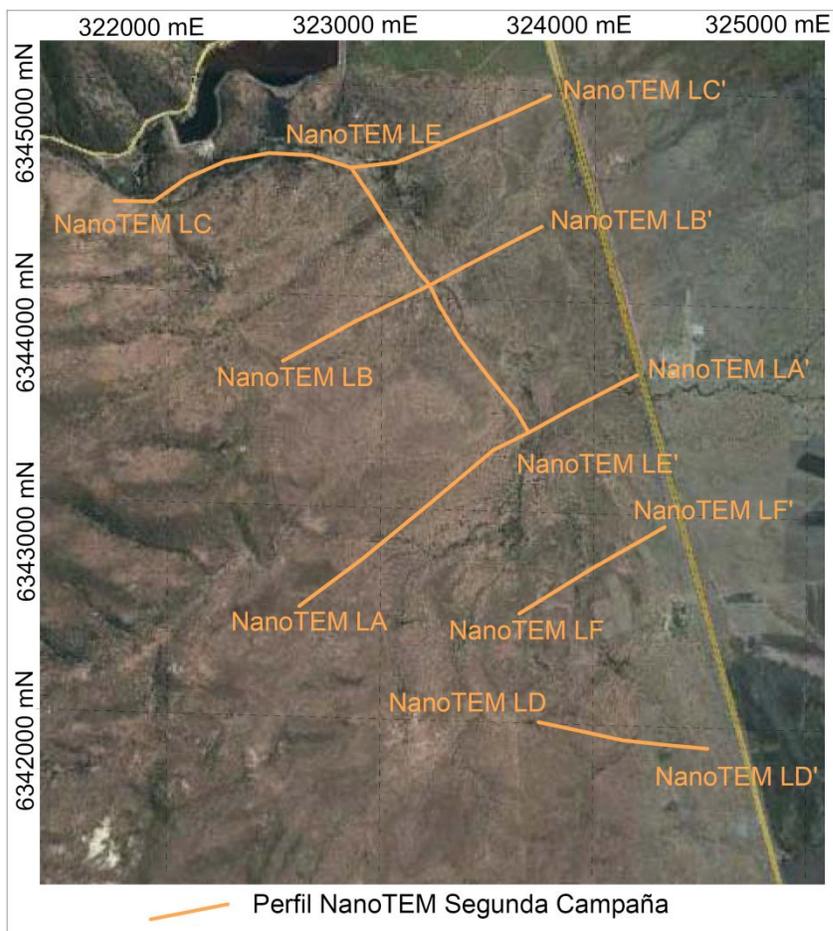


Figura B2.- Ubicación perfiles geofísicos levantados en la segunda campaña. Sistema de coordenadas UTM WGS84, huso 19 Sur.

A continuación, se adjuntan las secciones geofísicas realizadas por Geodatos SAIC como modelos 1D de tipo suavizado (smoothmodel).

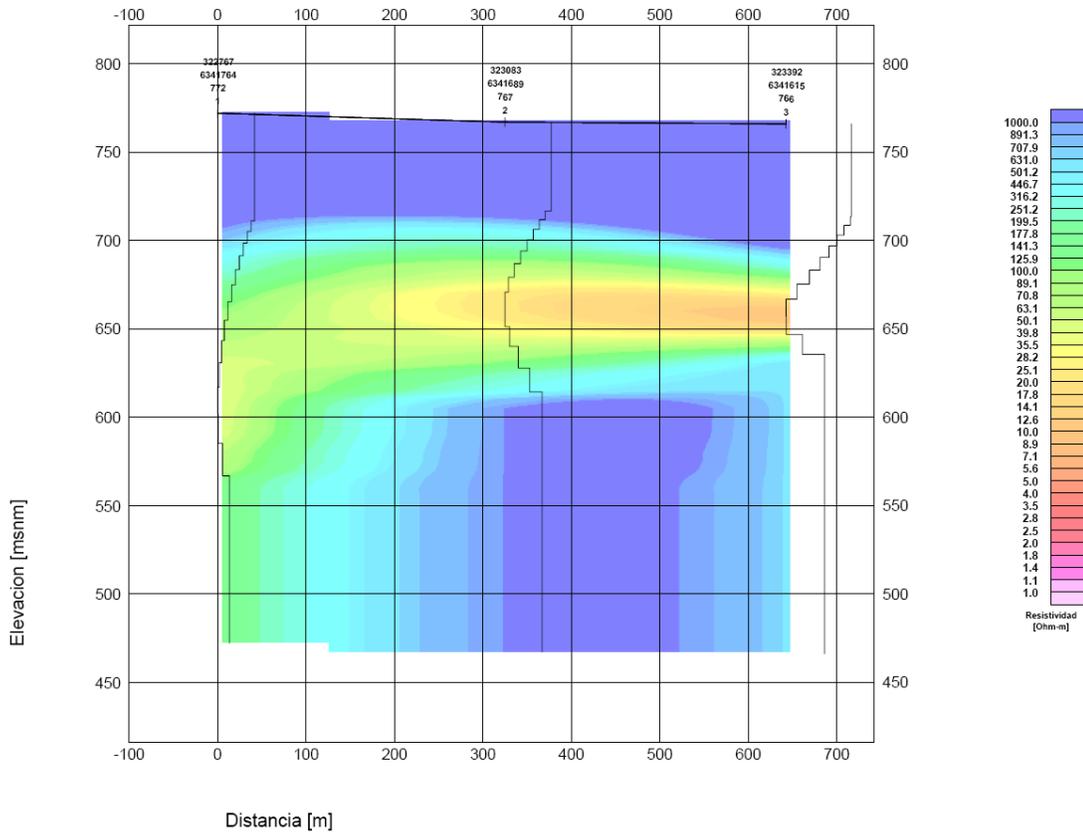


Figura B3.- Perfil TEM 1.

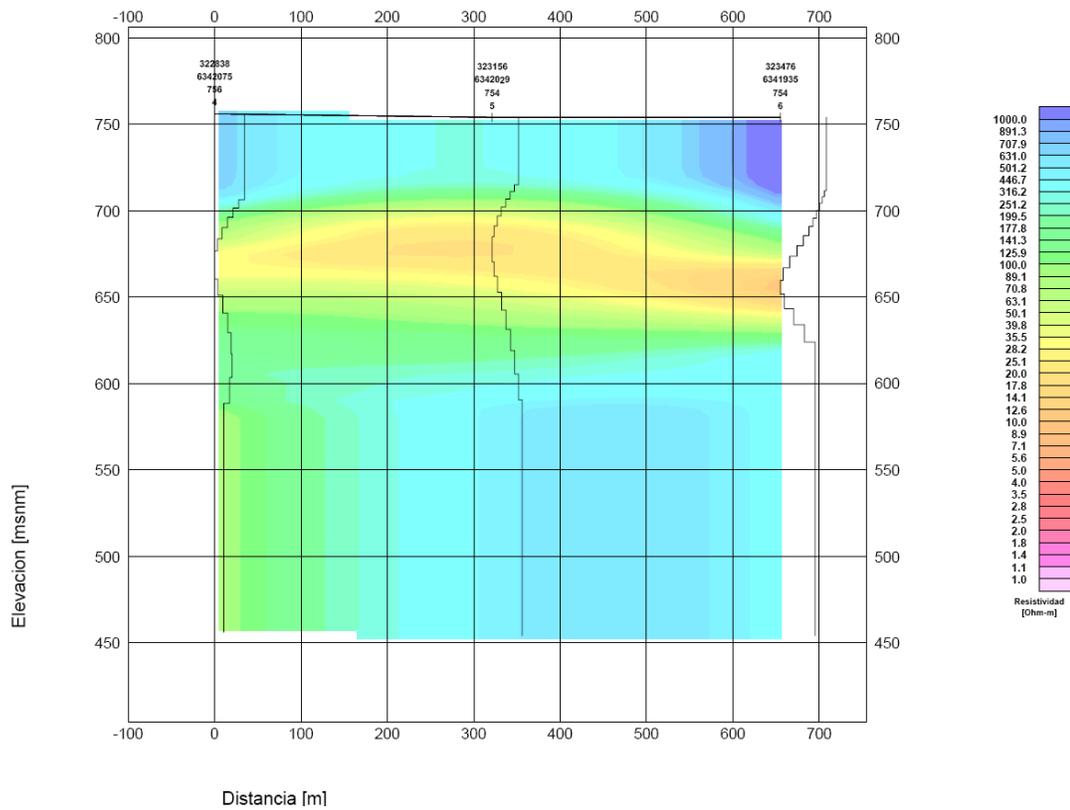


Figura B4.- Perfil TEM 2.

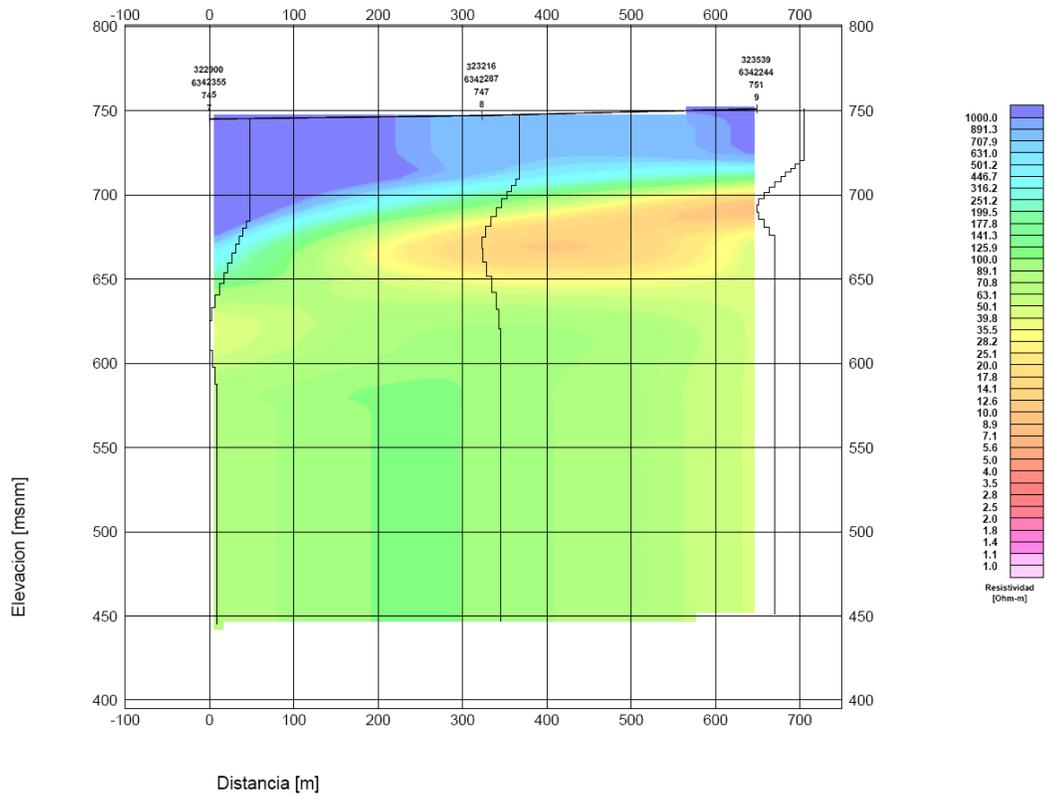


Figura B5.- Perfil TEM 3.

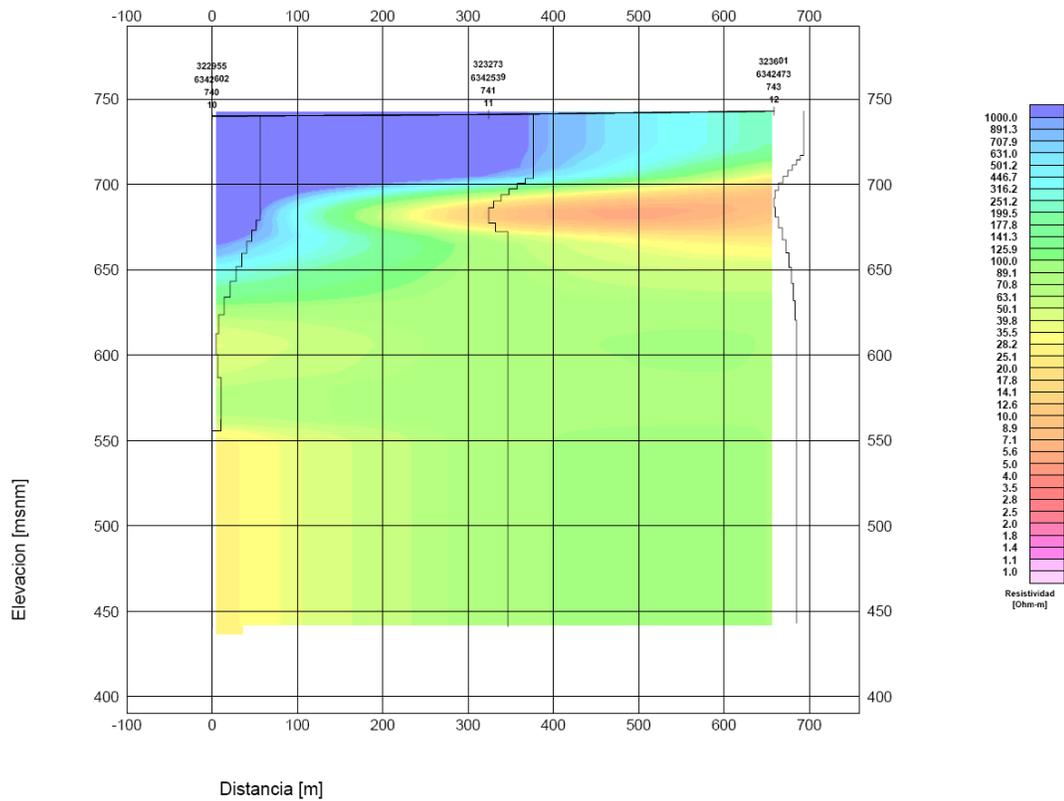


Figura B6.- Perfil TEM 4.

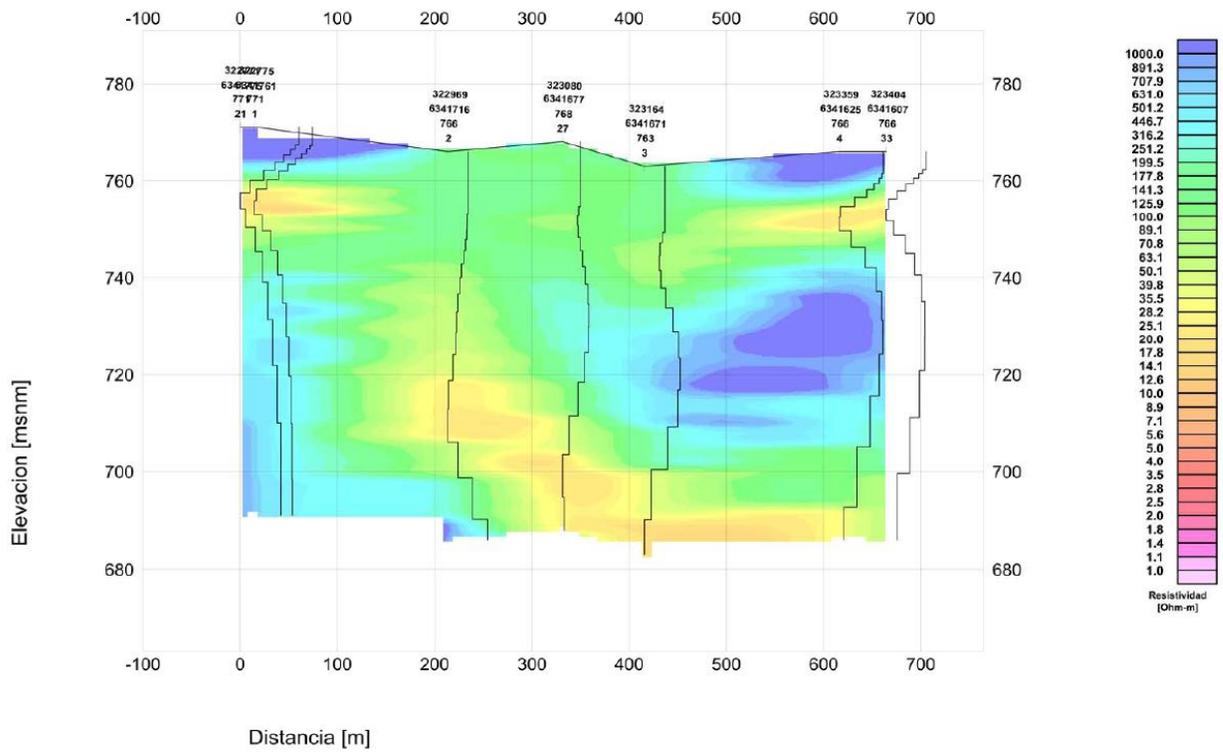


Figura B7.- Perfil NanoTEM 1.

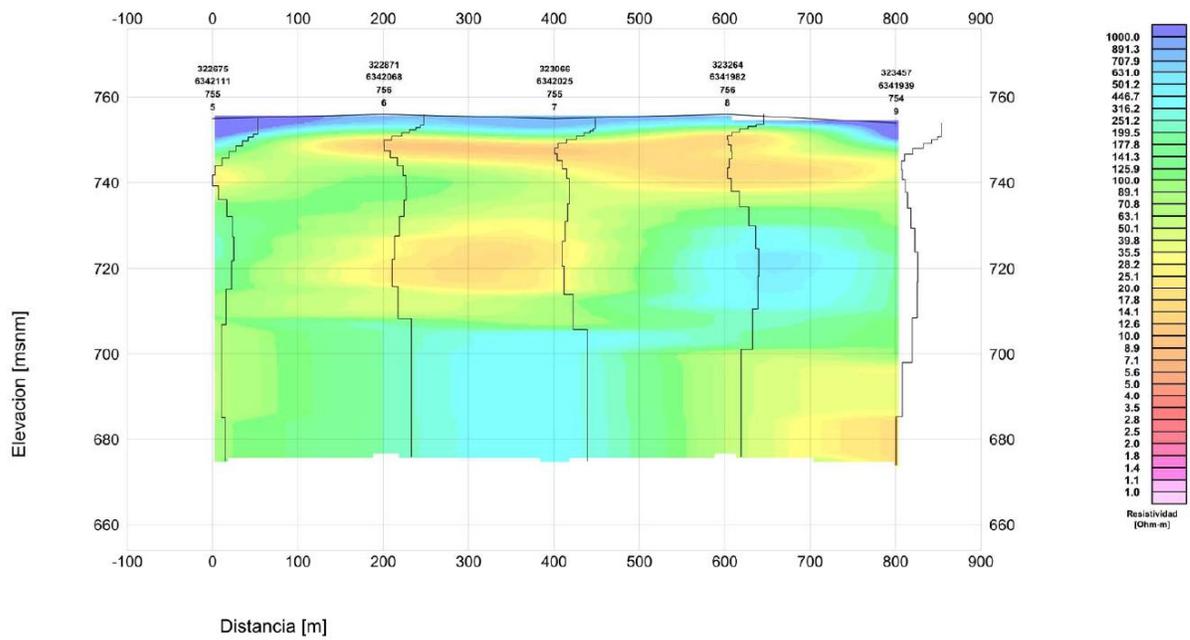


Figura B8.- Perfil NanoTEM 2.

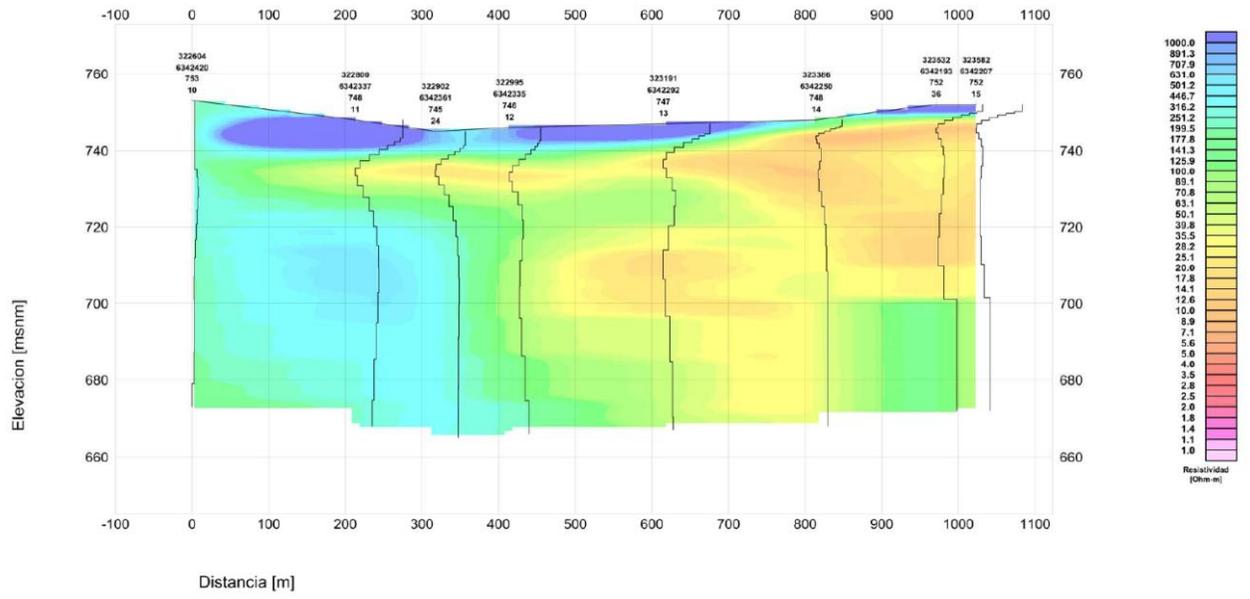


Figura B9.- Perfil NanoTEM 3.

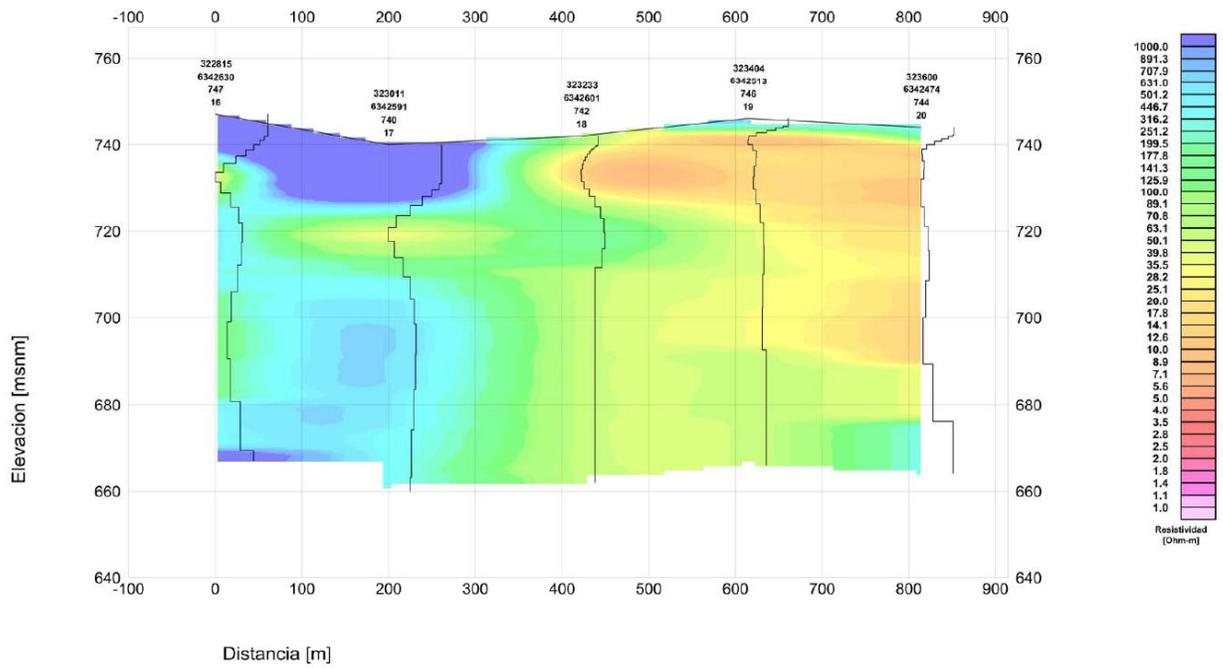


Figura B10.- Perfil NanoTEM 4.

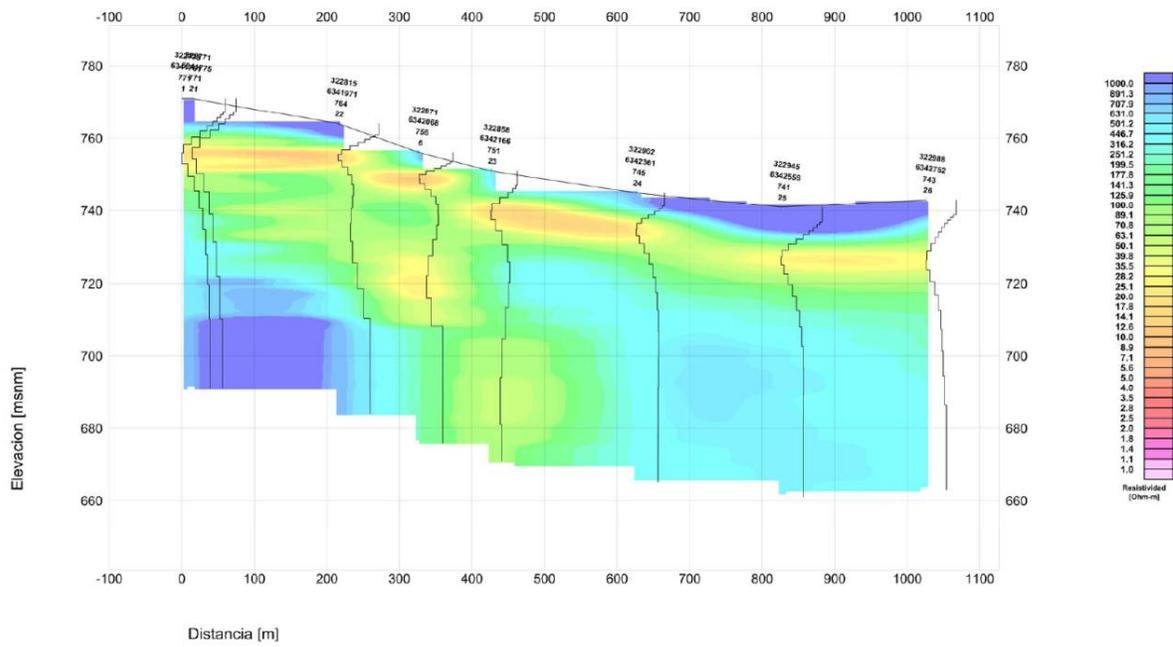


Figura B11.- Perfil NanoTEM 10.

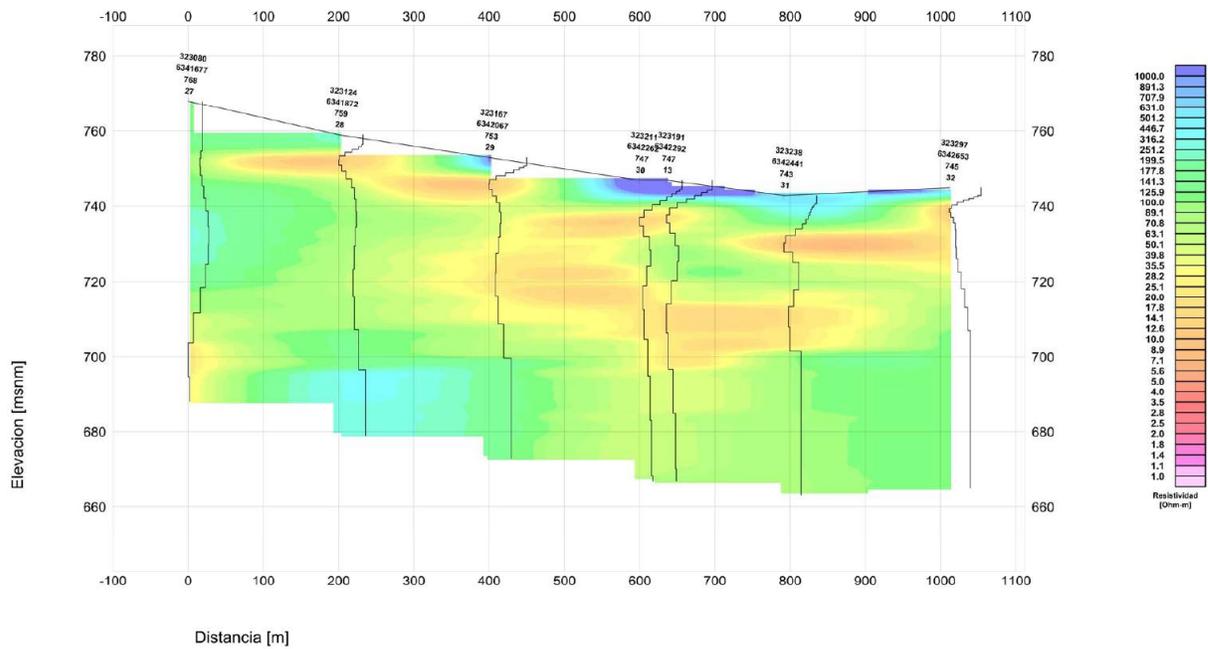


Figura B12.- Perfil NanoTEM 11.

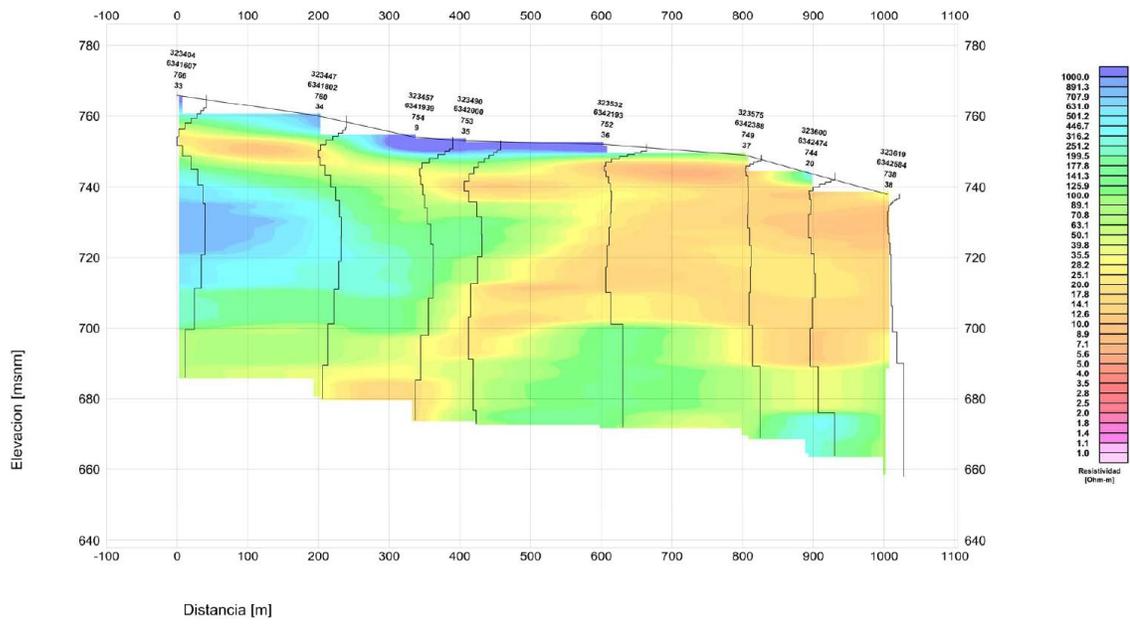


Figura B13.- Perfil NanoTEM 12.

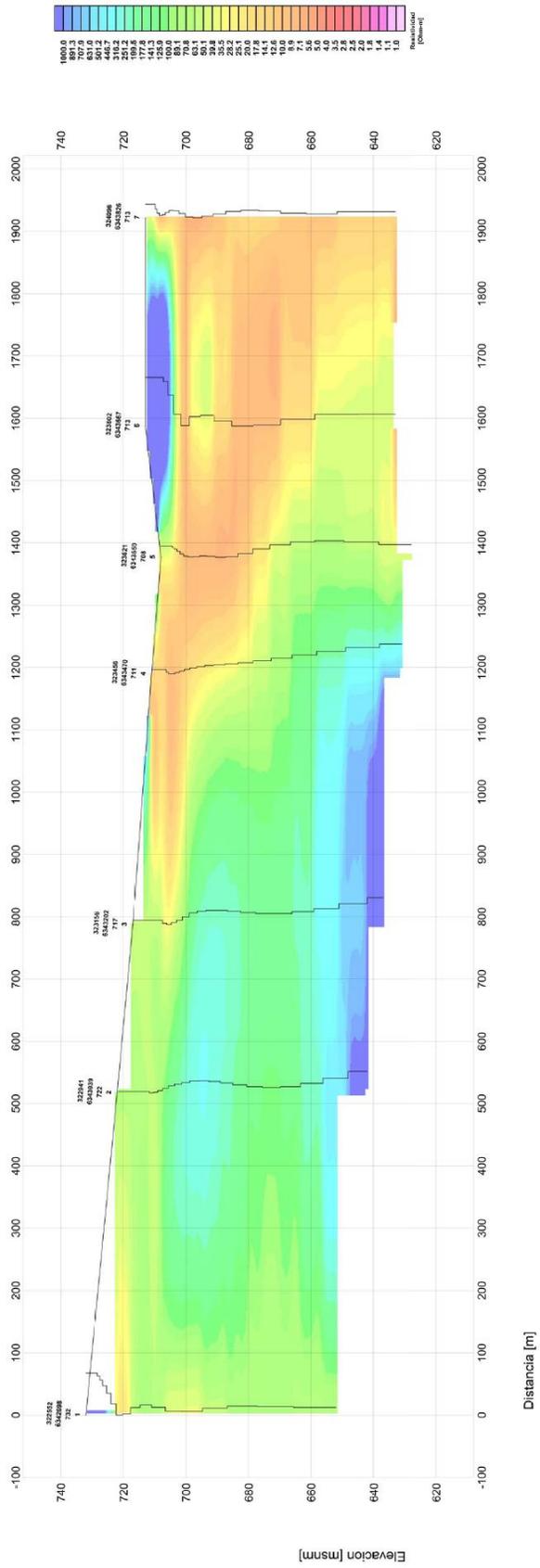


Figura B14.- Perfil NanoTEM LA.

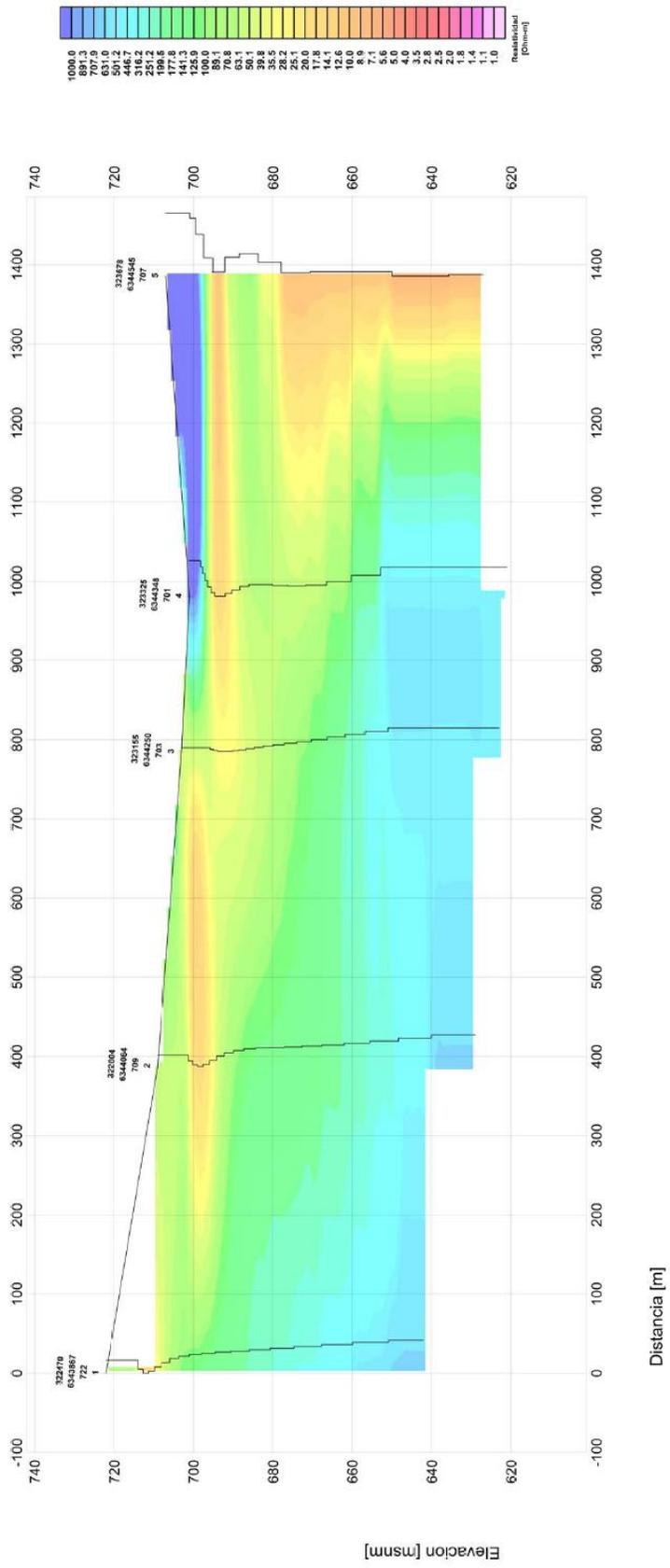


Figura B15.- PerfilNanoTEM LB.

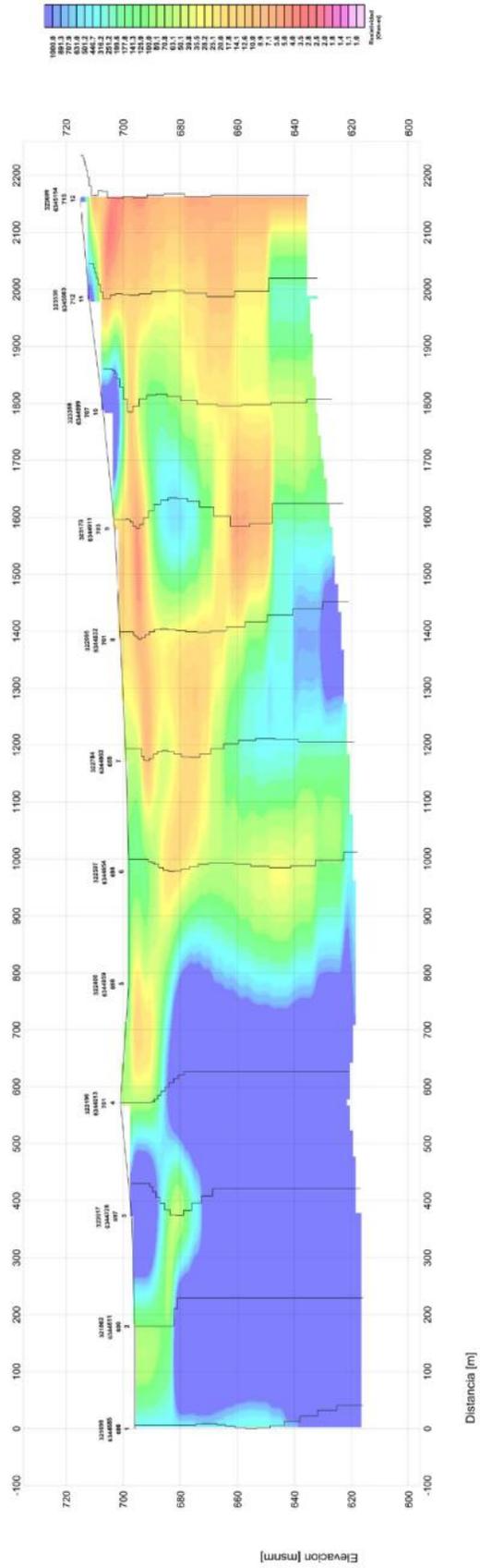


Figura B16.- Perfil NanoTEM LC.

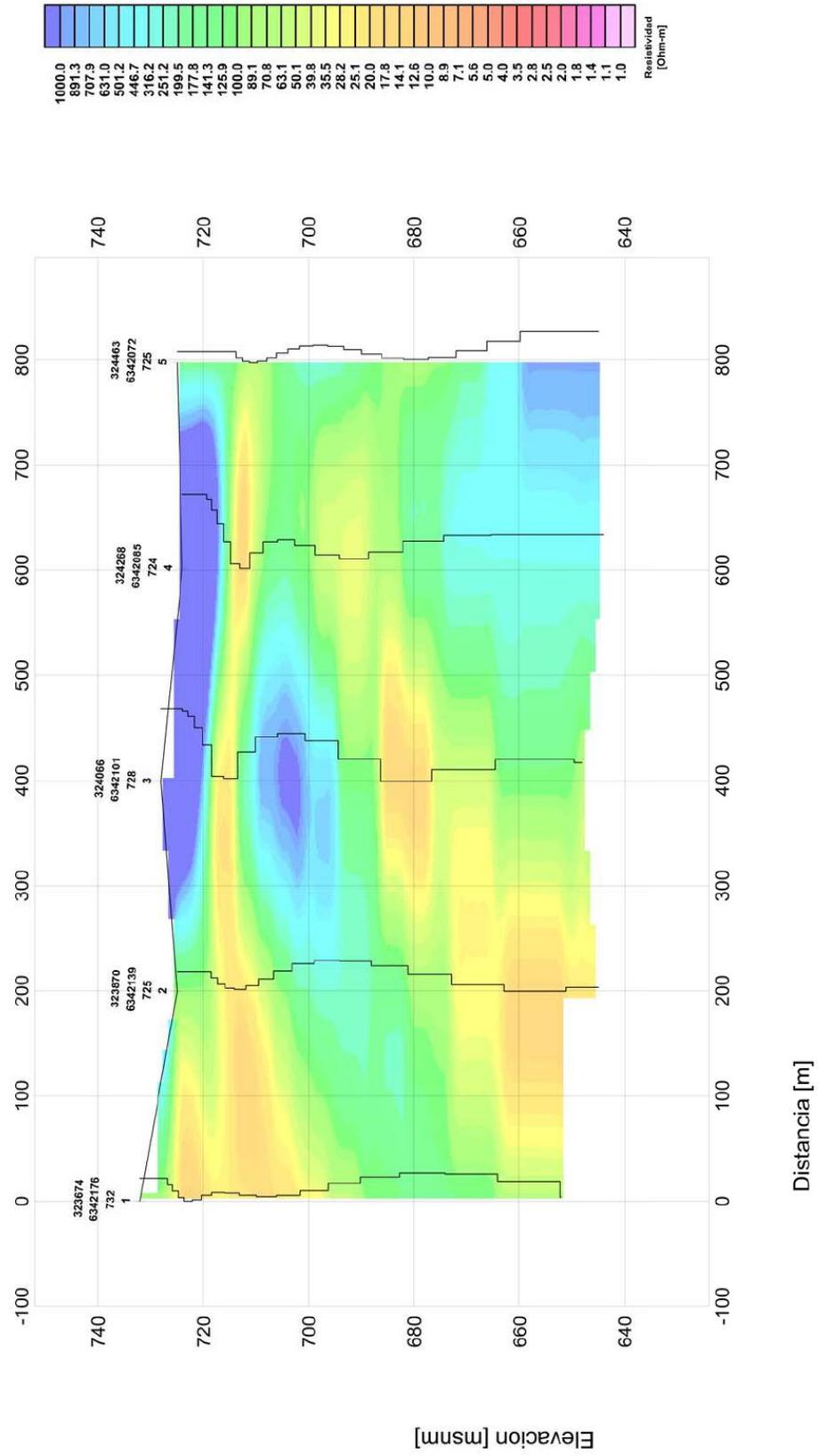


Figura B17.- Perfil NanoTEM LD.

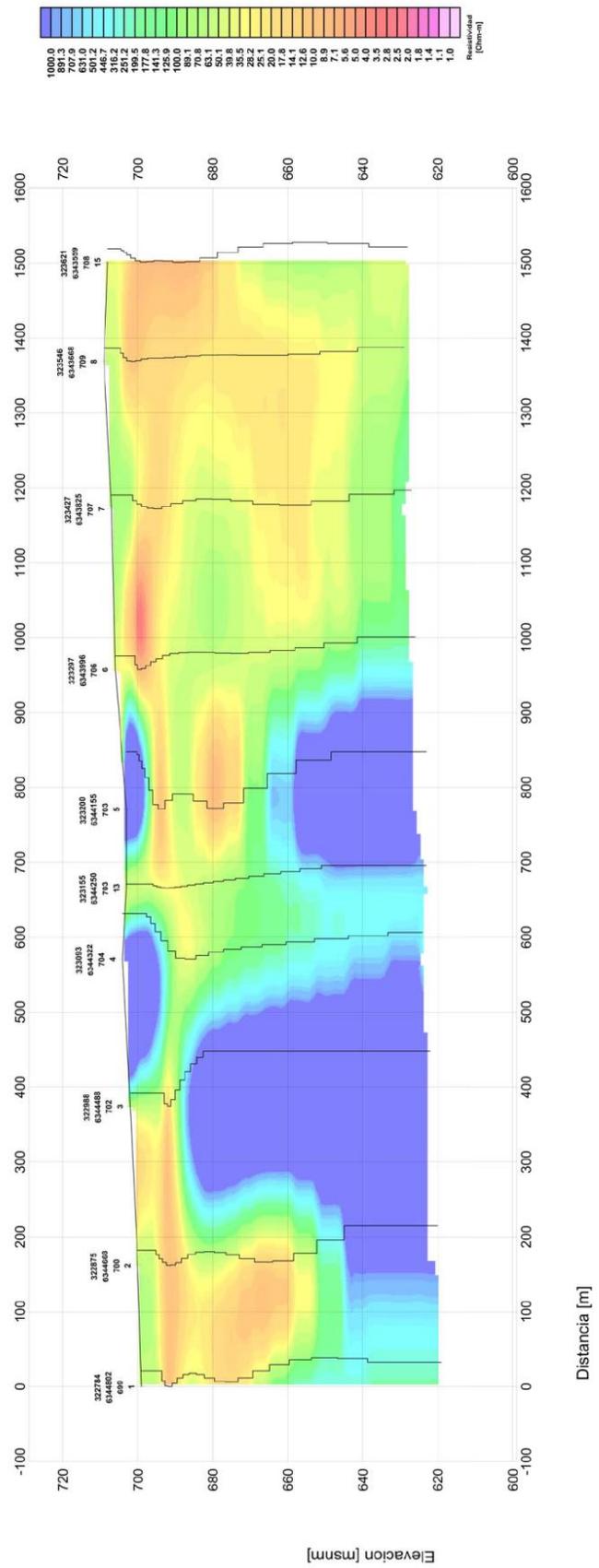


Figura B18.- Perfil NanoTEM LE.

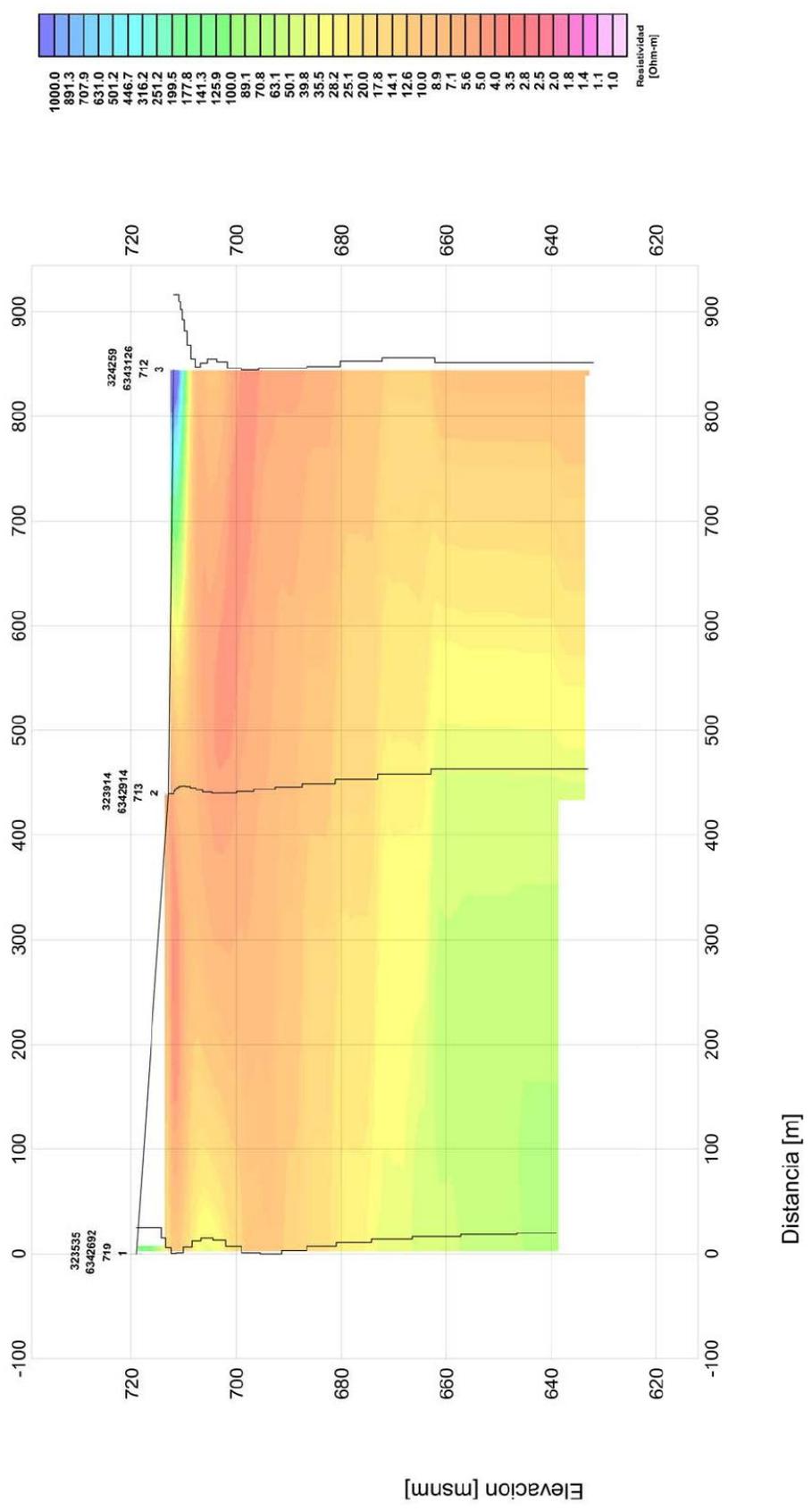


Figura B19.- Perfil NanoTEM LF.

Anexo C: Registro manual pruebas de bombeo

Tabla C1. Prueba de Gasto Variable en Noria.

Prueba de Bombeo Noria		
Proyecto:	Rungue	Caudal: 0,4 L/s
Sondaje:	Noria	Fecha / Hora
		Inicio: 25-oct-12 / 15:05
		Término: 26-oct-12 / 19:20
Tiempo	Nivel	Depresión
(min)	(m)	(m)
0	1,39	0,00
1	1,42	0,03
2	1,43	0,04
3	1,44	0,05
4	1,46	0,07
5	1,47	0,08
6	1,48	0,09
7	1,49	0,10
8	1,50	0,11
9	1,51	0,12
10	1,53	0,14
12	1,55	0,16
14	1,57	0,18
16	1,59	0,20
18	1,62	0,23
20	1,65	0,26
25	1,70	0,31
30	1,75	0,36
35	1,80	0,41
40	1,85	0,46
45	1,89	0,50
50	1,94	0,55
55	1,97	0,58
60	2,02	0,63
70	2,09	0,70
80	2,17	0,78
90	2,24	0,85
100	2,32	0,93
110	2,44	1,05
120	2,49	1,10
130	2,58	1,19
140	2,65	1,26

Prueba de Bombeo Noria		
Proyecto:	Rungue	Caudal: 0,4 L/s
Sondaje:	Noria	Fecha / Hora
		Inicio: 25-oct-12 / 15:05
		Término: 26-oct-12 / 19:20
Tiempo	Nivel	Depresión
(min)	(m)	(m)
150	2,72	1,33
160	2,81	1,42
170	2,88	1,49
180	2,95	1,56
190	3,02	1,63
200	3,10	1,71
210	3,20	1,81
220	3,30	1,91
230	3,49	2,10
240	3,50	2,11
250	3,60	2,21
255	3,64	2,25

Tabla C2. Prueba de Recuperación en Noria.

Prueba de Recuperación Noria		
Proyecto:	Rungue	Fecha / Hora Inicio: 25-oct-12 / 19:20 Término: 26-oct-12 / 15:20
Sondaje:	Noria	
Tiempo	Nivel	Depresión
(min)	(m)	(m)
0	3,64	2,25
1	3,59	2,20
2	3,58	2,19
3	3,58	2,19
4	3,57	2,19
5	3,57	2,18
6	3,56	2,18
7	3,55	2,17
8	3,55	2,16
9	3,55	2,16
10	3,54	2,16
12	3,53	2,15
14	3,52	2,14
16	3,51	2,13
18	3,5	2,12
20	3,49	2,11
25	3,47	2,10
30	3,45	2,08
35	3,42	2,06
40	3,41	2,03
45	3,39	2,02
50	3,36	2,00
55	3,35	1,97
60	3,32	1,96
70	3,28	1,93
80	3,25	1,89
90	3,21	1,86
100	3,18	1,82
110	3,15	1,79
120	3,13	1,74
780	2,13	0,74
840	2,10	0,71
900	2,05	0,66

Prueba de Recuperación Noria		
Proyecto:	Rungue	Fecha / Hora Inicio: 25-oct-12 / 19:20 Término: 26-oct-12 / 15:20
Sondaje:	Noria	
Tiempo	Nivel	Depresión
(min)	(m)	(m)
960	2,01	0,62
1020	1,98	0,59
1080	1,95	0,56
1140	1,85	0,46
1200	1,86	0,47

Tabla C3. Prueba de Gasto Variable n°1 en Pique minero.

Prueba de Bombeo N°1 Pique minero		
Proyecto:	Rungue	Caudal: 0,2 L/s
Sondaje:	Pique minero	Fecha / Hora
		Inicio: 27-oct-12 / 09:10
		Término: 27-oct-12 / 20:10
Tiempo	Nivel	Depresión
(min)	(m)	(m)
0	16,75	0,00
1	16,75	0,00
2	16,75	0,00
3	16,75	0,00
4	16,75	0,00
5	16,75	0,00
6	16,75	0,00
7	16,75	0,00
8	16,75	0,00
9	16,75	0,00
10	16,75	0,00
12	16,75	0,00
14	16,75	0,00
16	16,75	0,00
18	16,75	0,00
20	16,75	0,00
25	16,75	0,00
30	16,75	0,00
35	16,75	0,00
40	16,76	0,01
45	16,76	0,01
50	16,76	0,01
55	16,77	0,02
60	16,78	0,03
70	16,79	0,04
80	16,80	0,05
90	16,80	0,05
100	16,81	0,06
110	16,82	0,07
120	16,82	0,07
130	16,83	0,08
140	16,84	0,09
150	16,85	0,10

Prueba de Bombeo N°1 Pique minero		
Proyecto:	Rungue	Caudal: 0,2 L/s
Sondaje:	Pique minero	Fecha / Hora
		Inicio: 27-oct-12 / 09:10
		Término: 27-oct-12 / 20:10
Tiempo	Nivel	Depresión
(min)	(m)	(m)
160	16,85	0,10
170	16,86	0,11
180	16,86	0,11
210	16,89	0,14
240	16,81	0,06
270	16,93	0,18
300	16,96	0,21
330	16,99	0,24
360	17,02	0,27
420	17,08	0,33
480	17,14	0,39
540	17,20	0,45
600	17,26	0,51
660	17,28	0,53

Tabla C4. Prueba de Gasto Variable n°2 en Pique minero.

Prueba de Bombeo N°2 Pique minero		
Proyecto:	Rungue	Caudal: 0,4 L/s
Sondaje:	Pique minero	Fecha / Hora
		Inicio: 27-oct-12 / 20:10
		Término: 28-oct-12 / 09:10
Tiempo	Nivel	Depresión
(min)	(m)	(m)
0	17,28	0,53
1	17,28	0,53
2	17,28	0,53
3	17,29	0,54
4	17,29	0,54
5	17,29	0,54
6	17,30	0,55
7	17,30	0,55
8	17,30	0,55
9	17,30	0,55
10	17,31	0,56
12	17,31	0,56
14	17,32	0,57
16	17,32	0,57
18	17,32	0,57
20	17,32	0,57
25	17,34	0,59
30	17,35	0,60
35	17,35	0,60
40	17,35	0,60
45	17,37	0,62
50	17,37	0,62
55	17,37	0,62
60	17,39	0,64
70	17,42	0,67
80	17,44	0,69
90	17,46	0,71
100	17,48	0,73
110	17,50	0,75
120	17,52	0,77
130	17,56	0,81
140	17,58	0,83
150	17,60	0,85

Prueba de Bombeo N°2 Pique minero		
Proyecto:	Rungue	Caudal: 0,4 L/s
Sondaje:	Pique minero	Fecha / Hora
		Inicio: 27-oct-12 / 20:10
		Término: 28-oct-12 / 09:10
Tiempo	Nivel	Depresión
(min)	(m)	(m)
160	17,63	0,88
170	17,66	0,91
180	17,73	0,98
210	17,81	1,06
240	17,87	1,12
270	17,90	1,15
300	17,93	1,18
330	17,96	1,21
360	17,99	1,24
420	18,05	1,30
480	18,09	1,34
540	18,14	1,39
600	18,18	1,43
660	18,25	1,50
720	18,30	1,55
780	18,35	1,60

Tabla C5. Prueba de Gasto Variable n°3 en Pique minero.

Prueba de Bombeo N°3 Pique minero		
Proyecto:	Rungue	Caudal: 0,5 L/s
Sondaje:	Pique minero	Fecha / Hora
		Inicio: 28-oct-12 / 09:10
		Término: 28-oct-12 / 13:10
Tiempo	Nivel	Depresión
(min)	(m)	(m)
0	18,35	1,60
1	18,36	1,61
2	18,36	1,61
3	18,36	1,61
4	18,36	1,61
5	18,36	1,61
6	18,36	1,61
7	18,36	1,61
8	18,37	1,62
9	18,37	1,62
10	18,37	1,62
12	18,37	1,62
14	18,37	1,62
16	18,37	1,62
18	18,37	1,62
20	18,38	1,63
25	18,39	1,64
30	18,39	1,64
35	18,39	1,64
40	18,40	1,65
45	18,40	1,65
50	18,41	1,66
55	18,41	1,66
60	18,41	1,66
70	18,42	1,67
80	18,43	1,68
90	18,43	1,68
100	18,44	1,69
110	18,44	1,69
120	18,44	1,69
130	18,45	1,70
140	18,45	1,70
150	18,46	1,71

Prueba de Bombeo N°3 Pique minero		
Proyecto:	Rungue	Caudal: 0,5 L/s
Sondaje:	Pique minero	Fecha / Hora
		Inicio: 28-oct-12 / 09:10
		Término: 28-oct-12 / 13:10
Tiempo	Nivel	Depresión
(min)	(m)	(m)
160	18,46	1,71
170	18,46	1,71
180	18,46	1,71
210	18,49	1,74
240	18,51	1,76

Tabla C6. Prueba de Gasto Variable n°4 en Pique minero.

Prueba de Bombeo N°4 Pique minero		
Proyecto:	Rungue	Caudal: 1,3 L/s
Sondaje:	Pique minero	Fecha / Hora
		Inicio: 28-oct-12 / 13:10
		Término: 29-oct-12 / 13:50
Tiempo	Nivel	Depresión
(min)	(m)	(m)
0	18,51	1,76
1	18,52	1,77
2	18,52	1,77
3	18,52	1,77
4	18,53	1,78
5	18,53	1,78
6	18,53	1,78
7	18,53	1,78
8	18,53	1,78
9	18,54	1,79
10	18,54	1,79
12	18,54	1,79
14	18,55	1,80
16	18,55	1,80
18	18,55	1,80
20	18,56	1,81
25	18,56	1,81
30	18,57	1,82
35	18,58	1,83
40	18,58	1,83
45	18,59	1,84
50	18,60	1,85
55	18,62	1,87
60	18,63	1,88
70	18,64	1,89
80	18,65	1,90
90	18,66	1,91
100	18,68	1,93
110	18,71	1,96
120	18,75	2,00
130	18,79	2,04
140	18,80	2,05
150	18,82	2,07

Prueba de Bombeo N°4 Pique minero		
Proyecto:	Rungue	Caudal: 1,3 L/s
Sondaje:	Pique minero	Fecha / Hora
		Inicio: 28-oct-12 / 13:10
		Término: 29-oct-12 / 13:50
Tiempo	Nivel	Depresión
(min)	(m)	(m)
160	18,84	2,09
170	18,87	2,12
180	18,90	2,15
210	18,96	2,21
240	19,02	2,27
270	19,06	2,31
300	19,20	2,45
330	19,30	2,55
360	19,48	2,73
420	19,78	3,03
480	20,00	3,25
540	20,26	3,51
600	20,50	3,75
660	20,75	4,00
720	20,96	4,21
780	21,22	4,47
840	21,41	4,66
900	21,72	4,97
960	21,91	5,16
1020	22,09	5,34
1080	22,35	5,60
1140	22,48	5,73
1200	22,72	5,97
1260	22,85	6,10
1320	23,06	6,31
1380	23,30	6,55
1420	23,46	6,71
1480	23,71	6,96

Tabla C7. Recuperación de Gasto Variable en Pique minero.

Prueba de Recuperación Pique minero		
Proyecto:	Rungue	Fecha / Hora Inicio: 29-oct-12 / 14:30 Término: 30-oct-12 / 17:30
Sondaje:	Pique minero	
Tiempo	Nivel	Depresión
(min)	(m)	(m)
0	23,71	6,96
1	23,71	6,96
2	23,71	6,96
3	23,71	6,96
4	23,71	6,96
5	23,71	6,96
6	23,7	6,96
7	23,7	6,95
8	23,7	6,95
9	23,7	6,95
10	23,7	6,95
12	23,7	6,95
14	23,7	6,95
16	23,7	6,95
18	23,7	6,95
20	23,7	6,95
25	23,7	6,95
30	23,7	6,95
35	23,7	6,95
40	23,7	6,95
45	23,7	6,95
50	23,7	6,95
55	23,7	6,95
60	23,7	6,95
70	23,7	6,95
80	23,7	6,95
90	23,7	6,95
100	23,7	6,95
110	23,7	6,95
120	23,7	6,95
130	23,7	6,95
140	23,7	6,95
150	23,7	6,95

Prueba de Recuperación Pique minero		
Proyecto:	Rungue	Fecha / Hora Inicio: 29-oct-12 / 14:30 Término: 30-oct-12 / 17:30
Sondaje:	Pique minero	
Tiempo	Nivel	Depresión
(min)	(m)	(m)
160	23,7	6,95
170	23,7	6,95
180	23,7	6,95

Tabla C8. Prueba de Bombeo Sondaje 4.

Prueba de Bombeo Sondaje 4		
Proyecto:	Rungue	Caudal: 0,2 L/s
Sondaje:	S4	Fecha / Hora
		Inicio: 11-mar-13 / 16:30
		Término: 11-mar-13 / 16:49
Tiempo	Nivel	Depresión
(min)	(m)	(m)
0	9,1	0
1	9,97	0,87
2	10,69	1,59
3	11,45	2,35
4	12,27	3,17
5	13	3,9
6	13,92	4,82
7	15,11	6,01
8	16,27	7,17
9	17,33	8,23
10	18,6	9,5
12	20,9	11,8
14	22,98	13,88
16	25,19	16,09
18	27,15	18,05
18.4	27,67	18,57

Tabla C9. Prueba de Recuperación Sondaje 4.

Prueba de Recuperación Sondaje 4		
Proyecto:	Rungue	Fecha / Hora Inicio: 11-mar-13 / 16:49 Término: 12-mar-13 / 11:00
Sondaje:	S4	
Tiempo	Nivel	Depresión
(min)	(m)	(m)
0	27,67	18,57
1	27,61	18,51
2	27,6	18,5
3	27,6	18,5
4	27,6	18,5
5	27,6	18,5
6	27,6	18,5
7	27,6	18,5
8	27,6	18,5
9	27,6	18,5
10	27,6	18,5
12	27,6	18,5
14	27,6	18,5
16	27,6	18,5
18	27,6	18,5
20	27,59	18,49
25	27,55	18,45
30	27,55	18,45
371	24,97	15,87

Anexo D: Datos meteorológicos

Tabla D1.- Precipitaciones totales anuales según antecedentes aportados por la Dirección General de Aguas (DGA) de la estación meteorológica Embalse Rungue.

Año hidrológico	Precipitación total anual (mm)	Año hidrológico	Precipitación total anual (mm)
1944/45	575,5	1981/82	319,2
1945/46	138	1982/83	815,3
1946/47	149	1983/84	347,2
1957/58	339,5	1984/85	687,7
1958/59	395	1985/86	149,3
1959/60	393	1986/87	524,7
1960/61	264	1987/88	964
1961/62	335	1988/89	157,8
1962/63	332,5	1989/90	313
1963/64	581	1990/91	113,8
1964/65	164	1991/92	510,8
1965/66	398,7	1992/93	525
1966/67	521	1993/94	282,7
1967/68	171,5	1994/95	251,4
1968/69	66,3	1995/96	195,2
1969/70	189,4	1996/97	200,1
1970/71	340	1997/98	1069,9
1971/72	179,5	1998/99	87,9
1972/73	634,7	1999/00	266
1973/74	250,2	2000/01	517,7
1974/75	401,8	2001/02	425,7
1975/76	251,3	2002/03	823,4
1976/77	210,6	2003/04	260,6
1977/78	551	2004/05	357
1978/79	429,5	2005/06	411,2
1979/80	256,5	2010/11	114,2
1980/81	466	Promedio	371,23

Tabla D2.- Precipitaciones mensuales en mm por año hidrogeológico según antecedentes aportados por la Dirección General de Aguas (DGA) de la estación meteorológica Embalse Rungue.

Año hidrogeológico		ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR
1944	1945	0	56,5	212	20	190	0	20	0	0	0	77	0
1945	1946	16	6	0	38	14	64	0	0	0	0	0	0
1946	1947	10	10	53	18	58	0	0	0	0	0	0	0
1957	1958	0	283,5	8	48	0	0	0	0	0	0	0	0
1958	1959	0	175	82	48	68	5	0	9	0	0	0	8
1959	1960	29	41	147	96	77	3	0	0	0	0	0	0
1960	1961	0	21	160	47	30	0	0	0	0	0	0	6
1961	1962	0	25	161	24	95	12	12	0	6	0	0	0
1962	1963	0	18	281	12	7	4,5	8	0	0	0	0	2
1963	1964	0	53	54	206	155	105	2	6	0	0	0	0
1964	1965	0	0	58	43	63	0	0	0	0	0	0	0
1965	1966	16,3	19	9	109	218,5	1,5	9,9	3	12,5	0	0	0
1966	1967	46,5	6	164	216	24	0	0	30,5	34	0	0	0
1967	1968	4,5	13	38,5	57,5	11,5	46,5	0	0	0	0	0	0
1968	1969	8,5	0	10,5	3,5	21,5	22,3	0	0	0	0	0	0
1969	1970	25	18	78,4	8,5	59,5	0	0	0	0	0	0	0
1970	1971	0	94	28,5	179,5	2	19	13,5	0	0	3,5	0	0
1971	1972	16	12	105	22,5	16,5	4,5	3	0	0	0	0	0
1972	1973	2	121,2	214,5	37	178	76	3	3	0	0	0	0
1973	1974	3	53,5	35,5	134,7	0	0	23,5	0	0	0	0	0
1974	1975	0	89,6	253,1	21,1	4,6	14,9	1	17,5	0	0	0	0
1975	1976	19,7	27	3,6	144	36,5	0	2	18,5	0	0	0	0
1976	1977	2,4	29,7	43	5	33,5	37,5	38,5	21	0	0	0	0
1977	1978	9,5	21	157,5	258	66,3	0	25,7	13	0	0	0	0
1978	1979	0	7	37	285,6	3,7	26,1	0	70,1	0	0	0	0
1979	1980	14,4	21,5	0,8	122,7	20,3	29,1	0	21,9	2,3	0	23,5	0
1980	1981	120,4	67,8	45,2	139,5	13	71,4	0	2,5	1,2	0	0	5

Año hidrológico		ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR
1981	1982	0	228	28	25,5	13	11,2	6	0	0	0	0	7,5
1982	1983	0,7	164,4	263,7	222,8	102,2	24,4	11,5	0	0	25,6	0	0
1983	1984	2,6	46,5	99,7	122,7	55,5	20,2	0	0	0	0	0	0
1984	1985	0	58,4	40,2	488,7	39,5	49,6	9,3	0	0	0	0	2
1985	1986	0	35,6	19,7	57,8	6	10,2	20	0	0	0	0	0
1986	1987	21,8	172,1	146,3	0	135,4	4,6	0	44,5	0	0	0	0
1987	1988	3,5	88,9	31,2	621,4	169,5	13,1	35,9	0	0	0	0	0,5
1988	1989	0	2,5	15,7	33,8	71	12	0	21,4	1,4	0	0	0
1989	1990	11,6	21,4	16,2	153,5	91,7	8,4	1,5	0	0	0	0	8,7
1990	1991	0	3	0	41,5	36,5	29,8	3	0	0	0	0	0
1991	1992	4	98,6	201,7	72,5	4,3	83,2	11,6	0	3,3	0	0	31,6
1992	1993	26,5	166,4	215,3	12,6	73,1	24,5	0	6,6	0	0	0	0
1993	1994	89,6	81,4	45,6	41,1	20	1,2	2,4	0	1,4	0	0	0
1994	1995	2	80,5	23,3	110,3	8	25,8	1,5	0	0	0	0	0
1995	1996	17,2	2,5	44,1	58,1	52,5	20,8	0	0	0	0	0	0
1996	1997	29	13,5	37,5	69,3	42	0	7,3	0	0	0	0	1,5
1997	1998	0	181	492,8	45	167,8	83,1	74	3,2	6,5	0	16,5	0
1998	1999	30	5	30,7	0,5	0	1,5	0	0	0	2,9	0	17,3
1999	2000	7,5	13,3	49,1	14,8	71,8	98,5	6,5	0	0	0	4,5	0
2000	2001	8	19	347,1	24	0	119	0	0	0	0	0	0,6
2001	2002	5,6	39,4	0,9	315,1	53,8	8,2	1,9	0,3	0	0	0	0,5
2002	2003	4,5	219,5	333,5	172,7	78,9	13	0	0	0,3	1	0	0
2003	2004	0	92,8	60,9	67,3	4,7	6,9	0	6	0	0	0	22
2004	2005	44	14	49	77,5	79,5	25,5	0,5	46	0	0	0	21
2005	2006	3	56,5	151	31,1	135	18,5	7	9,1	0	0	0	0
2010	2011	0	20,2	15,1	43,7	2,4	5	10,1	13	0	0	4,7	0
	Promedio	12,3	60,6	98,1	99,4	56,2	23,8	7,0	6,9	1,3	0,6	2,4	2,5
	Min	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Max	120	283,5	492,8	621,4	218,5	119	74	70,1	34	25,6	77	31,6

Tabla D3.- Precipitación máxima en 24 hrs. por año según antecedentes aportados por la Dirección General de Aguas (DGA) de la estación meteorológica Embalse Rungue.

Año	Precipitación máxima en 24 horas (mm)	Año	Precipitación máxima en 24 horas (mm)
1944	63,00	1981	84,00
1945	77,00	1982	106,50
1946	53,00	1983	52,00
1957	118,50	1984	125,00
1958	65,00	1985	19,50
1959	85,00	1986	92,10
1960	63,00	1987	97,00
1961	47,00	1988	29,30
1962	135,00	1989	63,00
1963	92,00	1990	26,60
1964	36,00	1991	58,20
1965	94,00	1992	76,00
1966	75,00	1993	36,50
1967	35,00	1994	50,00
1968	14,20	1995	50,50
1969	35,00	1996	46,50
1970	59,00	1997	115,00
1971	53,00	1998	23,20
1972	67,00	1999	44,00
1973	86,00	2000	71,50
1974	52,20	2001	117,50
1975	41,40	2002	154,50
1976	27,50	2003	72,00
1977	61,00	2004	50,00
1978	67,50	2005	49,00
1979	78,00	2010	30,80
1980	75,00		

Tabla D4.- Evaporación mensual en mm según antecedentes aportados por la Dirección General de Aguas (DGA) de la estación meteorológica Embalse Rungue.

Año	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	Evaporación total anual
1966	338,4	238,7	192,1	89,6	66,9	25,6	31,8	51,8	83,8	155,6	218,4	253,8	1746,50
1967	281,9	259,3	220,8	135,4	68,7	32,3	34,1	54,3	80	167	210,2	304,1	1848,10
1969	328,7	249,5	126,7	131,4	63,3	27,3	40,6	52,3	106,4	167	244,8	331,7	1869,70
1970	325,9	269,5	219,4	152,1	53,5	25,5	30,7	62,8	110,3	158,5	248,3	286,2	1942,70
1971	272,7	237,4	188	113,1	67,1	26,1	44,4	53	108	181,2	259,2	299,1	1849,30
1973	318,4	232,8	182	110,5	58,3	31,7	25,2	63,3	99,4	145,3	231,6	285,5	1784,00
1974	315	258,1	199,3	132,7	76,7	27,2	28,5	66,1	97,1	157,5	226,5	256,3	1841,00
1976	290,2	223,3	189,5	123,7	91,9	21,8	40,8	48,1	85,1	125,4	211,6	282,8	1734,20
1980	344,7	223,5	195,2	75,6	27,9	17,8	17,1	39,9	63	104,9	172,2	234,3	1516,10
1981	242,1	219,9	175,8	102,9	25,8	22,5	26,4	48,2	81,9	135,7	206,7	270,5	1558,40
1982	268,9	207,4	175,3	85,8	34,9	11,7	17,6	31	52,8	117,4	170	218	1390,80
1983	218,3	186,1	157,8	86,3	39	16,1	19,1	29,3	63,8	132,4	176,7	222,7	1347,60
1984	234,3	204,5	136	97	34,8	20,4	20,8	34,5	51,2	113,5	152,8	200,9	1300,70
1985	217	187,5	155,9	68,4	35,6	24,1	18,7	38,3	63,9	111,3	185,5	222,9	1329,10
1986	241,6	186	167,9	74,8	34,5	12	24,1	24,9	47,2	114,9	139,5	156,5	1223,90
1987	223,6	186,4	150,1	93,8	29,5	20	10	24,3	59,3	86,6	155,2	236	1274,80
1988	257,6	196,8	134,7	76,2	43	30,4	26,1	34,5	74,6	141,7	181,8	240,5	1437,90
1989	256,7	208,6	149,5	91,8	26,9	26,6	22,6	23,2	60,6	130,4	187	235	1418,90
1990	272,9	202	174,4	121,9	64,8	43,4	31	46	58,2	110,8	201,7	247	1574,10
1992	220,6	175,5	125,1	47,2	24	15,2	20,7	24,2	49,8	99,5	138,2	214,3	1154,30
1993	218,7	177,4	155,1	69	24,9	23,1	24,3	43,5	58	106	189,5	212,6	1302,10
1994	225	177,7	146,3	76,1	43,4	19,4	18,5	30	60,3	96,6	167,7	266	1327,00
1995	289,3	225,1	192,5	118,4	44,4	19,4	8,8	28,4	47,5	100,3	181,3	285,6	1541,00
1996	255,8	183,4	169,8	40,5	34,5	26	26,1	24,5	55,5	113,8	232,6	274,1	1436,60
1997	269,1	220,8	145,9	87,5	42,5	12,2	25,2	31,3	32,8	70,5	103,5	184,8	1226,10
1998	247,2	156,4	136,2	54,1	54	38,8	39,5	49,8	75,1	197,8	188	238,9	1475,80
1999	237,3	227,1	127,3	91,3	52,8	24,1	27,9	29,2	32,8	92,3	164,6	241,6	1348,30
2000	275,8	228,9	177,2	80,5	49	19,8	23,9	41,7	46,8	81	84,4	130	1239,00
2001	152,9	152,7	131,3	81,2	36,6	36,2	22,5	39,2	87,9	142	171,3	268,6	1322,40
2002	266,8	165,9	181,4	88,4	52,8	6,3	24,7	20,1	40	74,9	113,5	153,2	1188,00
2003	219,3	207,4	150,8	86,7	34,1	16	18,9	53,9	79,6	111,5	156	219,3	1353,50
2004	209,2	69,8	179,5	38,2	14,7	28,2	19,7	34,2	58,4	94,7	132	207	1085,60
2005	241,9	196,7	139,2	99,4	46,2	12,1	21,7	26,1	52	94,4	153,5	198,8	1282,00
Promedio	259,9	204,3	165,1	91,6	45,4	23,0	25,2	39,5	67,4	122,2	180,5	238,7	1462,7
Min	152,9	69,8	125,1	38,2	14,7	6,3	8,8	20,1	32,8	70,5	84,4	130,0	1085,6
Max	344,7	269,5	220,8	152,1	91,9	43,4	44,4	66,1	110,3	197,8	259,2	331,7	1942,7

Tabla D5.- Temperaturas mensuales en mm según antecedentes aportados por la Dirección General de Aguas (DGA) de la estación meteorológica Embalse Rungue.

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	Promedio anual
1966	18,27	16,13	14,66	12,07	10,73	7,16	7,09	7,65	9,74	12,16	14,1	14,47	12,02
1967	18,02	18,13	15,11	13,03	9,79	4,55	5,58	7,38	8,68	12,95	15,37	19,5	12,34
1968	20,52	19,54	16,05	12,85	10,45	7,22	7,36	10	11,75	12,87	16,77	18,27	13,64
1969	20,31	18,64	20,15	13,51	11,46	8,01	8,41	9,48	11,27	12,28	15,03	20,26	14,07
1970	19,03	21,05	18,92	14,9	10,63	6,09	7,37	7,75	10,5	13,54	15,94	18,4	13,68
1971	18,7	18,54	14,81	11,08	11,61	8,09	10,37	8,79	11,33	15,28	19,02	19,9	13,96
1973	21,26	20,09	18,29	14,77	12,09	7,82	7,72	7,26	8,84	11,33	15,8	17,31	13,55
1974	18,88	17,03	12,97	10,63	7,67	3,99	2,52	7,31	9,01	12,77	14,54	17,1	11,20
1977	22,9	22,41	20,65	17,59	14,32	8,8	7,58	8,78	11,24	13,82	16,82	18,4	15,28
1978	19,45	19,67	16,63	13,88	11,87	8,79	9,48	7,12	10,37	15,24	17,51	20,37	14,20
1979	21,43	20,26	18,67	14,91	12,55	8,36	10,68	11,76	11,19	14,58	17,11	20,21	15,14
1980	22,16	21,14	20,58	15,85	12,85	9,2	9,23	8,25	12,2	14,46	16,76	18,8	15,12
1981	18,95	19,97	17,81	14,96	13,15	8,73	8,56	10,12	11,4	13,55	16,7	18,73	14,39
1982	19,08	19,76	18,67	15,06	11,14	9,51	10,3	10,52	12,34	14,49	17,01	21,18	14,92
1983	21,48	22,01	19,53	16,37	12,14	7,96	7,89	9,65	11,29	15,84	18,73	20,7	15,30
1984	21,2	19,49	18,66	15,1	9,33	6,78	8,68	8,98	12,15	14,69	15,93	19,48	14,21
1985	20,62	20,22	18,17	13,6	12,04	10,78	8,33	8,27	12,8	14,83	17,91	19,3	14,74
1986	20,81	20,73	18,46	14,57	12,89	9,92	9,71	10,08	11,62	16,1	16	21,19	15,17
1987	22,24	22,38	19,92	14,16	10,34	10,2	8,91	9,94	11,98	15,52	18,98	20,02	15,38
1988	20,9	21,6	18,73	15,51	10,75	9,14	8,89	10,49	11,19	14,62	18,2	20,47	15,04
1989	22,73	22,42	18,82	16,05	11,67	10,48	8,37	10,3	10,98	14,12	17,8	22,73	15,54
1990	21,5	20,58	17,81	14,74	11,14	10,16	8,48	10,9	11,6	13,83	17,84	19,92	14,88
1991	20,63	21,05	19,03	16,02	13,89	10,25	9,03	8,73	12,21	13,21	17,12	18,59	14,98
1992	21,65	20,01	18,9	14,29	11,26	7,94	7,13	10,11	11,65	14,87	17,23	19,24	14,52
1993	21,24	21,14	19,32	14,64	9,43	9,74	6,66	9,18	10,25	14,31	16,5	19,85	14,36
1994	21,59	20,44	19,38	16,28	12,07	10,17	8,98	8,92	13,29	14,25	18,18	20,75	15,36
1995	21,36	20,15	18,19	15,74	13,07	10,56	7,48	7,79	12,27	14,58	18,83	22,37	15,20
1996	21,41	21,48	20,05	14,69	13	10,3	11,07	10,82	12,36	15,53	19,11	20,6	15,87
1997	22,43	22,04	20,12	17,79	13,53	10,53	10,89	11,84	13,44	14,09	17,52	19,75	16,16
1998	21,67	20,93	19,15	15,46	13,32	10,82	9,18	10,3	12,13	16,73	17,77	20,94	15,70
1999	21,09	21,82	18,35	14,92	12,14	9,83	8,26	9,88	11,14	14,1	17,34	19,61	14,87
2000	20,63	20,12	18,33	14,57	11,25	9,41	8,95	10,66	12,6	15,58	17,7	21,31	15,09
2001	21,16	22,16	19,83	14,91	11,74	9,16	10,58	11,04	11,02	15,3	17,07	22,1	15,51
2002	22,29	21,77	18,91	15,07	12,52	8,07	9,01	10,51	12,6	15,03	17,87	20	15,30
2003	21,37	20,36	20,07	16,16	11,17	10,96	8,19	9,33	13,79	16,11	18,86	21,04	15,62
2004	23,88	22,16	20,4	15,08	10,49	9,91	9,54	9,49	12,93	14,36	17,73	20,39	15,53
2005		21,26	19,49	15,84	11,82	11,75	9,52	11,69	10,66	14,44	17,92	19,52	14,90
Promedio mensual	20,91	20,50	18,48	14,77	11,66	8,95	8,54	9,49	11,51	14,36	17,21	19,80	14,68

Anexo E: Perfiles hidrogeológicos

Los perfiles hidrogeológicos fueron estructurados en base a la información topográfica disponible y a los niveles freáticos de los 5 sondajes que se ubican dentro del predio del proyecto medidos el día 19 de junio de 2013. El nivel freático, ubicación y cota de cada sondaje se muestra en la siguiente tabla.

Tabla E1.- Características sondajes.

Sondaje	Nivel freático (m)	Coordenadas (UTM WGS84 H19S)		Cota medición (m s.n.m.)	Cota nivel de agua (m s.n.m.)
		Este	Norte		
S1	24,24	323.153,329	6.342.586,237	742,262	718,022
S2	12,75	322.677,983	6.342.331,034	751,936	739,186
S3	14,56	323.640,653	6.341.826,938	758,356	743,796
S4	9,21	323.092,725	6.341.693,122	765,95	756,740
S5	12,13	323.149,656	6.341.955,686	756,345	744,215

A continuación, se presenta el mapa con la ubicación de dichos perfiles y luego, los perfiles hidrogeológicos, donde en color amarillo se ilustra la zona no saturada y en color celeste la zona saturada.

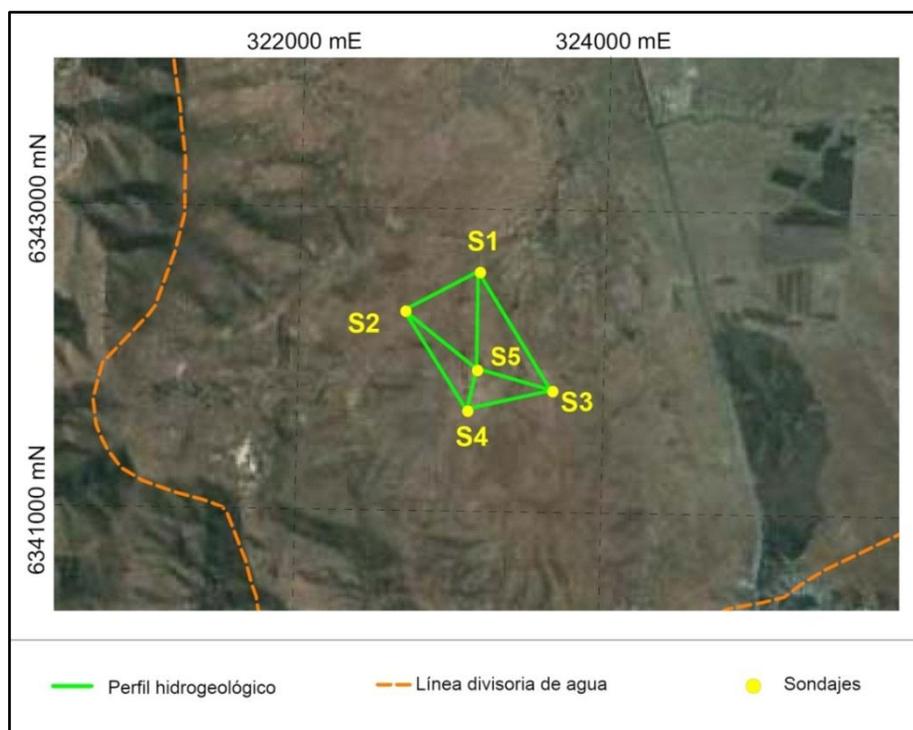


Figura E1.- Mapa ubicación sondajes y perfiles hidrogeológicos. Sistema de coordenadas UTM WGS84, huso 19 Sur.

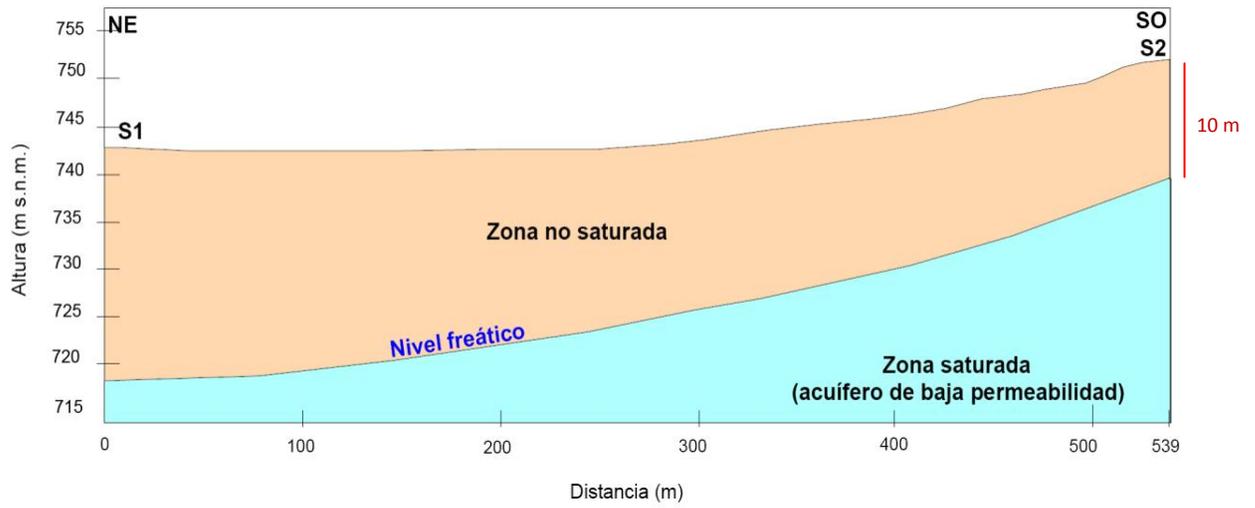


Figura E2.- Perfil hidrogeológico S1-S2.

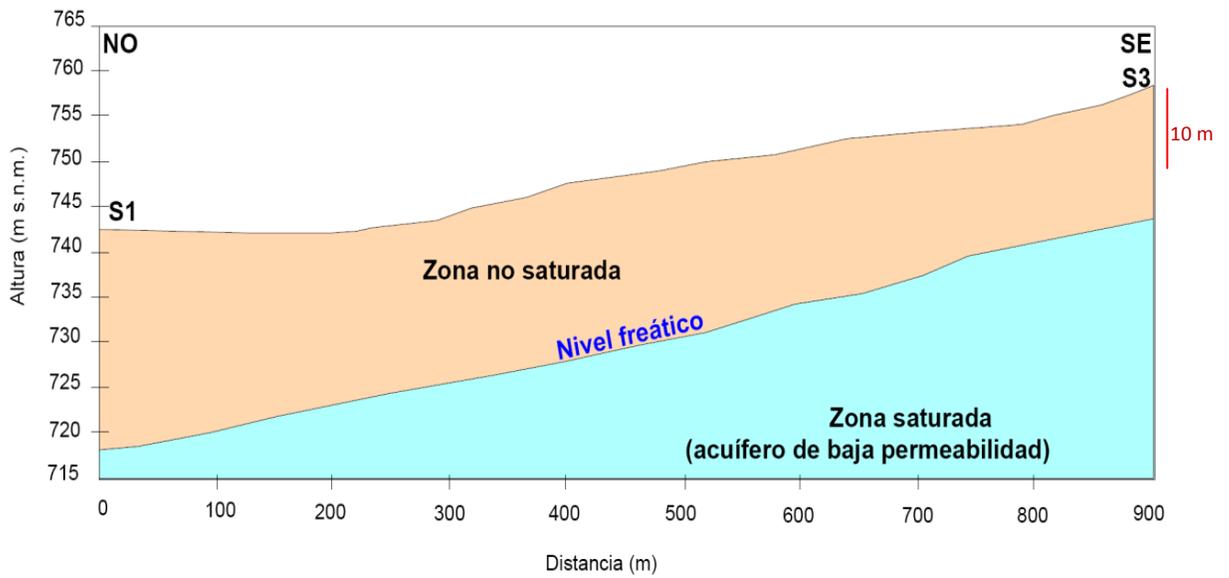


Figura E3.- Perfil hidrogeológico S1-S3.

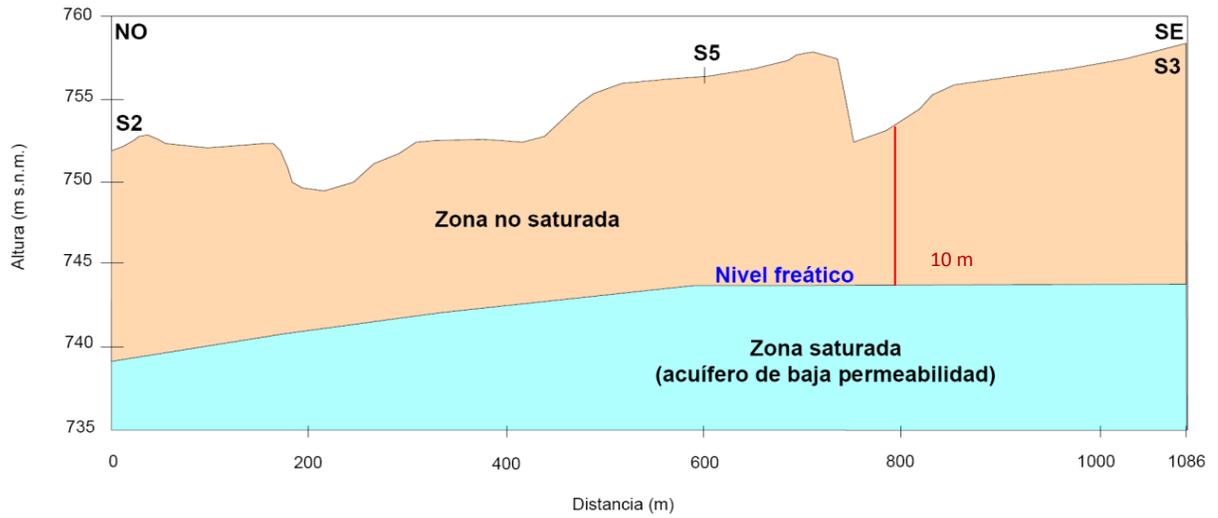


Figura E4.- Perfil hidrogeológico S2-S3.

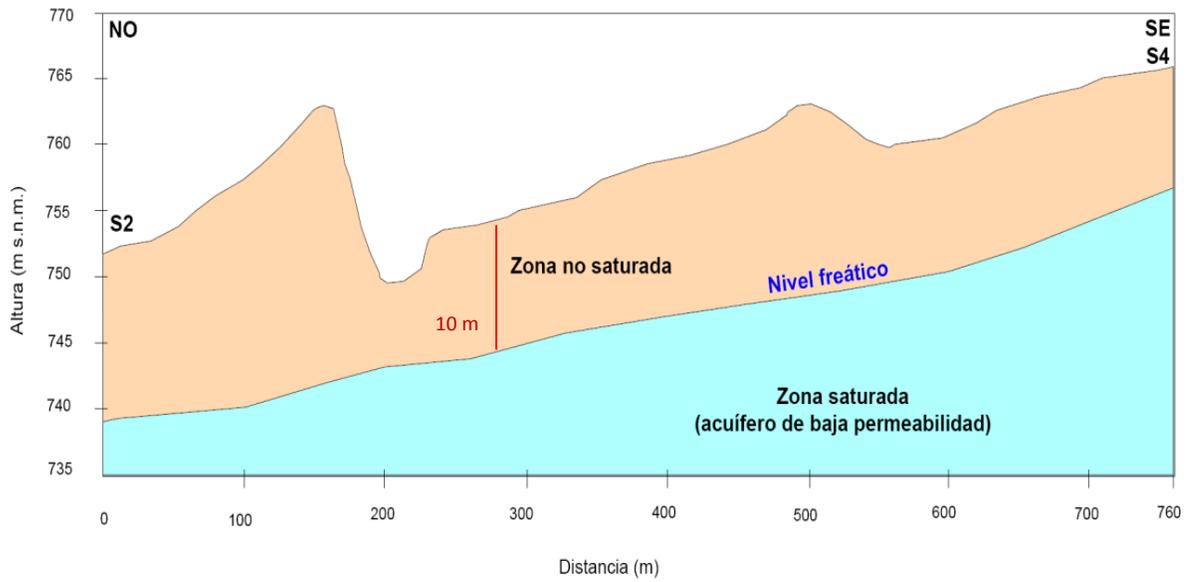


Figura E5.- Perfil hidrogeológico S2-S4.

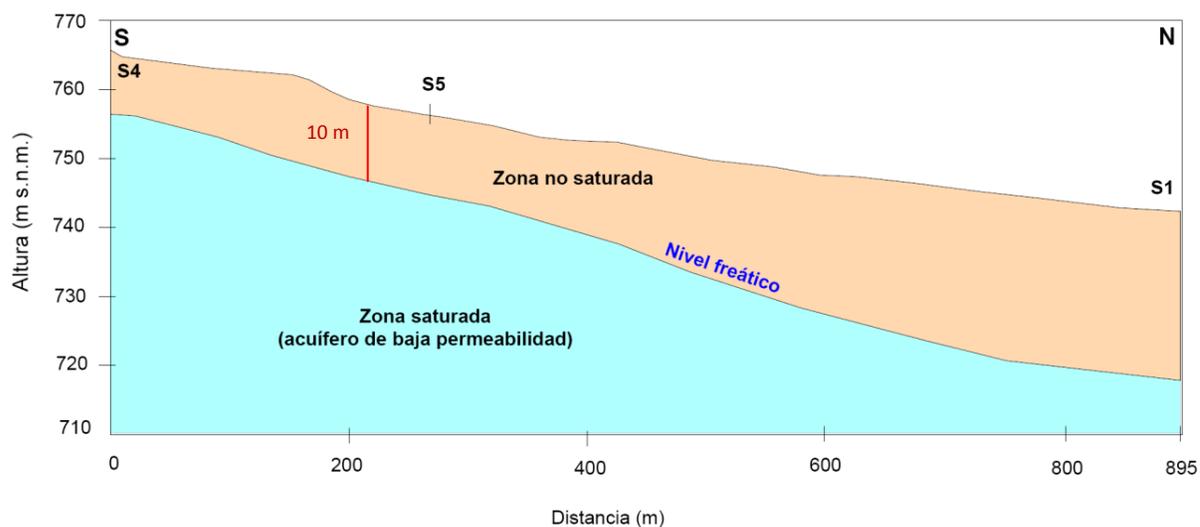


Figura E6.- Perfil hidrogeológico S4-S1.

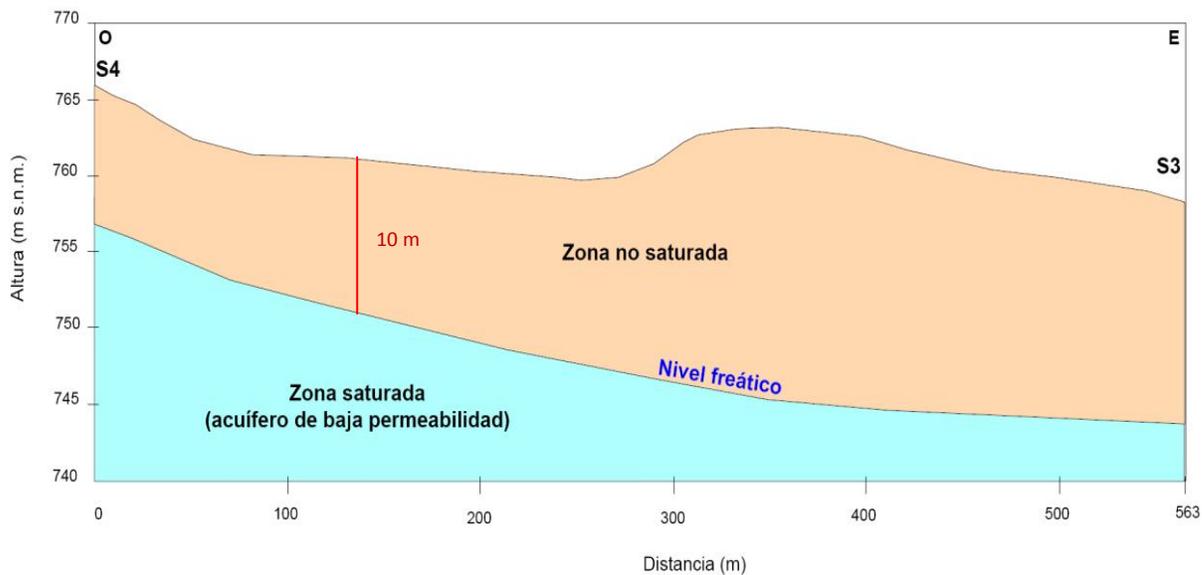


Figura E7.- Perfil hidrogeológico S4-S3.

Anexo F: Resultados análisis químico y comparación con normativas chilenas

Tabla F1.- Resultados análisis químico muestra P1C1 y comparación con Norma NCh1.333 para Riego.

	P1 C1	NCh 1.333 Riego
Aluminio (mg/L)	0,19	5
Arsénico (mg/L)	<0,006	0,1
Bario (mg/L)	<0,01	4
Berilio (mg/L)	<0,01	0,1
Boro (mg/L)	0,08	0,75
Cadmio (mg/L)	<0,002	0,01
Cianuro (mg/L)	<0,05	0,2
Cloruros (mg/L)	52,8	200
Cobalto (mg/L)	<0,01	0,05
Cobre (mg/L)	<0,01	0,2
Cromo (mg/L)	<0,01	0,1
Fluoruro (mg/L)	0,1	1
Hierro (mg/L)	<0,03	5
Litio (mg/L)	0,03	2,5
Manganeso (mg/L)	<0,01	0,2
Mercurio (mg/L)	<0,001	0,001
Molibdeno (mg/L)	<0,01	0,01
Níquel (mg/L)	<0,01	0,2
ph	6,92	5,5 - 9
Plata (mg/L)	<0,01	0,2
Plomo (mg/L)	<0,002	5
Selenio (mg/L)	<0,004	0,02
Sodio Porcentual (%)	17,9	35
Sulfatos (mg/L)	59	250
Vanadio (mg/L)	<0,01	0,1
Zinc (mg/L)	<0,01	2
RAS	0,72	
Δ Conductividad Espec. (µmho/cm)	651	
Sólidos disueltos totales (mg/L)	472	
Coliformes fecales (NMP/100ml)	22	1000
Nitrato (mg/L)	30,4	
Bicarbonato (mg/L) (CaCO ₃)	284,09	
Calcio (mg/L)	74,5	
Magnesio (mg/L)	27,2	
Potasio (mg/L)	1,97	
Sodio (mg/L)	19,8	

Tabla F2.- Resultados análisis químico muestra P2C1 y comparación con Norma NCh1.333 para Riego.

	P2 C1	NCh 1.333 Riego
Aluminio (mg/L)	0,11	5
Arsénico (mg/L)	<0,006	0,1
Bario (mg/L)	<0,01	4
Berilio (mg/L)	<0,01	0,1
Boro (mg/L)	0,12	0,75
Cadmio (mg/L)	<0,002	0,01
Cianuro (mg/L)	<0,05	0,2
Cloruros (mg/L)	67,2	200
Cobalto (mg/L)	<0,01	0,05
Cobre (mg/L)	<0,01	0,2
Cromo (mg/L)	<0,01	0,1
Fluoruro (mg/L)	0,2	1
Hierro (mg/L)	<0,03	5
Litio (mg/L)	0,05	2,5
Manganeso (mg/L)	0,06	0,2
Mercurio (mg/L)	<0,001	0,001
Molibdeno (mg/L)	<0,01	0,01
Níquel (mg/L)	<0,01	0,2
ph	7,81	5,5 - 9
Plata (mg/L)	<0,01	0,2
Plomo (mg/L)	<0,002	5
Selenio (mg/L)	<0,004	0,02
Sodio Porcentual (%)	17,2	35
Sulfatos (mg/L)	149,5	250
Vanadio (mg/L)	<0,01	0,1
Zinc (mg/L)	<0,01	2
RAS	0,84	
Δ Conductividad Espec. (µmho/cm)	939	
Sólidos disueltos totales (mg/L)	698	
Coliformes fecales (NMP/100ml)	<2	1000
Nitrato (mg/L)	1,3	
Bicarbonato (mg/L) (CaCO3)	389,42	
Calcio (mg/L)	108,8	
Magnesio (mg/L)	38,5	
Potasio (mg/L)	2,95	
Sodio (mg/L)	31,1	

Tabla F3.- Resultados análisis químico muestra P3C1 y comparación con Norma NCh1.333 para Riego.

	P3 C1	NCh 1.333 Riego
Aluminio (mg/L)	0,11	5
Arsénico (mg/L)	<0,006	0,1
Bario (mg/L)	<0,01	4
Berilio (mg/L)	<0,01	0,1
Boro (mg/L)	0,3	0,75
Cadmio (mg/L)	<0,002	0,01
Cianuro (mg/L)	<0,05	0,2
Cloruros (mg/L)	22,3	200
Cobalto (mg/L)	<0,01	0,05
Cobre (mg/L)	0,03	0,2
Cromo (mg/L)	<0,01	0,1
Fluoruro (mg/L)	0,1	1
Hierro (mg/L)	<0,03	5
Litio (mg/L)	0,02	2,5
Manganeso (mg/L)	0,12	0,2
Mercurio (mg/L)	<0,001	0,001
Molibdeno (mg/L)	<0,01	0,01
Níquel (mg/L)	<0,01	0,2
ph	7,44	5,5 - 9
Plata (mg/L)	<0,01	0,2
Plomo (mg/L)	<0,002	5
Selenio (mg/L)	<0,004	0,02
Sodio Porcentual (%)	11,5	35
Sulfatos (mg/L)	252,1	250
Vanadio (mg/L)	<0,01	0,1
Zinc (mg/L)	<0,01	2
RAS	0,52	
Δ Conductividad Espec. (µmho/cm)	866	
Sólidos disueltos totales (mg/L)	636	
Coliformes fecales (NMP/100ml)	8	1000
Nitrato (mg/L)	11	
Bicarbonato (mg/L) (CaCO3)	213,86	
Calcio (mg/L)	117,7	
Magnesio (mg/L)	23,9	
Potasio (mg/L)	1,92	
Sodio (mg/L)	24,7	

Tabla F4.- Resultados análisis químico muestra P1C2 y comparación con Norma NCh1.333 para Riego.

	P1 C2	NCh 1.333 Riego
Aluminio (mg/L)	<0,01	5
Arsénico (mg/L)	<0,006	0,1
Bario (mg/L)	<0,01	4
Berilio (mg/L)	<0,01	0,1
Boro (mg/L)	0,24	0,75
Cadmio (mg/L)	<0,003	0,01
Cianuro (mg/L)	<0,05	0,2
Cloruros (mg/L)	64,4	200
Cobalto (mg/L)	<0,01	0,05
Cobre (mg/L)	<0,01	0,2
Cromo (mg/L)	<0,01	0,1
Fluoruro (mg/L)	<0,1	1
Hierro (mg/L)	<0,03	5
Litio (mg/L)	0,03	2,5
Manganeso (mg/L)	<0,01	0,2
Mercurio (mg/L)	<0,001	0,001
Molibdeno (mg/L)	<0,01	0,01
Níquel (mg/L)	<0,01	0,2
ph	7,53	5,5 - 9
Plata (mg/L)	0,01	0,2
Plomo (mg/L)	<0,003	5
Selenio (mg/L)	<0,004	0,02
Sodio Porcentual (%)	12,3	35
Sulfatos (mg/L)	84,5	250
Vanadio (mg/L)	<0,01	0,1
Zinc (mg/L)	<0,01	2
RAS	0,51	
Δ Conductividad Espec. (µmho/cm)	674	
Sólidos disueltos totales (mg/L)	440	
Coliformes fecales (NMP/100ml)	140	1000
Nitrato (mg/L)	19,8	
Bicarbonato (mg/L) (CaCO3)	275,18	
Calcio (mg/L)	78,3	
Magnesio (mg/L)	28,7	
Potasio (mg/L)	1,52	
Sodio (mg/L)	20,9	

Tabla F5.- Resultados análisis químico muestra P2C2 y comparación con Norma NCh1.333 para Riego.

	P2 C2	NCh 1.333 Riego
Aluminio (mg/L)	<0,01	5
Arsénico (mg/L)	<0,006	0,1
Bario (mg/L)	0,02	4
Berilio (mg/L)	<0,01	0,1
Boro (mg/L)	0,13	0,75
Cadmio (mg/L)	<0,003	0,01
Cianuro (mg/L)	<0,05	0,2
Cloruros (mg/L)	95	200
Cobalto (mg/L)	<0,01	0,05
Cobre (mg/L)	<0,01	0,2
Cromo (mg/L)	<0,01	0,1
Fluoruro (mg/L)	0,2	1
Hierro (mg/L)	<0,03	5
Litio (mg/L)	0,04	2,5
Manganeso (mg/L)	0,45	0,2
Mercurio (mg/L)	<0,001	0,001
Molibdeno (mg/L)	<0,01	0,01
Níquel (mg/L)	<0,01	0,2
ph	7,65	5,5 - 9
Plata (mg/L)	0,01	0,2
Plomo (mg/L)	<0,003	5
Selenio (mg/L)	<0,004	0,02
Sodio Porcentual (%)	17,4	35
Sulfatos (mg/L)	145,2	250
Vanadio (mg/L)	<0,01	0,1
Zinc (mg/L)	<0,01	2
RAS	0,89	
Δ Conductividad Espec. (µmho/cm)	958	
Sólidos disueltos totales (mg/L)	674	
Coliformes fecales (NMP/100ml)	300	1000
Nitrato (mg/L)	<0,5	
Bicarbonato (mg/L) (CaCO3)	389,84	
Calcio (mg/L)	109,8	
Magnesio (mg/L)	38,9	
Potasio (mg/L)	2,97	
Sodio (mg/L)	42,5	

Tabla F6.- Resultados análisis químico muestra P3C2 y comparación con Norma NCh1.333 para Riego.

	P3 C2	NCh 1.333 Riego
Aluminio (mg/L)	<0,01	5
Arsénico (mg/L)	<0,006	0,1
Bario (mg/L)	0,06	4
Berilio (mg/L)	<0,01	0,1
Boro (mg/L)	2,66	0,75
Cadmio (mg/L)	<0,003	0,01
Cianuro (mg/L)	<0,05	0,2
Cloruros (mg/L)	36,4	200
Cobalto (mg/L)	<0,01	0,05
Cobre (mg/L)	<0,01	0,2
Cromo (mg/L)	<0,01	0,1
Fluoruro (mg/L)	0,1	1
Hierro (mg/L)	<0,03	5
Litio (mg/L)	0,01	2,5
Manganeso (mg/L)	0,11	0,2
Mercurio (mg/L)	<0,001	0,001
Molibdeno (mg/L)	<0,01	0,01
Níquel (mg/L)	<0,01	0,2
ph	7,61	5,5 - 9
Plata (mg/L)	0,01	0,2
Plomo (mg/L)	<0,003	5
Selenio (mg/L)	<0,004	0,02
Sodio Porcentual (%)	18,2	35
Sulfatos (mg/L)	211	250
Vanadio (mg/L)	<0,01	0,1
Zinc (mg/L)	<0,01	2
RAS	0,82	
Δ Conductividad Espec. (µmho/cm)	790	
Sólidos disueltos totales (mg/L)	536	
Coliformes fecales (NMP/100ml)	300	1000
Nitrato (mg/L)	9,4	
Bicarbonato (mg/L) (CaCO3)	205,3	
Calcio (mg/L)	99,2	
Magnesio (mg/L)	21,3	
Potasio (mg/L)	1,26	
Sodio (mg/L)	34,5	

Tabla F7.- Resultados análisis químico muestra P1C3 y comparación con Norma NCh1.333 para Riego.

	P1 C3	NCh 1.333 Riego
Aluminio (mg/L)	<0,01	5
Arsénico (mg/L)	<0,006	0,1
Bario (mg/L)	<0,01	4
Berilio (mg/L)	<0,01	0,1
Boro (mg/L)	0,51	0,75
Cadmio (mg/L)	<0,0015	0,01
Cianuro (mg/L)	<0,05	0,2
Cloruros (mg/L)	27,2	200
Cobalto (mg/L)	<0,01	0,05
Cobre (mg/L)	<0,01	0,2
Cromo (mg/L)	<0,01	0,1
Fluoruro (mg/L)	0,1	1
Hierro (mg/L)	<0,03	5
Litio (mg/L)	0,03	2,5
Manganeso (mg/L)	0,01	0,2
Mercurio (mg/L)	<0,001	0,001
Molibdeno (mg/L)	0,01	0,01
Níquel (mg/L)	<0,01	0,2
ph	7,01	5,5 - 9
Plata (mg/L)	<0,01	0,2
Plomo (mg/L)	<0,003	5
Selenio (mg/L)	<0,004	0,02
Sodio Porcentual (%)	15,4	35
Sulfatos (mg/L)	110,4	250
Vanadio (mg/L)	<0,01	0,1
Zinc (mg/L)	0,05	2
RAS	0,63	
Δ Conductividad Espec. (µmho/cm)	635	
Sólidos disueltos totales (mg/L)	385	
Coliformes fecales (NMP/100ml)	800	1000
Nitrato (mg/L)	51,2	
Bicarbonato (mg/L) (CaCO3)	259,81	
Calcio (mg/L)	71,9	
Magnesio (mg/L)	29,8	
Potasio (mg/L)	1,4	
Sodio (mg/L)	25,4	

Tabla F8.- Resultados análisis químico muestra P2C3 y comparación con Norma NCh1.333 para Riego.

	P2 C3	NCh 1.333 Riego
Aluminio (mg/L)	<0,01	5
Arsénico (mg/L)	<0,006	0,1
Bario (mg/L)	0,05	4
Berilio (mg/L)	<0,01	0,1
Boro (mg/L)	0,17	0,75
Cadmio (mg/L)	<0,0015	0,01
Cianuro (mg/L)	<0,05	0,2
Cloruros (mg/L)	74,5	200
Cobalto (mg/L)	<0,01	0,05
Cobre (mg/L)	<0,01	0,2
Cromo (mg/L)	<0,01	0,1
Fluoruro (mg/L)	0,2	1
Hierro (mg/L)	0,06	5
Litio (mg/L)	0,04	2,5
Manganeso (mg/L)	2	0,2
Mercurio (mg/L)	<0,001	0,001
Molibdeno (mg/L)	0,05	0,01
Níquel (mg/L)	<0,01	0,2
ph	7,85	5,5 - 9
Plata (mg/L)	<0,01	0,2
Plomo (mg/L)	<0,003	5
Selenio (mg/L)	<0,004	0,02
Sodio Porcentual (%)	17,9	35
Sulfatos (mg/L)	257,4	250
Vanadio (mg/L)	<0,01	0,1
Zinc (mg/L)	0,05	2
RAS	0,93	
Δ Conductividad Espec. (µmho/cm)	950	
Sólidos disueltos totales (mg/L)	624	
Coliformes fecales (NMP/100ml)	2,3*10⁴	1000
Nitrato (mg/L)	23,2	
Bicarbonato (mg/L) (CaCO3)	416,15	
Calcio (mg/L)	109,1	
Magnesio (mg/L)	41,5	
Potasio (mg/L)	4,67	
Sodio (mg/L)	44,9	

Tabla F9.- Resultados análisis químico muestra P3C3 y comparación con Norma NCh1.333 para Riego.

	P3 C3	NCh 1.333 Riego
Aluminio (mg/L)	<0,1	5
Arsénico (mg/L)	0,017	0,1
Bario (mg/L)	0,07	4
Berilio (mg/L)	<0,01	0,1
Boro (mg/L)	2,66	0,75
Cadmio (mg/L)	<0,0015	0,01
Cianuro (mg/L)	<0,05	0,2
Cloruros (mg/L)	24,1	200
Cobalto (mg/L)	<0,01	0,05
Cobre (mg/L)	0,01	0,2
Cromo (mg/L)	<0,01	0,1
Fluoruro (mg/L)	0,2	1
Hierro (mg/L)	0,07	5
Litio (mg/L)	0,02	2,5
Manganeso (mg/L)	0,44	0,2
Mercurio (mg/L)	<0,001	0,001
Molibdeno (mg/L)	<0,01	0,01
Níquel (mg/L)	<0,01	0,2
ph	7,51	5,5 - 9
Plata (mg/L)	<0,01	0,2
Plomo (mg/L)	<0,003	5
Selenio (mg/L)	<0,004	0,02
Sodio Porcentual (%)	20,4	35
Sulfatos (mg/L)	232,6	250
Vanadio (mg/L)	<0,01	0,1
Zinc (mg/L)	0,03	2
RAS	0,92	
Δ Conductividad Espec. (µmho/cm)	699	
Sólidos disueltos totales (mg/L)	482	
Coliformes fecales (NMP/100ml)	4	1000
Nitrato (mg/L)	7,5	
Bicarbonato (mg/L) (CaCO3)	199,25	
Calcio (mg/L)	93,7	
Magnesio (mg/L)	21,1	
Potasio (mg/L)	1,62	
Sodio (mg/L)	38,1	

Tabla F10.- Resultados análisis químico muestra S1C3 y comparación con Norma NCh1.333 para Riego.

	S1 C3	NCh 1.333 Riego
Aluminio (mg/L)	<0,01	5
Arsénico (mg/L)	0,008	0,1
Bario (mg/L)	0,01	4
Berilio (mg/L)	<0,01	0,1
Boro (mg/L)	0,72	0,75
Cadmio (mg/L)	<0,0015	0,01
Cianuro (mg/L)	<0,05	0,2
Cloruros (mg/L)	53,5	200
Cobalto (mg/L)	<0,01	0,05
Cobre (mg/L)	<0,01	0,2
Cromo (mg/L)	<0,01	0,1
Fluoruro (mg/L)	0,1	1
Hierro (mg/L)	0,12	5
Litio (mg/L)	0,07	2,5
Manganeso (mg/L)	0,19	0,2
Mercurio (mg/L)	<0,001	0,001
Molibdeno (mg/L)	<0,01	0,01
Níquel (mg/L)	<0,01	0,2
ph	7,68	5,5 - 9
Plata (mg/L)	<0,01	0,2
Plomo (mg/L)	0,424	5
Selenio (mg/L)	<0,004	0,02
Sodio Porcentual (%)	72	35
Sulfatos (mg/L)	212,9	250
Vanadio (mg/L)	<0,01	0,1
Zinc (mg/L)	0,08	2
RAS	5,42	
Δ Conductividad Espec. (µmho/cm)	743	
Sólidos disueltos totales (mg/L)	500	
Coliformes fecales (NMP/100ml)	<2	1000
Nitrato (mg/L)	1,6	
Bicarbonato (mg/L) (CaCO3)	197,05	
Calcio (mg/L)	40,3	
Magnesio (mg/L)	2,06	
Potasio (mg/L)	0,59	
Sodio (mg/L)	130,3	

Tabla F11.- Resultados análisis químico muestra S2C3 y comparación con Norma NCh1.333 para Riego.

	S2 C3	NCh 1.333 Riego
Aluminio (mg/L)	0,97	5
Arsénico (mg/L)	0,021	0,1
Bario (mg/L)	<0,01	4
Berilio (mg/L)	<0,01	0,1
Boro (mg/L)	0,41	0,75
Cadmio (mg/L)	<0,0015	0,01
Cianuro (mg/L)	<0,05	0,2
Cloruros (mg/L)	52,7	200
Cobalto (mg/L)	<0,01	0,05
Cobre (mg/L)	0,02	0,2
Cromo (mg/L)	<0,01	0,1
Fluoruro (mg/L)	0,2	1
Hierro (mg/L)	0,48	5
Litio (mg/L)	0,05	2,5
Manganeso (mg/L)	0,02	0,2
Mercurio (mg/L)	<0,001	0,001
Molibdeno (mg/L)	0,01	0,01
Níquel (mg/L)	<0,01	0,2
ph	8,21	5,5 - 9
Plata (mg/L)	<0,01	0,2
Plomo (mg/L)	<0,003	5
Selenio (mg/L)	<0,004	0,02
Sodio Porcentual (%)	90	35
Sulfatos (mg/L)	299,1	250
Vanadio (mg/L)	0,02	0,1
Zinc (mg/L)	0,04	2
RAS	16,8	
Δ Conductividad Espec. (µmho/cm)	1478	
Sólidos disueltos totales (mg/L)	912	
Coliformes fecales (NMP/100ml)	300	1000
Nitrato (mg/L)	6,9	
Bicarbonato (mg/L) (CaCO3)	664,98	
Calcio (mg/L)	16,5	
Magnesio (mg/L)	6,51	
Potasio (mg/L)	0,96	
Sodio (mg/L)	318,2	

Tabla F12.- Resultados análisis químico muestra S3C3 y comparación con Norma NCh1.333 para Riego.

	S3 C3	NCh 1.333 Riego
Aluminio (mg/L)	<0,01	5
Arsénico (mg/L)	0,009	0,1
Bario (mg/L)	<0,01	4
Berilio (mg/L)	<0,01	0,1
Boro (mg/L)	0,4	0,75
Cadmio (mg/L)	<0,0015	0,01
Cianuro (mg/L)	<0,05	0,2
Cloruros (mg/L)	43,3	200
Cobalto (mg/L)	<0,01	0,05
Cobre (mg/L)	<0,01	0,2
Cromo (mg/L)	<0,01	0,1
Fluoruro (mg/L)	0,1	1
Hierro (mg/L)	0,66	5
Litio (mg/L)	0,02	2,5
Manganeso (mg/L)	4,22	0,2
Mercurio (mg/L)	<0,001	0,001
Molibdeno (mg/L)	<0,01	0,01
Níquel (mg/L)	<0,01	0,2
ph	7,23	5,5 - 9
Plata (mg/L)	<0,01	0,2
Plomo (mg/L)	<0,003	5
Selenio (mg/L)	<0,004	0,02
Sodio Porcentual (%)	47,1	35
Sulfatos (mg/L)	146,9	250
Vanadio (mg/L)	<0,01	0,1
Zinc (mg/L)	0,02	2
RAS	2,58	
Δ Conductividad Espec. (µmho/cm)	666	
Sólidos disueltos totales (mg/L)	448	
Coliformes fecales (NMP/100ml)	8	1000
Nitrato (mg/L)	1,3	
Bicarbonato (mg/L) (CaCO3)	287,33	
Calcio (mg/L)	55,9	
Magnesio (mg/L)	15,6	
Potasio (mg/L)	2,12	
Sodio (mg/L)	84,7	

Tabla F13- Resultados análisis químico muestra S4C3 y comparación con Norma NCh1.333 para Riego.

	S4 C3	NCh 1.333 Riego
Aluminio (mg/L)	<0,01	5
Arsénico (mg/L)	0,02	0,1
Bario (mg/L)	0,06	4
Berilio (mg/L)	<0,01	0,1
Boro (mg/L)	0,66	0,75
Cadmio (mg/L)	<0,0015	0,01
Cianuro (mg/L)	<0,05	0,2
Cloruros (mg/L)	63,9	200
Cobalto (mg/L)	<0,01	0,05
Cobre (mg/L)	<0,01	0,2
Cromo (mg/L)	<0,01	0,1
Fluoruro (mg/L)	0,1	1
Hierro (mg/L)	0,14	5
Litio (mg/L)	0,04	2,5
Manganeso (mg/L)	0,28	0,2
Mercurio (mg/L)	<0,001	0,001
Molibdeno (mg/L)	0,01	0,01
Níquel (mg/L)	<0,01	0,2
ph	7,2	5,5 - 9
Plata (mg/L)	<0,01	0,2
Plomo (mg/L)	<0,003	5
Selenio (mg/L)	<0,004	0,02
Sodio Porcentual (%)	42,3	35
Sulfatos (mg/L)	151,3	250
Vanadio (mg/L)	<0,01	0,1
Zinc (mg/L)	0,07	2
RAS	2,14	
Δ Conductividad Espec. (µmho/cm)	647	
Sólidos disueltos totales (mg/L)	495	
Coliformes fecales (NMP/100ml)	50	1000
Nitrato (mg/L)	<0,5	
Bicarbonato (mg/L) (CaCO3)	237,79	
Calcio (mg/L)	60,3	
Magnesio (mg/L)	15	
Potasio (mg/L)	0,46	
Sodio (mg/L)	71,8	

Tabla F14- Resultados análisis químico muestra PS5 y comparación con Norma NCh1.333 para Riego.

	PS5	NCh 1.333 Riego
Arsénico (mg/L)	<0,006	0,1
Hierro (mg/L)	19	5
Cadmio (mg/L)	<0,0015	0,01
Plomo (mg/L)	0,012	5

Tabla F15- Resultados análisis químico muestra PS4 y comparación con Norma NCh1.333 para Riego.

	PS4	NCh 1.333 Riego
Arsénico (mg/L)	0,055	0,1
Hierro (mg/L)	38,7	5
Cadmio (mg/L)	<0,0015	0,01
Plomo (mg/L)	0,034	5

Tabla F16- Resultados análisis químico muestra PS10 y comparación con Norma NCh1.333 para Riego.

	PS10	NCh 1.333 Riego
Arsénico (mg/L)	0,038	0,1
Hierro (mg/L)	155,4	5
Cadmio (mg/L)	<0,0015	0,01
Plomo (mg/L)	0,188	5

Tabla F17- Resultados análisis químico muestra PS8 y comparación con Norma NCh1.333 para Riego.

	PS8	NCh 1.333 Riego
Arsénico (mg/L)	4,911	0,1
Hierro (mg/L)	91,6	5
Cadmio (mg/L)	0,113	0,01
Plomo (mg/L)	0,155	5

Tabla F18.- Resultados análisis químico muestra P1C1 y comparación con
Norma NCh409/1 Of. 05 para Agua Potable.

	P1 C1	NCh 409/1 Of.05 Agua Potable
Amoníaco (mg/L)		0,25
Arsénico (mg/L)	<0,006	0,05
Cadmio (mg/L)	<0,002	0,01
Cianuro (mg/L)	<0,05	0,20
Cloruros (mg/L)	52,8	250
Cobre (mg/L)	<0,01	1,0
Cromo (mg/L)	<0,01	0,05
Detergentes (mg/L)		0,50
Estroncio (mg/L)		10
Fenoles (mg/L)		0,002
Fluoruro (mg/L)	0,1	1,5
Hierro (mg/L)	<0,03	0,3
Magnesio (mg/L)	27,2	125
Manganeso (mg/L)	<0,01	0,10
Mercurio (mg/L)	<0,001	0,001
Nitrato (mg/L)	30,4	10
Nitritos (mg/L)		1,0
pH	6,92	6,0 - 8,5
Plomo (mg/L)	<0,002	0,05
Selenio (mg/L)	<0,004	0,01
Sólidos disueltos totales (mg/L)	472	1000
Sulfatos (mg/L)	59	250
Zinc (mg/L)	<0,01	5,0

Tabla F19.- Resultados análisis químico muestra P2C1 y comparación con
Norma NCh409/1 Of. 05 para Agua Potable.

	P2 C1	NCh 409/1 Of.05 Agua Potable
Amoníaco (mg/L)		0,25
Arsénico (mg/L)	<0,006	0,05
Cadmio (mg/L)	<0,002	0,01
Cianuro (mg/L)	<0,05	0,20
Cloruros (mg/L)	67,2	250
Cobre (mg/L)	<0,01	1,0
Cromo (mg/L)	<0,01	0,05
Detergentes (mg/L)		0,50
Estroncio (mg/L)		10
Fenoles (mg/L)		0,002
Fluoruro (mg/L)	0,2	1,5
Hierro (mg/L)	<0,03	0,3
Magnesio (mg/L)	38,5	125
Manganeso (mg/L)	0,06	0,10
Mercurio (mg/L)	<0,001	0,001
Nitrato (mg/L)	1,3	10
Nitritos (mg/L)		1,0
pH	7,81	6,0 - 8,5
Plomo (mg/L)	<0,002	0,05
Selenio (mg/L)	<0,004	0,01
Sólidos disueltos totales (mg/L)	698	1000
Sulfatos (mg/L)	149,5	250
Zinc (mg/L)	<0,01	5,0

Tabla F20.- Resultados análisis químico muestra P3C1 y comparación con
Norma NCh409/1 Of. 05 para Agua Potable.

	P3 C1	NCh 409/1 Of.05 Agua Potable
Amoníaco (mg/L)		0,25
Arsénico (mg/L)	<0,006	0,05
Cadmio (mg/L)	<0,002	0,01
Cianuro (mg/L)	<0,05	0,20
Cloruros (mg/L)	22,3	250
Cobre (mg/L)	0,03	1,0
Cromo (mg/L)	<0,01	0,05
Detergentes (mg/L)		0,50
Estroncio (mg/L)		10
Fenoles (mg/L)		0,002
Fluoruro (mg/L)	0,1	1,5
Hierro (mg/L)	<0,03	0,3
Magnesio (mg/L)	23,9	125
Manganeso (mg/L)	0,12	0,10
Mercurio (mg/L)	<0,001	0,001
Nitrato (mg/L)	11	10
Nitritos (mg/L)		1,0
pH	7,44	6,0 - 8,5
Plomo (mg/L)	<0,002	0,05
Selenio (mg/L)	<0,004	0,01
Sólidos disueltos totales (mg/L)	636	1000
Sulfatos (mg/L)	252,1	250
Zinc (mg/L)	<0,01	5,0

Tabla F21.- Resultados análisis químico muestra P1C2 y comparación con
Norma NCh409/1 Of. 05 para Agua Potable.

	P1 C2	NCh 409/1 Of.05 Agua Potable
Amoníaco (mg/L)		0,25
Arsénico (mg/L)	<0,006	0,05
Cadmio (mg/L)	<0,003	0,01
Cianuro (mg/L)	<0,05	0,20
Cloruros (mg/L)	64,4	250
Cobre (mg/L)	<0,01	1,0
Cromo (mg/L)	<0,01	0,05
Detergentes (mg/L)		0,50
Estroncio (mg/L)		10
Fenoles (mg/L)		0,002
Fluoruro (mg/L)	<0,1	1,5
Hierro (mg/L)	<0,03	0,3
Magnesio (mg/L)	28,7	125
Manganeso (mg/L)	<0,01	0,10
Mercurio (mg/L)	<0,001	0,001
Nitrato (mg/L)	19,8	10
Nitritos (mg/L)		1,0
pH	7,53	6,0 - 8,5
Plomo (mg/L)	<0,003	0,05
Selenio (mg/L)	<0,004	0,01
Sólidos disueltos totales (mg/L)	440	1000
Sulfatos (mg/L)	84,5	250
Zinc (mg/L)	<0,01	5,0

Tabla F22.- Resultados análisis químico muestra P2C2 y comparación con
Norma NCh409/1 Of. 05 para Agua Potable.

	P2 C2	NCh 409/1 Of.05 Agua Potable
Amoníaco (mg/L)		0,25
Arsénico (mg/L)	<0,006	0,05
Cadmio (mg/L)	<0,003	0,01
Cianuro (mg/L)	<0,05	0,20
Cloruros (mg/L)	95	250
Cobre (mg/L)	<0,01	1,0
Cromo (mg/L)	<0,01	0,05
Detergentes (mg/L)		0,50
Estroncio (mg/L)		10
Fenoles (mg/L)		0,002
Fluoruro (mg/L)	0,2	1,5
Hierro (mg/L)	<0,03	0,3
Magnesio (mg/L)	38,9	125
Manganeso (mg/L)	0,45	0,10
Mercurio (mg/L)	<0,001	0,001
Nitrato (mg/L)	<0,5	10
Nitritos (mg/L)		1,0
pH	7,65	6,0 - 8,5
Plomo (mg/L)	<0,003	0,05
Selenio (mg/L)	<0,004	0,01
Sólidos disueltos totales (mg/L)	674	1000
Sulfatos (mg/L)	145,2	250
Zinc (mg/L)	<0,01	5,0

Tabla F23.- Resultados análisis químico muestra P3C2 y comparación con
Norma NCh409/1 Of. 05 para Agua Potable.

	P3 C2	NCh 409/1 Of.05 Agua Potable
Amoníaco (mg/L)		0,25
Arsénico (mg/L)	<0,006	0,05
Cadmio (mg/L)	<0,003	0,01
Cianuro (mg/L)	<0,05	0,20
Cloruros (mg/L)	36,4	250
Cobre (mg/L)	<0,01	1,0
Cromo (mg/L)	<0,01	0,05
Detergentes (mg/L)		0,50
Estroncio (mg/L)		10
Fenoles (mg/L)		0,002
Fluoruro (mg/L)	0,1	1,5
Hierro (mg/L)	<0,03	0,3
Magnesio (mg/L)	21,3	125
Manganeso (mg/L)	0,11	0,10
Mercurio (mg/L)	<0,001	0,001
Nitrato (mg/L)	9,4	10
Nitritos (mg/L)		1,0
pH	7,61	6,0 - 8,5
Plomo (mg/L)	<0,003	0,05
Selenio (mg/L)	<0,004	0,01
Sólidos disueltos totales (mg/L)	536	1000
Sulfatos (mg/L)	211	250
Zinc (mg/L)	<0,01	5,0

Tabla F24.- Resultados análisis químico muestra P1C3 y comparación con
Norma NCh409/1 Of. 05 para Agua Potable.

	P1 C3	NCh 409/1 Of.05 Agua Potable
Amoníaco (mg/L)		0,25
Arsénico (mg/L)	<0,006	0,05
Cadmio (mg/L)	<0,0015	0,01
Cianuro (mg/L)	<0,05	0,20
Cloruros (mg/L)	27,2	250
Cobre (mg/L)	<0,01	1,0
Cromo (mg/L)	<0,01	0,05
Detergentes (mg/L)		0,50
Estroncio (mg/L)		10
Fenoles (mg/L)		0,002
Fluoruro (mg/L)	0,1	1,5
Hierro (mg/L)	<0,03	0,3
Magnesio (mg/L)	29,8	125
Manganeso (mg/L)	0,01	0,10
Mercurio (mg/L)	<0,001	0,001
Nitrato (mg/L)	51,2	10
Nitritos (mg/L)		1,0
pH	7,01	6,0 - 8,5
Plomo (mg/L)	<0,003	0,05
Selenio (mg/L)	<0,004	0,01
Sólidos disueltos totales (mg/L)	385	1000
Sulfatos (mg/L)	110,4	250
Zinc (mg/L)	0,05	5,0

Tabla F25.- Resultados análisis químico muestra P2C3 y comparación con
Norma NCh409/1 Of. 05 para Agua Potable.

	P2 C3	NCh 409/1 Of.05 Agua Potable
Amoníaco (mg/L)		0,25
Arsénico (mg/L)	<0,006	0,05
Cadmio (mg/L)	<0,0015	0,01
Cianuro (mg/L)	<0,05	0,20
Cloruros (mg/L)	74,5	250
Cobre (mg/L)	<0,01	1,0
Cromo (mg/L)	<0,01	0,05
Detergentes (mg/L)		0,50
Estroncio (mg/L)		10
Fenoles (mg/L)		0,002
Fluoruro (mg/L)	0,2	1,5
Hierro (mg/L)	0,06	0,3
Magnesio (mg/L)	41,5	125
Manganeso (mg/L)	2	0,10
Mercurio (mg/L)	<0,001	0,001
Nitrato (mg/L)	23,2	10
Nitritos (mg/L)		1,0
pH	7,85	6,0 - 8,5
Plomo (mg/L)	<0,003	0,05
Selenio (mg/L)	<0,004	0,01
Sólidos disueltos totales (mg/L)	624	1000
Sulfatos (mg/L)	257,4	250
Zinc (mg/L)	0,05	5,0

Tabla F26.- Resultados análisis químico muestra P3C3 y comparación con
Norma NCh409/1 Of. 05 para Agua Potable.

	P3 C3	NCh 409/1 Of.05 Agua Potable
Amoníaco (mg/L)		0,25
Arsénico (mg/L)	0,017	0,05
Cadmio (mg/L)	<0,0015	0,01
Cianuro (mg/L)	<0,05	0,20
Cloruros (mg/L)	24,1	250
Cobre (mg/L)	0,01	1,0
Cromo (mg/L)	<0,01	0,05
Detergentes (mg/L)		0,50
Estroncio (mg/L)		10
Fenoles (mg/L)		0,002
Fluoruro (mg/L)	0,2	1,5
Hierro (mg/L)	0,07	0,3
Magnesio (mg/L)	21,1	125
Manganeso (mg/L)	0,44	0,10
Mercurio (mg/L)	<0,001	0,001
Nitrato (mg/L)	7,5	10
Nitritos (mg/L)		1,0
pH	7,51	6,0 - 8,5
Plomo (mg/L)	<0,003	0,05
Selenio (mg/L)	<0,004	0,01
Sólidos disueltos totales (mg/L)	482	1000
Sulfatos (mg/L)	232,6	250
Zinc (mg/L)	0,03	5,0

Tabla F27.- Resultados análisis químico muestra S1C3 y comparación con
Norma NCh409/1 Of. 05 para Agua Potable.

	S1 C3	NCh 409/1 Of.05 Agua Potable
Amoníaco (mg/L)		0,25
Arsénico (mg/L)	0,008	0,05
Cadmio (mg/L)	<0,0015	0,01
Cianuro (mg/L)	<0,05	0,20
Cloruros (mg/L)	53,5	250
Cobre (mg/L)	<0,01	1,0
Cromo (mg/L)	<0,01	0,05
Detergentes (mg/L)		0,50
Estroncio (mg/L)		10
Fenoles (mg/L)		0,002
Fluoruro (mg/L)	0,1	1,5
Hierro (mg/L)	0,12	0,3
Magnesio (mg/L)	2,06	125
Manganeso (mg/L)	0,19	0,10
Mercurio (mg/L)	<0,001	0,001
Nitrato (mg/L)	1,6	10
Nitritos (mg/L)		1,0
pH	7,68	6,0 - 8,5
Plomo (mg/L)	0,424	0,05
Selenio (mg/L)	<0,004	0,01
Sólidos disueltos totales (mg/L)	500	1000
Sulfatos (mg/L)	212,9	250
Zinc (mg/L)	0,08	5,0

Tabla F28.- Resultados análisis químico muestra S2C3 y comparación con
Norma NCh409/1 Of. 05 para Agua Potable.

	S2 C3	NCh 409/1 Of.05 Agua Potable
Amoníaco (mg/L)		0,25
Arsénico (mg/L)	0,021	0,05
Cadmio (mg/L)	<0,0015	0,01
Cianuro (mg/L)	<0,05	0,20
Cloruros (mg/L)	52,7	250
Cobre (mg/L)	0,02	1,0
Cromo (mg/L)	<0,01	0,05
Detergentes (mg/L)		0,50
Estroncio (mg/L)		10
Fenoles (mg/L)		0,002
Fluoruro (mg/L)	0,2	1,5
Hierro (mg/L)	0,48	0,3
Magnesio (mg/L)	6,51	125
Manganeso (mg/L)	0,02	0,10
Mercurio (mg/L)	<0,001	0,001
Nitrato (mg/L)	6,9	10
Nitritos (mg/L)		1,0
pH	8,21	6,0 - 8,5
Plomo (mg/L)	<0,003	0,05
Selenio (mg/L)	<0,004	0,01
Sólidos disueltos totales (mg/L)	912	1000
Sulfatos (mg/L)	299,1	250
Zinc (mg/L)	0,04	5,0

Tabla F29.- Resultados análisis químico muestra S3C3 y comparación con
Norma NCh409/1 Of. 05 para Agua Potable.

	S3 C3	NCh 409/1 Of.05 Agua Potable
Amoníaco (mg/L)		0,25
Arsénico (mg/L)	0,009	0,05
Cadmio (mg/L)	<0,0015	0,01
Cianuro (mg/L)	<0,05	0,20
Cloruros (mg/L)	43,3	250
Cobre (mg/L)	<0,01	1,0
Cromo (mg/L)	<0,01	0,05
Detergentes (mg/L)		0,50
Estroncio (mg/L)		10
Fenoles (mg/L)		0,002
Fluoruro (mg/L)	0,1	1,5
Hierro (mg/L)	0,66	0,3
Magnesio (mg/L)	15,6	125
Manganeso (mg/L)	4,22	0,10
Mercurio (mg/L)	<0,001	0,001
Nitrato (mg/L)	1,3	10
Nitritos (mg/L)		1,0
pH	7,23	6,0 - 8,5
Plomo (mg/L)	<0,003	0,05
Selenio (mg/L)	<0,004	0,01
Sólidos disueltos totales (mg/L)	448	1000
Sulfatos (mg/L)	146,9	250
Zinc (mg/L)	0,02	5,0

Tabla F30.- Resultados análisis químico muestra S4C3 y comparación con
Norma NCh409/1 Of. 05 para Agua Potable.

	S4 C3	NCh 409/1 Of.05 Agua Potable
Amoníaco (mg/L)		0,25
Arsénico (mg/L)	0,02	0,05
Cadmio (mg/L)	<0,0015	0,01
Cianuro (mg/L)	<0,05	0,20
Cloruros (mg/L)	63,9	250
Cobre (mg/L)	<0,01	1,0
Cromo (mg/L)	<0,01	0,05
Detergentes (mg/L)		0,50
Estroncio (mg/L)		10
Fenoles (mg/L)		0,002
Fluoruro (mg/L)	0,1	1,5
Hierro (mg/L)	0,14	0,3
Magnesio (mg/L)	15	125
Manganeso (mg/L)	0,28	0,10
Mercurio (mg/L)	<0,001	0,001
Nitrato (mg/L)	<0,5	10
Nitritos (mg/L)		1,0
pH	7,2	6,0 - 8,5
Plomo (mg/L)	<0,003	0,05
Selenio (mg/L)	<0,004	0,01
Sólidos disueltos totales (mg/L)	495	1000
Sulfatos (mg/L)	151,3	250
Zinc (mg/L)	0,07	5,0

Tabla F31.- Resultados análisis químico muestra PS5 y comparación con
Norma NCh409/1 Of. 05 para Agua Potable.

	PS5	NCh 409/1 Agua Potable
Arsénico (mg/L)	<0,006	0,05
Hierro (mg/L)	19	0,3
Cadmio (mg/L)	<0,0015	0,01
Plomo (mg/L)	0,012	0,05

Tabla F32.- Resultados análisis químico muestra PS4 y comparación con
Norma NCh409/1 Of. 05 para Agua Potable.

	PS4	NCh 409/1 Agua Potable
Arsénico (mg/L)	0,055	0,05
Hierro (mg/L)	38,7	0,3
Cadmio (mg/L)	<0,0015	0,01
Plomo (mg/L)	0,034	0,05

Tabla F33.- Resultados análisis químico muestra PS10 y comparación con
Norma NCh409/1 Of. 05 para Agua Potable.

	PS10	NCh 409/1 Agua Potable
Arsénico (mg/L)	0,038	0,05
Hierro (mg/L)	155,4	0,3
Cadmio (mg/L)	<0,0015	0,01
Plomo (mg/L)	0,188	0,05

Tabla F34.- Resultados análisis químico muestra PS8 y comparación con Norma NCh409/1 Of. 05 para Agua Potable.

	PS8	NCh 409/1 Agua Potable
Arsénico (mg/L)	4,911	0,05
Hierro (mg/L)	91,6	0,3
Cadmio (mg/L)	0,113	0,01
Plomo (mg/L)	0,155	0,05

Tabla F35.- Resultados análisis químico muestra PS5 y comparación con análisis realizados por GolderAssociates (2006).

	PS5 análisis 2013	PS5 análisis 2006
Arsénico (mg/L)	<0,006	0,016
Hierro (mg/L)	19	0,156
Cadmio (mg/L)	<0,0015	<0,001
Plomo (mg/L)	0,012	<0,01

Tabla F36.- Resultados análisis químico muestra PS4 y comparación con análisis realizados por GolderAssociates (2006).

	PS4 análisis 2013	PS4 análisis 2006
Arsénico (mg/L)	0,055	0,028
Hierro (mg/L)	38,7	0,631
Cadmio (mg/L)	<0,0015	<0,001
Plomo (mg/L)	0,034	0,019

Tabla F37.- Resultados análisis químico muestra PS10 y comparación con análisis realizados por GolderAssociates (2006).

	PS10 análisis 2013	PS10 análisis 2006
Arsénico (mg/L)	0,038	0,036
Hierro (mg/L)	155,4	0,221
Cadmio (mg/L)	<0,0015	<0,001
Plomo (mg/L)	0,188	<0,01

Tabla F38.- Resultados análisis químico muestra PS8 y comparación con análisis realizados por GolderAssociates (2006).

	PS8 análisis 2013	PS8 análisis 2006
Arsénico (mg/L)	4,911	0,178
Hierro (mg/L)	91,6	0,047
Cadmio (mg/L)	0,113	<0,001
Plomo (mg/L)	0,155	<0,01