

UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS Fundada en 1551

FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINERA, METALÚRGICA Y GEOGRÁFICA

E.A.P. DE INGENIERÍA GEOLÓGICA

Estudio Hidrogeológico del Proyecto Minero Manantial Espejo – Provincia de Santa Cruz, Argentina

TESIS para optar el Título Profesional de: INGENIERO GEÓLOGO

AUTOR

RAÚL ESTEBAN ORTIZ RODRIGUEZ

Lima – Perú 2005

..	1
AGRADECIMIENTOS .	3
RESUMEN .	5
1. INTRODUCCIÓN .	7
1.1. Generalidades .	7
1.2 Objetivos .	8
1.3 Ubicación y Accesibilidad .	8
1.4 Descripción General del Proyecto . .	9
1.5 Estudios Hidrogeológicos Previos .	10
1.5.1 Mina Cerro Vanguardia .	10
1.5.2 Mina Martha . .	11
1.6 Metodología de la Investigación .	12
1.7 Clima .	14
1.7.1 Temperatura .	14
1.7.2 Viento . .	14
1.7.3 Precipitaciones . .	15
1.7.4 Evapotranspiración .	18
1.8 Vegetación . .	22
1.9 Drenaje de la Región . .	23
2 MEDIO FÍSICO .	25
2.1 Geomorfología . .	25
2.2 Geología del Área de Estudio .	26
2.2.1 Jurásico . .	26
2.2.2 Jurásico-Cretáceo .	26
2.2.3 Paleógeno .	26
2.2.4 Neógeno .	27
2.2.5 Cuaternario .	30

2.3 Estructura y Mineralización .	30
3. INVENTARIO DE PUNTOS DE AGUA .	33
3.1 Generalidades .	33
3.2 Objetivos .	34
3.3 Resultados del Inventario .	34
4. PERFORACIÓN, INSTALACIÓN Y MONITOREO DE NUEVOS PIEZÓMETROS .	41
4.1 Generalidades .	41
4.2 Objetivos .	44
4.3 Perforaciones .	44
4.4 Instalación de Piezómetros .	45
4.5. Monitoreo de Niveles de Agua en Pozos Recientes . .	47
5 PIEZOMETRÍA .	51
5.1 Generalidades .	51
5.2 Objetivos .	51
5.3 Metodología . .	52
5.4 Piezometría Regional .	56
5.5 Piezometría Local .	57
6. PARÁMETROS HIDRÁULICOS .	59
6.1 Generalidades .	59
6.2 Objetivos .	61
6.3 Pruebas de Inyección de Agua con Obturador .	61
6.4 Pruebas de Inyección / Extracción Instantánea y Pruebas de Carga Constante .	62
7. HIDROGEOQUÍMICA .	65
7.1 Generalidades .	65
7.2 Objetivos .	65
7.3 Toma de Muestras y Valoración de Datos .	65
7.4 Calidad del Agua . .	71
7.5 Interpretación de Datos .	77
7.5.1 Química de Campo .	78

7.5.2 Diagramas Hidrogeoquímicos . .	78
7.5.3 Índices Hidrogeoquímicos . .	83
7.5.4 Principales Iones .	87
8 MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL .	91
8.1 Generalidades .	91
8.2 Objetivos .	92
8.3 Unidades Hidroestratigráficas . .	92
8.3.1 Acuíferos Basálticos .	94
8.3.2 Acuíferos de Arenisca (Miembro Monte León - Fm. Patagonia) . .	94
8.3.3 Acuífero Pampa Aluvial (Fm. La Avenida) .	95
8.4 Hidrogeología del Centro Volcánico . .	95
8.5 Hidrogeología del Depósito Mineral .	96
9. BALANCE HÍDRICO .	99
9.1 Generalidades .	99
9.2 Objetivos .	99
9.3 Macizo Volcánico .	100
9.4 Pampa Aluvial .	100
10. POSIBILIDAD DE RECURSOS HÍDRICOS .	103
CONCLUSIONES . .	105
RECOMENDACIONES .	109
BIBLIOGRAFÍA .	111
ANEXOS .	115

DEDICATORIA A MI MADRE, RITA RODRIGUEZ LOZANO Quien con su amor y apoyo señaló el camino para este logro tan importante en mi vida. A MI PADRE, RAUL ESTEBAN ORTIZ MACURI Quien con su ejemplo de lucha constante me enseñó que todo en la vida se logra con esfuerzo y dedicación. A MI ESPOSA E HIJO, ALTHEA ELIZABETH COLTER APAZA RAUL EDUARDO ORTIZ COLTER Mi amada familia, la cual recibí de Dios como una maravillosa bendición a mi vida.

AGRADECIMIENTOS

A la compañía Minera Tritón Argentina S.A. (Panamerican Silver Corp.), entidad que facilitó la información necesaria para la realización de la presente investigación.

Por las valiosas revisiones críticas y comentarios realizados a la presente Tesis, sin ánimo de establecer ninguna prioridad, agradezco a:

-Ing. Guillermo Castro, Ing. Antonio Guzmán y al Ing. Hugo Rivera, profesores de la E.A.P. de Ingeniería Geológica, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, Perú.

-M.A.Sc. David Evans, gerente general de Ground Water International S.A.C., Lima, Perú.

-Dr. Fidel Rivera y Sra. Roser Escuder, profesores de la Fundación Centro Internacional de Hidrología Subterránea - Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España.

-Dr. Christian Herrera, profesor de la Universidad Católica del Norte, Antofagasta, Chile.

Asimismo, deseo extender mi agradecimiento a todas aquellas personas que de diversa manera colaboraron en este trabajo.

RESUMEN

En la presente Tesis el tema desarrollado es el “Estudio Hidrogeológico del Proyecto Minero Manantial Espejo”, ubicado en la Provincia de Santa Cruz, República Argentina. Estudio desarrollado en base a la necesidad de responder a dos cuestiones fundamentales: caracterizar la hidrogeología del área del proyecto Manantial Espejo y emitir recomendaciones para potenciales fuentes de abastecimiento de agua para la operación minera, donde el requerimiento promedio estimado es de 50 l/s. Asimismo, este estudio se desarrolla con la finalidad de presentarlo para obtener el Título Profesional de Ingeniero Geólogo.

La Tesis inicia con una breve descripción de generalidades presentando de una manera comprensible los alcances del estudio y la metodología que se siguió en el desarrollo del mismo. Luego se describe el medio físico de la zona del proyecto, aspecto fundamental para lograr una mejor comprensión del área en la que se desarrolla la investigación. A continuación se presentan las investigaciones realizadas en campo, como: perforaciones, instalación de piezómetros, monitoreo de niveles de agua, pruebas hidráulicas y muestreo del agua subterránea y superficial. En base a los datos obtenidos se preparó el modelo hidrogeológico conceptual de la zona, y se emiten conclusiones y recomendaciones para continuar con investigaciones hidrogeológicas en el acuífero de la pampa aluvial, formación geológica con mayor potencial para extraer agua subterránea, y en el área del tajo principal, donde se requiere mayor información para evaluar el futuro drenaje del tajo minero que se establecerá en el área.

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Generalidades

En el presente siglo la demanda de agua subterránea para llevar a cabo proyectos mineros se ha incrementado sustancialmente. Así, Pan American Silver Corp. requería una evaluación hidrogeológica del área del proyecto minero Manantial Espejo. Proyecto minero de oro y plata donde es necesario contar con un requerimiento promedio estimado de 50 l/s de agua, por lo cual es necesario determinar la hidrogeología de la zona y evaluar los recursos de agua disponibles para el minado y operaciones generales. Por otro lado, además de los problemas relacionados con el abastecimiento de agua y el drenaje de la mina, es necesario evaluar también los efectos que la operación minera tendrá en los recursos de agua subterránea.

Con esta finalidad Pan American Silver Corp., encarga a la empresa Ground Water International S.A.C. el estudio hidrogeológico del área del proyecto minero de oro y plata "Manantial Espejo", ubicado en la Provincia de Santa Cruz, República de Argentina. En este trabajo realizado por Ground Water International S.A.C., conjuntamente con el hidrogeólogo senior M.A.Sc. David Evans, el Tesista participó como hidrogeólogo de campo.

El presente trabajo a nivel de hidrogeología de detalle, está orientado a determinar

las características hidrogeológicas del área donde se ubicará la mina “Manantial Espejo” y su entorno.

1.2 Objetivos

- Caracterizar las condiciones de línea base del agua subterránea.
- Realizar el modelo hidrogeológico conceptual del área del proyecto.
- Utilizar el modelo hidrogeológico conceptual para evaluar las condiciones hidrogeológicas en el área propuesta como depósito de relaves y las alternativas de abastecimiento de agua.
- Presentar el estudio por el suscrito, como Tesis para optar el Título Profesional de Ingeniero Geólogo.

1.3 Ubicación y Accesibilidad

El área de estudio del Proyecto Manantial Espejo se encuentra ubicada en la región sur de la República de Argentina dentro de la provincia de Santa Cruz centrada en las coordenadas geográficas 69° 30' longitud oeste y 48° 46' latitud norte (ver Figura 1). El pueblo más cercano es Puerto San Julián, el cual se ubica en la costa Atlántica, a 160 km al este de la propiedad. En la ciudad Comodoro Rivadavia, ubicada a 420 km al norte de Puerto San Julián, se encuentra un aeropuerto que posee vuelos diarios a Buenos Aires.

El acceso al proyecto desde Puerto San Julián es por la carretera asfaltada denominada Ruta 25, la cual se dirige desde Puerto San Julián hacia el Oeste, hacia el pueblo Gobernador Gregores. El campamento del proyecto se ubica en el km 160 de esta carretera en el lado izquierdo. Desde el campamento, varios caminos proporcionan un excelente acceso a lo largo del área de la propiedad.



Figura 1.- Mapa de ubicación de la zona del proyecto

1.4 Descripción General del Proyecto

El proyecto Manantial Espejo pertenece en un 50% a Panamerican Silver y otro 50% a Silver Standard Resources. Desde 1980, más de US\$ 18 millones han sido invertidos en estudios de exploración y pre-factibilidad, lo cual incluye 55,449 metros de perforación en 508 sondajes ejecutados en las cuatro vetas de la zona: María, Melissa, Karina Unión y Concepción. Hasta el momento los recursos estimados son de 37 millones de onzas de plata y más de 600,000 onzas de oro, con leyes de 8 oz/t de plata y de 0.11 oz/t de oro. Es decir, asumiendo 1,500 toneladas por día durante la operación de minado, esto sería suficiente para 10 años de vida de la mina, produciendo 4 millones de onzas de plata y 60,000 onzas de oro por año. Actualmente, estudios geotécnicos y ambientales se están llevando a cabo para obtener los permisos correspondientes para el inicio de la operación minera. En el marco de estos estudios es que se desarrolla la presente investigación hidrogeológica.

En este proyecto se explotarán las cuatro vetas minerales que contiene la zona: María, Melissa, Unión-Karina y Concepción. Primero se iniciará la explotación de las vetas María y Karina-Unión, para lo cual se desarrollarán dos tajos: Tajo María Norte y Tajo Karina-Unión. Próximo al tajo María Norte se ubicarán los botaderos María Sur y María Norte. Próximo al Tajo Karina-Unión se ubicará el botadero Unión Sur. La planta concentradora se ubicará a aprox. 500 m al sur del Tajo María Norte. El depósito de relaves se localizará a aprox. 3 km al noreste del Tajo María Norte. El campamento y oficinas se ubicarán en la zona en que actualmente se encuentra la Estancia Manantial Espejo, a aprox. 9 km de la zona del proyecto.

1.5 Estudios Hidrogeológicos Previos

No se tienen estudios hidrogeológicos previos, por lo que este estudio hidrogeológico es el primero en ser realizado en la zona del proyecto minero Manantial Espejo. Aunque se aprovechó la información hidrogeológica existente en dos minas relativamente cercanas a la zona del proyecto (Mina Cerro Vanguardia y Mina Martha), ya que tanto la geología como la mineralización en ambas minas son similares a la que se presenta en la zona de estudio. La información de la mina Cerro Vanguardia fue obtenida en comunicación personal con John de Souza (Gerente de Mina de Compañía Minera Cerro Vanguardia S.A.) y la información de la mina Martha fue obtenida en comunicación personal con Leon Ardí (Vicepresidente de Operaciones de Compañía Minera Polimet S.A). A continuación se presentan los aspectos hidrogeológicos más relevantes de ambas minas.

1.5.1 Mina Cerro Vanguardia

La mina Cerro Vanguardia (Foto 1) es una mina de laboreo superficial que se ubica a 150 km al NNO de Puerto San Julián y a 100 km al NE de Manantial Espejo. La mineralización se encuentra en un sistema de fracturas que contienen vetas epitermales de baja sulfuración del tipo sericita-adularia en una secuencia ignimbrítica del Jurásico medio. Las vetas tienen un espesor de hasta 10 m, con un promedio de 3.5 m y buzamiento desde subverticales hasta 60° con orientaciones similares a las encontradas en Manantial Espejo.

El flujo regional de agua subterránea tiene dirección sureste, hacia el Océano Atlántico (a 90 km. de la mina). Localmente, los patrones de flujo de agua subterránea son probablemente más complejos y controlados por zonas fracturadas más transmisivas asociadas con la red de vetas. En general, las vetas y las principales fallas, las cuales tienen un rumbo NO-SE son considerablemente más permeables y porosas que la roca volcánica de los alrededores. Estas vetas tienden a formar acuíferos delgados, subverticales limitados por rocas de baja permeabilidad (acuitardos). La frecuencia de los sistemas de fracturas paralelos a las vetas está en el rango de 1 fractura cada 10 a 20 cm. También existen otros sistemas secundarios de fracturas perpendiculares al sistema principal de fracturas, con una menor frecuencia. También existen algunas estructuras diagonales (orientadas NE-SO), las cuales son zonas de importantes ingresos de agua y pueden conectar hidráulicamente una veta con otra. Las pruebas de bombeo realizadas han demostrado que las vetas tienen una transmisividad de 60 m²/d y un coeficiente de almacenamiento de 10⁻³. Probablemente la roca que contiene las vetas tenga un valor de transmisividad y coeficiente de almacenamiento por lo menos dos órdenes de magnitud menor que las vetas.



Foto 1.- Mina Cerro Vanguardia

La calidad del agua subterránea de los pozos de abastecimiento y de las operaciones de drenaje de la mina es extremadamente variable. Las conductividades eléctricas del agua subterránea varían de 500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (indicando recarga reciente) hasta 6000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (indicando agua más antigua, agua salobre). La variación en calidad de agua ocurre sobre distancias relativamente cortas (decenas a centenares de metros). La presencia del agua salobre encontrada en algunos pozos de producción puede ser explicada por efectos residuales de una antigua transgresión marina durante el Eoceno-Oligoceno (aprox. 40-50 millones de años). El agua salobre pudo haber sido atrapada en rocas relativamente impermeables, mientras que el agua fresca migraba por las zonas fracturadas transmisivas.

1.5.2 Mina Martha

La Mina Martha (Foto 2) es una mina que tiene minado superficial y subterráneo, se ubica

a 20 km al noroeste de Manantial Espejo. El depósito es de tipo veta epitermal y se encuentra almacenado en las ignimbritas de la Fm. Chon Aike, similar a Manantial Espejo. La veta Martha, la cual aflora 1.5 km. en la superficie, es una de seis vetas actualmente conocidas que están siendo explotadas.

El año 2002 se desarrolló una rampa para acceder a una nueva zona mineralizada ubicada a lo largo de la veta Martha, a unos 400 m de la mina existente. Durante el desarrollo de la rampa se interceptó el nivel freático a una profundidad de 50 m (290 m.s.n.m.) bajo el tope de la veta Martha (340 m.s.n.m.). Durante las primeras etapas de drenaje de esta nueva zona de minado se tuvieron flujos de hasta 45 m³/h, sin embargo, actualmente los caudales están alcanzando condiciones uniformes de 4.5 m³/h. Al momento de esta visita, la antigua zona de minado estaba parcialmente inundada. El hecho de que la antigua zona de minado se inunde cuando la nueva zona de minado estaba siendo drenada sugiere una limitada comunicación hidráulica a lo largo del rumbo de la veta.



Foto 2.- Minado de la veta principal en la Mina Martha

1.6 Metodología de la Investigación

Con la finalidad de cumplir con los objetivos propuestos en el presente estudio, la investigación se desarrolló en tres etapas:

- Etapa I: Acopio y revisión exhaustiva de toda la información bibliográfica disponible sobre el área del proyecto. Incluyó una visita de campo inicial al área de estudio del 10 al 13 de Febrero del 2004, durante la cual se tomaron los primeros datos del sitio. Esta

etapa permitió diseñar el programa de trabajo de campo a realizar en la Etapa II. La información recopilada y revisada incluyó:

-Informes geológicos del proyecto Manantial Espejo.

-Mapa geológico regional.

-Fotos aéreas / imágenes Landsat.

-Datos de precipitación.

-Geología estructural.

-Topografía.

-Muestras de testigos de las perforaciones.

-Información geotécnica preliminar de los potenciales sitios propuestos para depósitos de relaves.

-Información hidrogeológica derivada de las visita a las Minas cercanas al proyecto: Mina Cerro Vanguardia y Mina Martha.

-Planes de desarrollo de la mina y ubicaciones propuestas para las instalaciones de la mina.

-Datos químicos de campo (pH, conductividad y temperatura) de agua subterránea y agua superficial. También se estimó el flujo en el caso de manantiales.

Etapa II: Desarrollo de la investigación de campo entre el 14 y el 28 de Mayo del 2004 con la finalidad de caracterizar la hidrogeología del sitio del proyecto. El trabajo de campo involucró:

-Mapeo hidrogeológico incluyendo: litología, fallas, fracturas, estratigrafía, profundidad de meteorización, calidad de roca, frecuencia de fracturas, suelos (espesor y clasificación).

-Inventario de puntos de agua: 89 perforaciones de exploración geológica, 10 piezómetros pre-existentes, 6 pozos de agua con molinos de viento, 5 lagunas, 5 manantiales, 1 filtración, 4 calicatas y 1 descarga de mina (Mina Martha).

-Caracterización química de campo (medición de pH, conductividad y temperatura) en manantiales, lagunas, calicatas y agua extraída de pozos recientemente instalados por GWI en mayo del 2004 y en tres pozos pre-existentes (WW-2, WW-3 y T-353).

-Perforación diamantina de 7 pozos, con profundidades entre 20 y 50 m. Realizando el registro geológico y geotécnico de los testigos obtenidos en las perforaciones. El registro de las muestras fue realizado por geólogos del proyecto minero Manantial Espejo.

-Instalación de piezómetros en los 7 pozos perforados, instalando 1 sólo piezómetro en dos de ellos y 2 piezómetros a diferentes niveles en cada uno de los otros 5 pozos. Todos estos piezómetros permitirán determinar los niveles piezométricos, química del agua, gradiente hidráulica vertical y permeabilidad del material geológico alrededor de los mismos.

-Realización de pruebas hidráulicas: 4 pruebas de inyección de agua con obturador,

9 pruebas de extracción instantánea, 10 pruebas de inyección instantánea y 2 pruebas de carga constante.

- Desarrollo de los pozos.

- Muestreo de agua en 2 piezómetros recientemente instalados, 6 pozos pre-existentes, 1 manantial, 4 lagunas y 2 calicatas en el área del proyecto. Haciendo un total de 15 puntos de muestreo. En el análisis químico de las muestras de agua se utilizó el laboratorio Ingeniería Laboral y Ambiental S.A. ubicado en Córdoba-Argentina. Los análisis realizados constituyeron metales totales, metales disueltos, aniones y química general.

- Monitoreo de niveles de agua en las perforaciones de exploración geológica, en piezómetros pre-existentes y en los piezómetros instalados en esta etapa de campo.

- Etapa III: Con los datos obtenidos en las etapas anteriores se preparó el informe final, con el cual se obtuvieron las conclusiones y recomendaciones.

1.7 Clima

El clima en el área del proyecto se describe como del tipo continental seco a árido. A continuación, en base a los datos presentados desde la Tabla 1 hasta la Tabla 11, se describe la temperatura, precipitaciones, viento y se calcula la evapotranspiración para la zona del proyecto.

1.7.1 Temperatura

Regionalmente, en base a los datos de las estaciones El Calafate y Esquel, en los meses de verano (diciembre a marzo) se tiene una temperatura media que varía de 20.6° C a 5.3° C, mientras que en los meses de invierno (junio-agosto) la temperatura media varía de 7.7 ° C a -2.9 ° C. Localmente, en base a los datos desde 1998 al 2003 de la estación meteorológica instalada en el Proyecto Manantial Espejo se tiene en los meses de verano (diciembre a marzo) una temperatura promedio de 15.9° C y en los meses de invierno (junio-agosto) una temperatura promedio de 0.9° C.

1.7.2 Viento

La Región Patagónica es bien conocida por sus vientos helados y fuertes con dirección oeste. Regionalmente, en base a los datos de la estación El Calafate, en los meses de verano (diciembre a marzo) se tiene una velocidad promedio de 20.5 km/h, mientras que en los meses de invierno (junio-agosto) la velocidad promedio es de 5.1 km/h. En la estación Esquel, en los meses de verano (diciembre a marzo) se tiene una velocidad promedio de 30.4 km/h, mientras que en los meses de invierno (junio-agosto) la velocidad promedio es de 17.4 km/h. Localmente, en base a los datos desde 1998 al 2003 de la

estación meteorológica instalada en el Proyecto Manantial Espejo se tiene en los meses de verano (diciembre a marzo) una velocidad promedio de 35.8 km/h y en los meses de invierno (junio-agosto) una velocidad promedio de 25 km/h.

1.7.3 Precipitaciones

Regionalmente, la precipitación anual promedio varía de 123.3 mm en la estación El Calafate a 394.1 mm en la estación Esquel. Localmente, la precipitación anual promedio es de 134.03 mm en la Estación Manantial Espejo, de 211 mm en la Estación Gobernador Gregores y 160.2 mm en la Estación Hotel Bella Vista. En base a esta información local, en el área del proyecto se tiene una precipitación anual promedio de 168 mm.

Tabla 1.- Estación El Calafate (datos estadísticos período 1981 - 1990)

Mes	Temperatura (°C)			Humedad relativa (%)	Viento medio (km/h)	Precipitación mensual (mm)
	Máxima	Media	Mínima			
Enero	19.2	13.4	7.8	48	19.5	5.9
Febrero	18.7	13.1	7.5	48	16.9	4.3
Marzo	16.2	10.7	5.2	51	12.4	7.5
Abril	12.4	7.6	2.8	59	9.7	14
Mayo	7.6	3.9	-0.3	69	5.8	19.2
Junio	4.8	1.5	-2.4	73	5.1	18.1
Julio	4.7	1.2	-2.8	73	6	16.3
Agosto	6.9	2.6	-1.5	68	7.2	16.1
Setiembre	10.5	5.3	0.1	58	10.1	6.3
Octubre	14.2	8.5	2.7	51	15.1	8.7
Noviembre	16.7	11.2	5	46	21.3	3
Diciembre	18.5	12.8	6.6	46	20.5	3.9
Precipitación Anual (mm)						123.3

Tabla 2.- Estación Esquel (datos estadísticos período 1981 - 1990)

Mes	Temperatura (°C)			Humedad relativa (%)	Viento medio (km/h)	Precipitación mensual (mm)
	Máxima	Media	Mínima			
Enero	21.9	15.3	8.3	48	28.9	11.6
Febrero	21.9	15.1	7.6	51	23.8	17
Marzo	19.4	12.4	5.4	57	22.4	24.5
Abril	14.8	8.2	2.7	66	19.9	33.1
Mayo	9.7	4.7	0.4	73	18	64.8
Junio	6.7	2.4	-2	77	17.7	69.6
Julio	6.3	1.5	-3	78	17.4	42.8
Agosto	8.5	3.2	-1.4	73	18.7	36.4
Setiembre	11.8	5.6	0	66	19	44.7
Octubre	15.1	8.8	2.3	56	24	18.5
Noviembre	18.4	11.9	5.1	50	28	13.1
Diciembre	20.6	14	7.1	49	30.4	18
Precipitación Anual (mm)						394.1

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Agos	Sep	Oct	Nov	Dic	Total
1997	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1998	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1999	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2001	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2002	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2003	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Total	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Tabla 3.- Registro de precipitaciones (mm) en la estación Manantial Espejo. Datos del período 1997-2003

NOTAS:

(1) En el cálculo de la precipitación anual sólo se consideran los años 1999 al 2002, pues sólo en estos años se tienen datos todos los meses del año

(2) En el cálculo del promedio anual de la precipitación, sólo se consideran los años 2000 al 2002, pues tienen valores de precipitación similares.

El año 1999 parece ser un año seco no representativo en esta serie de datos.

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Agos	Sep	Oct	Nov	Dic	Total
1971	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1972	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1973	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1974	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1975	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1976	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1977	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1978	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1979	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1980	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Total	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Tabla 4.- Registro de precipitaciones (mm) en la estación Gobernador Gregores. Datos estadísticos del período 1971-1980

Año	Mes	Temperatura (°C)						Precipitación (mm)					
		Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Agos	Sep	Oct	Nov	
1998	Ene	22.0	22.0	19.5	14.9	9.8	6.8	6.4	8.6	11.9	15.2	18.5	
	Feb	22.0	22.0	19.5	14.9	9.8	6.8	6.4	8.6	11.9	15.2	18.5	
	Mar	22.0	22.0	19.5	14.9	9.8	6.8	6.4	8.6	11.9	15.2	18.5	
	Abr	22.0	22.0	19.5	14.9	9.8	6.8	6.4	8.6	11.9	15.2	18.5	
	May	22.0	22.0	19.5	14.9	9.8	6.8	6.4	8.6	11.9	15.2	18.5	
	Jun	22.0	22.0	19.5	14.9	9.8	6.8	6.4	8.6	11.9	15.2	18.5	
	Jul	22.0	22.0	19.5	14.9	9.8	6.8	6.4	8.6	11.9	15.2	18.5	
	Agos	22.0	22.0	19.5	14.9	9.8	6.8	6.4	8.6	11.9	15.2	18.5	
	Sep	22.0	22.0	19.5	14.9	9.8	6.8	6.4	8.6	11.9	15.2	18.5	
	Oct	22.0	22.0	19.5	14.9	9.8	6.8	6.4	8.6	11.9	15.2	18.5	
	Nov	22.0	22.0	19.5	14.9	9.8	6.8	6.4	8.6	11.9	15.2	18.5	
	Dic	22.0	22.0	19.5	14.9	9.8	6.8	6.4	8.6	11.9	15.2	18.5	

Año	Mes	Temperatura (°C)				Humedad Relativa (%)				Precipitación (mm)	Viento (km/h)	Presión (mmHg)	Altimetría (m)
		Max	Min	Med	Desv	Max	Min	Med	Desv				
1999	Enero	15.5	10.5	13.0	2.5	85	65	75	10	150	15	1010	1000
	Febrero	16.0	11.0	13.5	2.5	86	66	76	10	140	15	1010	1000
	Marzo	16.5	11.5	14.0	2.5	87	67	77	10	130	15	1010	1000
	Abril	17.0	12.0	14.5	2.5	88	68	78	10	120	15	1010	1000
	Mayo	17.5	12.5	15.0	2.5	89	69	79	10	110	15	1010	1000
	Junio	18.0	13.0	15.5	2.5	90	70	80	10	100	15	1010	1000
	Julio	18.5	13.5	16.0	2.5	91	71	81	10	90	15	1010	1000
	Agosto	19.0	14.0	16.5	2.5	92	72	82	10	80	15	1010	1000
	Septiembre	19.5	14.5	17.0	2.5	93	73	83	10	70	15	1010	1000
	Octubre	20.0	15.0	17.5	2.5	94	74	84	10	60	15	1010	1000
	Noviembre	20.5	15.5	18.0	2.5	95	75	85	10	50	15	1010	1000
	Diciembre	21.0	16.0	18.5	2.5	96	76	86	10	40	15	1010	1000

Tabla 6.- Parámetros climatológicos en la estación meteorológica instalada en el proyecto Manantial Espejo – año 1999

Año	Mes	Temperatura (°C)				Humedad Relativa (%)				Precipitación (mm)	Viento (km/h)	Presión (mmHg)	Altimetría (m)
		Max	Min	Med	Desv	Max	Min	Med	Desv				
2000	Enero	15.5	10.5	13.0	2.5	85	65	75	10	150	15	1010	1000
	Febrero	16.0	11.0	13.5	2.5	86	66	76	10	140	15	1010	1000
	Marzo	16.5	11.5	14.0	2.5	87	67	77	10	130	15	1010	1000
	Abril	17.0	12.0	14.5	2.5	88	68	78	10	120	15	1010	1000
	Mayo	17.5	12.5	15.0	2.5	89	69	79	10	110	15	1010	1000
	Junio	18.0	13.0	15.5	2.5	90	70	80	10	100	15	1010	1000
	Julio	18.5	13.5	16.0	2.5	91	71	81	10	90	15	1010	1000
	Agosto	19.0	14.0	16.5	2.5	92	72	82	10	80	15	1010	1000
	Septiembre	19.5	14.5	17.0	2.5	93	73	83	10	70	15	1010	1000
	Octubre	20.0	15.0	17.5	2.5	94	74	84	10	60	15	1010	1000
	Noviembre	20.5	15.5	18.0	2.5	95	75	85	10	50	15	1010	1000
	Diciembre	21.0	16.0	18.5	2.5	96	76	86	10	40	15	1010	1000

Tabla 7.- Parámetros climatológicos en la estación meteorológica instalada en el proyecto Manantial Espejo – año 2000

Año	Mes	Temperatura (°C)				Humedad Relativa (%)				Precipitación (mm)	Viento (km/h)	Presión (mmHg)	Altimetría (m)
		Max	Min	Med	Desv	Max	Min	Med	Desv				
2001	Enero	15.5	10.5	13.0	2.5	85	65	75	10	150	15	1010	1000
	Febrero	16.0	11.0	13.5	2.5	86	66	76	10	140	15	1010	1000
	Marzo	16.5	11.5	14.0	2.5	87	67	77	10	130	15	1010	1000
	Abril	17.0	12.0	14.5	2.5	88	68	78	10	120	15	1010	1000
	Mayo	17.5	12.5	15.0	2.5	89	69	79	10	110	15	1010	1000
	Junio	18.0	13.0	15.5	2.5	90	70	80	10	100	15	1010	1000
	Julio	18.5	13.5	16.0	2.5	91	71	81	10	90	15	1010	1000
	Agosto	19.0	14.0	16.5	2.5	92	72	82	10	80	15	1010	1000
	Septiembre	19.5	14.5	17.0	2.5	93	73	83	10	70	15	1010	1000
	Octubre	20.0	15.0	17.5	2.5	94	74	84	10	60	15	1010	1000
	Noviembre	20.5	15.5	18.0	2.5	95	75	85	10	50	15	1010	1000
	Diciembre	21.0	16.0	18.5	2.5	96	76	86	10	40	15	1010	1000

Tabla 8.- Parámetros climatológicos en la estación meteorológica instalada en el proyecto Manantial Espejo – año 2001

Año	Mes	Temperatura (°C)				Humedad Relativa (%)				Precipitación (mm)	Viento (km/h)	Presión (mmHg)	Altimetría (m)
		Max	Min	Med	Desv	Max	Min	Med	Desv				
2002	Enero	15.5	10.5	13.0	2.5	85	65	75	10	150	15	1010	1000
	Febrero	16.0	11.0	13.5	2.5	86	66	76	10	140	15	1010	1000
	Marzo	16.5	11.5	14.0	2.5	87	67	77	10	130	15	1010	1000
	Abril	17.0	12.0	14.5	2.5	88	68	78	10	120	15	1010	1000
	Mayo	17.5	12.5	15.0	2.5	89	69	79	10	110	15	1010	1000
	Junio	18.0	13.0	15.5	2.5	90	70	80	10	100	15	1010	1000
	Julio	18.5	13.5	16.0	2.5	91	71	81	10	90	15	1010	1000
	Agosto	19.0	14.0	16.5	2.5	92	72	82	10	80	15	1010	1000
	Septiembre	19.5	14.5	17.0	2.5	93	73	83	10	70	15	1010	1000
	Octubre	20.0	15.0	17.5	2.5	94	74	84	10	60	15	1010	1000
	Noviembre	20.5	15.5	18.0	2.5	95	75	85	10	50	15	1010	1000
	Diciembre	21.0	16.0	18.5	2.5	96	76	86	10	40	15	1010	1000

Tabla 9.- Parámetros climatológicos en la estación meteorológica instalada en el proyecto Manantial Espejo – año 2002

Año	Mes	Temperatura (°C)				Humedad Relativa (%)				Precipitación (mm)	Viento (km/h)	Presión (mmHg)	Altimetría (m)
		Max	Min	Med	Desv	Max	Min	Med	Desv				
2003	Enero	15.5	10.5	13.0	2.5	85	65	75	10	150	15	1010	1000
	Febrero	16.0	11.0	13.5	2.5	86	66	76	10	140	15	1010	1000
	Marzo	16.5	11.5	14.0	2.5	87	67	77	10	130	15	1010	1000
	Abril	17.0	12.0	14.5	2.5	88	68	78	10	120	15	1010	1000
	Mayo	17.5	12.5	15.0	2.5	89	69	79	10	110	15	1010	1000
	Junio	18.0	13.0	15.5	2.5	90	70	80	10	100	15	1010	1000
	Julio	18.5	13.5	16.0	2.5	91	71	81	10	90	15	1010	1000
	Agosto	19.0	14.0	16.5	2.5	92	72	82	10	80	15	1010	1000
	Septiembre	19.5	14.5	17.0	2.5	93	73	83	10	70	15	1010	1000
	Octubre	20.0	15.0	17.5	2.5	94	74	84	10	60	15	1010	1000
	Noviembre	20.5	15.5	18.0	2.5	95	75	85	10	50	15	1010	1000
	Diciembre	21.0	16.0	18.5	2.5	96	76	86	10	40	15	1010	1000

Tabla 10.- Parámetros climatológicos en la estación meteorológica instalada en el proyecto Manantial Espejo – año 2003

[illegible]

Tabla 11.- Registro de precipitaciones (mm) en la estación Hotel Bella Vista. Datos del período 1963-2003

[illegible][illegible]

1.7.4 Evapotranspiración

La evapotranspiración es un fenómeno físico que suma el de evaporación y el de transpiración. La unidad utilizada para la evapotranspiración es el milímetro de altura de agua, al igual que la lluvia, y que equivale a 1 l/m^2 ó $10 \text{ m}^3/\text{ha}$.

La evaporación es el paso del estado líquido al estado gaseoso del agua. La transpiración es básicamente el mismo fenómeno pero que ocurre a través del sistema circulatorio de las plantas, y que a su vez toman agua del suelo edáfico. En las superficies cubiertas por la vegetación, se reúnen ambos conceptos de manera que la separación cuantitativa es prácticamente imposible.

Se tienen dos tipos de evapotranspiración:

- La evapotranspiración potencial (ETP) es la evapotranspiración que se produciría si se cumplieran dos hipótesis: que existe un desarrollo vegetativo óptimo y que la humedad del suelo coincida con su capacidad de campo.
- La evapotranspiración real (ETR) representa lo que realmente vuelve a la atmósfera por evapotranspiración, en las condiciones reales del área estudiada. Ésta depende de la cantidad de agua disponible para evaporarse en una zona determinada. En otras palabras la ETP es el límite máximo de la ETR.

Se realizaron cálculos de evapotranspiración potencial (ETP) según el método de

Thornthwaite, obteniendo un valor de 649 mm y cálculos para determinar la evapotranspiración real (ETR) por el método de Turc, obteniendo un valor de 168 mm. A continuación se explica brevemente los métodos de cálculo utilizados:

Cálculo de la ETP por el método de Thornthwaite

El método de cálculo de Thornthwaite para obtener la ETP, utiliza como variable fundamental la temperatura media de cada mes, según el siguiente procedimiento:

-cálculo del índice de calor mensual:

$$i = \left(\frac{t}{5} \right)^{1.514}$$

siendo "t" la temperatura media diaria en °C.

-cálculo del índice de calor anual I:

$$I = \sum i$$

-considerando meses teóricos de 30 días con 12 horas diarias de sol, se calcula la evapotranspiración potencial media en mm/día:

$$\varepsilon = 16 \times \left(10 \times \frac{t}{I} \right)^a$$

donde:

ε = evapotranspiración potencial media en mm/día

t = temperatura media diaria del mes en °C

I = índice de calor mensual

$a = (675 \times 10^{-9} \times I^3) - (771 \times 10^{-7} \times I^2) + (1972 \times 10^{-5} \times I) + 0.49239$

-considerando la duración real del mes y el número máximo de horas de sol según la latitud del lugar se obtiene la ETP en mm/mes:

$ETP = K \times \varepsilon$

$$K = \frac{N}{12} \times \frac{d}{30} \times d$$

donde:

N, número máximo de horas de sol según la latitud

d, número de días del mes.

Entonces, siguiendo el procedimiento de cálculos indicado con los datos del período 1998 al 2003, se determinó que la ETP promedio en la zona es de 649 mm/año. Estos resultados se aprecian en la tabla 12, y el cálculo detallado de cada uno de los valores por año se presenta desde la tabla 13 hasta la tabla 18.

Tabla 12.- Valores de ETP calculados por el método de Thornthwaite

Año	ETP (mm/año)	ETP Promedio (mm/año)
1998	684.45	649.18
1999	677.86	
2000	615.36	
2001	646.41	
2002	621.59	
2003	649.40	

[illegible]

Tabla13.- Cálculo de la ETP del año 1998 por el método de Thornthwaite

[illegible]

Tabla14.- Cálculo de la ETP del año 1999 por el método de Thornthwaite

[illegible]

[illegible]

2020	Spain	10.00	1.00	10.00	1.00	40.00	1.00	50	1.00	1.00	1.00	
	France	10.00	1.00	10.00	1.00	40.00	1.00	50	1.00	1.00	1.00	
	Germany	10.00	1.00	10.00	1.00	40.00	1.00	50	1.00	1.00	1.00	
	Italy	10.00	1.00	10.00	1.00	40.00	1.00	50	1.00	1.00	1.00	
	Japan	10.00	1.00	10.00	1.00	40.00	1.00	50	1.00	1.00	1.00	
	UK	10.00	1.00	10.00	1.00	40.00	1.00	50	1.00	1.00	1.00	
	Canada	10.00	1.00	10.00	1.00	40.00	1.00	50	1.00	1.00	1.00	
	China	10.00	1.00	10.00	1.00	40.00	1.00	50	1.00	1.00	1.00	
	India	10.00	1.00	10.00	1.00	40.00	1.00	50	1.00	1.00	1.00	
	South Korea	10.00	1.00	10.00	1.00	40.00	1.00	50	1.00	1.00	1.00	

[illegible]

fórmula definida por Turc, quien luego de experimentar en más de 200 cuencas en diversas partes del mundo, llegó a la expresión:

$$ETR = \frac{1}{\sqrt{0.9 + \frac{P^2}{L^2}}}$$

$$L = 300 + 25 t + 0.05t^2$$

t = temperatura media anual en oC

Entonces, aplicando la fórmula de Turc, para el período 1998 al 2003, se determinó que la ETR promedio en la zona es de 168 mm/año. Estos resultados se aprecian en la tabla 19.

Tabla 19.- Resultados de la ETR por el método de Turc

Año	t (temperatura promedio anual)	L	P (mm/año)	ETR (mm/año)	ETR Promedio (mm/año)
1998	10.02	555.54	168	168.72	167.67
1999	9.44	540.42	168	168.28	
2000	7.77	497.28	168	166.83	
2001	8.51	516.32	168	167.51	
2002	7.83	498.79	168	166.88	
2003	8.85	525.10	168	167.80	

1.8 Vegetación

Vegetación dispersa cubre el piso del valle y delinea las pequeñas cárcavas (Foto 3). Debido a los fuertes vientos y una falta de precipitación significativa, la flora natural es predominantemente pasto seco grueso de color amarillo con algunos arbustos espinosos menores. Pequeñas concentraciones de dichos arbustos de uno o dos metros de altura tienen lugar a lo largo de las cárcavas y los pisos de los valles angostos.



Foto 3.- Vista de la pampa aluvial con vegetación típica

1.9 Drenaje de la Región

Al oeste del área objeto de estudio se encuentra la cuenca hidrográfica del Río Chico que es el único curso de agua permanente en el área. El río nace en el noroeste, en la meseta de La Muerte, y recibe los caudales de los ríos Capitán, Lista y Belgrano, los cuales se ubican fuera de los límites de la Figura 2. Finalmente, el río desemboca en el Océano Atlántico. El valle del Río Chico es ancho, profundo y meandriforme, creando diversas islas dentro de la planicie de inundación.

En el Macizo Volcánico, casi todo el drenaje del agua superficial y agua subterránea es interno, es decir, la escorrentía y las filtraciones se concentran en cuencas cerradas en vez de dirigirse hacia cursos de agua superficiales o hacia la Pampa Aluvial. Estas cuencas cerradas en el Macizo Volcánico tienen una forma elíptica o sub-circular con diámetros que varían de centenares de metros a dos o tres kilómetros y profundidades de hasta 25 m, generalmente contienen arcillas estratificadas, arena y comúnmente sales solubles. Sólo en los períodos de deshielo, la escorrentía alimenta las cuencas. Lagos efímeros pueden formarse en las cuencas durante los períodos húmedos. En estas cuencas cerradas se tiene evaporación y una lenta filtración hacia los sedimentos subyacentes de baja permeabilidad. El agua existente en dichas cuencas varía de salobre (2,000 a 10,000 ppm) a hipersalino (>100,000 ppm).

2 MEDIO FÍSICO

2.1 Geomorfología

La región es relativamente llana donde destacan zonas suavemente onduladas y mesetas que permiten un acceso excelente a lo largo de toda el área. La elevación varía entre 250 m.s.n.m. hacia el este y 480 m.s.n.m. en la parte occidental de la propiedad. Varias lagunas temporales y pequeños lagos de poca profundidad se llenan durante los períodos de mayor precipitación pero muy raramente contienen agua durante todo el resto del año. Aproximadamente 35 a 40% de la superficie está constituida por afloramientos de roca y el otro 60 a 65% por suelo. Las zonas de sílice porosa (vuggy) son resistentes a la meteorización y forman montículos prominentes.

En el área existen aproximadamente 200 cuencas cerradas de evaporación con diámetros de 30 m a 1 km. El sitio actual preferido para el depósito de relaves (denominado “Centro Volcánico”) es un ejemplo de estas cuencas cerradas. Sólo las cuencas más grandes y profundas en el macizo volcánico contienen lagunas permanentes (como la Laguna La Gruta). De acuerdo a las mediciones de niveles piezométricos en el Centro Volcánico, se estima que en la base de las cuencas el nivel freático se encuentra a poca profundidad (de 1 a 3 m).

2.2 Geología del Área de Estudio

En esta sección se describen las formaciones geológicas aflorantes en el área de estudio. En la Figura 2 se presenta la geología regional y en la Figura 3 dos secciones geológicas regionales del área.

2.2.1 Jurásico

Formación Bajo Pobre (Jurásico medio)

Es la formación geológica más antigua expuesta en el área del proyecto, así como la segunda formación geológica más común en dicha zona. Está conformada por basaltos, andesitas y aglomerados. Las unidades de roca de esta formación generalmente están fracturadas y exhiben sistemas de fracturas que producen bloques tabulares.

Formación Chon Aike (Jurásico medio – superior)

Formación conformada por ignimbritas riolíticas relacionadas con tobas, tobas líticas y aglomerados volcánicos ácidos. El tipo más común de roca encontrado son tobas de cristales conteniendo entre 1 a 2% de fragmentos líticos. En la periferia de las principales vetas: María, Concepción y Karina-Unión las tobas y flujos tienen una matriz rica en potasio y tienen una naturaleza mas porfirítica.

2.2.2 Jurásico-Cretáceo

Formación La Matilde (Jurásico superior – Cretáceo inferior)

Esta formación está compuesta de flujos de tobas líticas, chert laminado, grauwackas y aglomerados heterolíticos. Estas rocas se interpretan como el final de la actividad volcánica en el área. Las capas volcánico-sedimentarias, flujos de tufos líticos y aglomerados fueron producidos por un período erosional que marcó el final del vulcanismo Jurásico, el cual fue seguido por un episodio de débil volcanismo en el Cretáceo inferior.

2.2.3 Paleógeno

Formación Monte León (Oligoceno superior)

Esta formación (Foto 4) está conformada por sedimentos marinos, principalmente coquinas y areniscas gruesas coquinoides. Se encuentra en pequeños afloramientos discontinuos, resistentes a la erosión y con espesor limitado. El espesor local parece estar entre los 5 a 10 m. Esta formación se depositó en un ambiente de mar somero durante la transgresión del Mar de Patagonia. La regresión del Mar de Patagonia incrementó la erosión continental y se depositó la Fm. Santa Cruz.



Foto 4.- Formación Monte León (Estancia La Gruta)

2.2.4 Neógeno

Formación Santa Cruz (Mioceno inferior)

Unidad sedimentaria continental, característica de un ambiente de llanura aluvial distal (Foto 5). Está constituida por lodolitas y limolitas, presentando en menor cantidad areniscas de grano medio a fino y tufos. Estos afloramientos, generalmente producen superficies tipo “tierras malas”. La completa secuencia estratigráfica se estima tiene un espesor mayor a los 300 m. La repetición cíclica de capas lenticulares de areniscas y pelitas indica que estos depósitos son el resultado de un ambiente fluvial, en meandros, donde predominan las facies de llanura de inundación sobre los canales.



Foto 5.- Formación Santa Cruz (en Río Chico)

Basaltos Gregores (Mioceno-Plioceno)

Forman una pared subvertical inmediatamente al norte y noreste del poblado Gregores. Esta unidad está constituida de varios flujos de lava (de 2 a 15 m de espesor), los cuales en conjunto forman una abrupta diferencia de elevaciones de 30 a 40 m en el lado norte de la pampa. Algunos flujos son vesiculares con vesículas de hasta 10 mm de diámetro. El basalto rellenó las depresiones del paleorelieve existente en la Fm. Santa Cruz, lo cual explica su limitada distribución en área.

Tres manantiales (Foto 6), con un flujo combinado estimado en 15 l/s, fueron encontrados en la base de los basaltos Gregores en el lado norte de la Pampa (aprox. 30 km al oeste del proyecto). Los manantiales alimentan una cuenca endorreica donde el agua se pierde por evaporación e infiltración. Los manantiales parecen ser el principal punto de descarga de los basaltos Gregores.



Foto 6.- Basaltos Gregores con manantiales descargando a una laguna

Formación La Avenida (Plioceno Inferior)

La Formación La Avenida es un depósito tabular que consiste de gravas media a gruesa en una matriz arenosa y se encuentra constituyendo el área denominada la Pampa Aluvial. Esta pampa tiene una suave pendiente hacia el este, con una altura topográfica de aproximadamente 370 m cerca al poblado Gregores y de 310 m cerca de la zona del proyecto Manantial Espejo (un descenso de 60 m en aproximadamente 45 km, produciendo una pendiente de 0.001). El depósito es mejor visto en las canteras (Foto 7) ubicadas a lo largo de la Ruta 25, el cual consiste de agregados sueltos de gravas de grano medio a grueso hasta cantos redondeados en una matriz arenosa. Las canteras en el centro del valle tienen guijarros (hasta un 60-80%) en una matriz arenosa de grano medio a fino. Los cantos son subangulares a redondeados, con clastos comúnmente entre 1 a 5 cm de diámetro (con un máximo de hasta 15 cm). La profundidad de la Pampa Aluvial, en base a información geofísica parece estar entre los 40 y 120 m (QGA S.A., 2004).



Foto 7.- Cantera en la pampa aluvial (Formación La Avenida)

2.2.5 Cuaternario

En la zona del macizo volcánico se tienen principalmente suelos residuales conformados por arena limosa fina a media y en áreas con taludes depósitos coluviales constituidos de arena fina a media, mezclada con variables proporciones de limos, arcillas y fragmentos de roca angulosos. En las cuencas cerradas se tienen depósitos lacustres (limos, limos arcillosos y arcillas).

2.3 Estructura y Mineralización

La configuración estructural de la mineralización epitermal de oro-plata está directamente relacionada a los esfuerzos tectónicos que ocurrieron durante el Jurásico medio a superior. La extrusión de volcánicos félsicos formaron la mayoría de los afloramientos encontrados en el macizo volcánico. La actividad hidrotermal marcó el final del volcanismo Jurásico y subsecuentemente produjo los depósitos de oro y plata en Cerro Vanguardia y Manantial Espejo. Varias estructuras circulares han sido identificadas en la imagen Landsat TM de los cuales una se encuentra en la propiedad de Manantial Espejo. Estas estructuras circulares han sido identificadas como centros volcánicos que exhiben anomalías de alteración y patrones de fracturas que son típicos de grandes sistemas hidrotermales conocidos que ocurren en las márgenes de las calderas (ERA-Maptec Ltd., 1997). El centro volcánico en la zona del proyecto se ubica a 3 km al noreste de la veta María.

La mineralización se ubica en vetas de cuarzo de alto ángulo y de baja sulfuración, las cuáles cortan todas las litologías presentes. La mineralización se da en una extensión

vertical de 300 m en flujos y tobas riolíticas. El oro normalmente se encuentra como electrum y la plata en argentita, acantita y otras sulfosales.

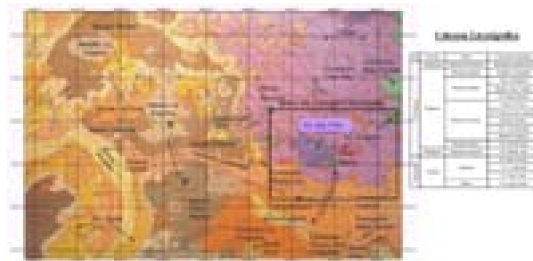


Figura 2.- Geología regional

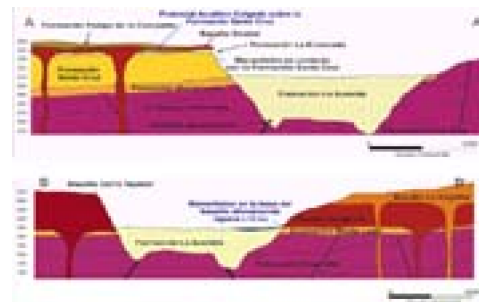


Figura 3.- Secciones geológicas regionales

3. INVENTARIO DE PUNTOS DE AGUA

3.1 Generalidades

Un inventario de puntos de agua consiste en la recopilación y análisis de todos los datos relacionados con la hidrología subterránea que se disponen de la región o acuífero estudiado. Permite empezar a conocer las características hidrogeológicas de una región o acuífero (por lo menos en las primeras etapas del estudio) sin tener que recurrir a reconocimientos de tipo directo (pozos, sondeos, piezómetros).

Un punto de agua es aquel objeto, instalación, obra civil, situación natural o artificial, que permite tener un acceso directo o indirecto a los acuíferos de la zona en estudio. En este sentido, caen dentro de la definición anterior todas las perforaciones existentes, ya sean o no explotadas, abandonadas o incluso destruidas, los manantiales, ríos y lagunas. Es importante considerar que casi siempre no será posible, ni conveniente, realizar el inventario de todos los pozos existentes, sino de los más característicos. Los datos a inventariar de cada punto de agua son de diferente naturaleza y se complementan entre ellos:

- Administrativos.- propietario, usuario, dirección, teléfono, persona de contacto, número de la concesión o autorización oficial de la captación, nombre, caudal concedido, etc.

- Geográficos.- situación geográfica, generalmente sobre la base de las coordenadas geográficas UTM, o bien en mapas topográficos, altimétricos, etc.
- Hidrológicos.- caudal extraído, posición del nivel del agua, descensos medidos, análisis de muestras, uso actual del agua, datos sobre ensayos de bombeo o pruebas de permeabilidad efectuados, etc.
- Constructivos.- tipo de captación, diámetro, profundidad, tipo de revestimiento de la captación, posición y clase de la rejilla filtrante, etc.
- Geológicos.- perfil geológico de los materiales atravesados por la captación, litología, estratigrafía y estructuras.
- Bibliográficos.- antecedentes o documentación previa sobre perforaciones o pozos en áreas cercanas a la estudiada, ensayos de bombeo efectuados anteriormente en la misma, etc.

Finalmente, se deben preparar mapas a una escala conveniente, donde se puedan disponer los puntos de agua ya mencionados. Una vez dibujados dichos mapas es preciso plantearse ya las primeras evaluaciones por realizar, determinando las zonas con falta de información o con poca densidad de datos, así como los métodos o sistemas para su obtención, y que puede suponer visitar de nuevo aquellas captaciones cuyos datos sean inexistentes o poco fiables.

3.2 Objetivos

- Obtener la distribución espacial de los puntos de agua.
- Identificar las zonas con información y las zonas con falta de información o con poca densidad de datos.
- Conocer rápidamente las características hidrogeológicas de los materiales geológicos de la zona.

3.3 Resultados del Inventario

Se han inventariado un total de 121 puntos pre-existentes en la zona de estudio: 89 perforaciones diamantinas HQ de exploración geológica que se encontraban abiertas y presentaban agua en su interior, 10 piezómetros pre-existentes, 6 pozos de agua con molinos de viento, 5 lagunas, 5 manantiales, 1 filtración, 4 calicatas (con presencia de agua) y una descarga de mina (Mina Martha). Todos estos datos se presentan desde la Tabla 20 hasta la Tabla 23. En la Figura 4 y Figura 5 se presentan todos los puntos de agua inventariados.

En todos los pozos inventariados se midieron los niveles piezométricos, mientras que

3. INVENTARIO DE PUNTOS DE AGUA

la química de campo (pH, conductividad eléctrica, temperatura) se midió sólo en los pozos que se desarrollaron para tomar muestras de agua. También se midió la química de campo a las lagunas, aguas de calicatas y manantiales. En el caso de manantiales se hicieron estimados de flujo. En las lagunas, calicatas y manantiales más representativos se tomaron muestras de agua.

Los pozos de agua con molinos de viento que utilizaban los pobladores de la zona para regadío y consumo actualmente no se usan, pues los sistemas de molino de viento fueron destruidos por una tormenta con vientos de más de 100 km/h en la zona del proyecto, la cual ocurrió hace 10 años.

Identificación	Coordenadas		Altitud (metros)	Profundidad (m)	Estado	Caudal (m³/s)	Muestra (litros)	Temperatura (°C)	Muestra (litros)
	Norte	Este							
1-001	4545000.00	4545000.00	100.00	10.00	1	100	10.00	10.00	10.00
1-002	4545000.00	4545000.00	100.00	10.00	1	100	10.00	10.00	10.00
1-003	4545000.00	4545000.00	100.00	10.00	1	100	10.00	10.00	10.00
1-004	4545000.00	4545000.00	100.00	10.00	1	100	10.00	10.00	10.00
1-005	4545000.00	4545000.00	100.00	10.00	1	100	10.00	10.00	10.00
1-006	4545000.00	4545000.00	100.00	10.00	1	100	10.00	10.00	10.00
1-007	4545000.00	4545000.00	100.00	10.00	1	100	10.00	10.00	10.00
1-008	4545000.00	4545000.00	100.00	10.00	1	100	10.00	10.00	10.00
1-009	4545000.00	4545000.00	100.00	10.00	1	100	10.00	10.00	10.00
1-010	4545000.00	4545000.00	100.00	10.00	1	100	10.00	10.00	10.00
1-011	4545000.00	4545000.00	100.00	10.00	1	100	10.00	10.00	10.00
1-012	4545000.00	4545000.00	100.00	10.00	1	100	10.00	10.00	10.00
1-013	4545000.00	4545000.00	100.00	10.00	1	100	10.00	10.00	10.00
1-014	4545000.00	4545000.00	100.00	10.00	1	100	10.00	10.00	10.00
1-015	4545000.00	4545000.00	100.00	10.00	1	100	10.00	10.00	10.00
1-016	4545000.00	4545000.00	100.00	10.00	1	100	10.00	10.00	10.00
1-017	4545000.00	4545000.00	100.00	10.00	1	100	10.00	10.00	10.00
1-018	4545000.00	4545000.00	100.00	10.00	1	100	10.00	10.00	10.00
1-019	4545000.00	4545000.00	100.00	10.00	1	100	10.00	10.00	10.00
1-020	4545000.00	4545000.00	100.00	10.00	1	100	10.00	10.00	10.00

Tabla 20.- Inventario de perforaciones de exploración geológica pre-existentes en la zona de estudio

Identificación	Coordenadas		Altitud (metros)	Profundidad (m)	Estado	Tipo de Fuente	Caudal (m³/s)	Temperatura (°C)	Muestra (litros)	Fecha de Muestra	Observaciones
	Norte	Este									
1-001	4545000.00	4545000.00	100.00	10.00	1	100	10.00	10.00	10.00	10.00	
1-002	4545000.00	4545000.00	100.00	10.00	1	100	10.00	10.00	10.00	10.00	
1-003	4545000.00	4545000.00	100.00	10.00	1	100	10.00	10.00	10.00	10.00	
1-004	4545000.00	4545000.00	100.00	10.00	1	100	10.00	10.00	10.00	10.00	
1-005	4545000.00	4545000.00	100.00	10.00	1	100	10.00	10.00	10.00	10.00	
1-006	4545000.00	4545000.00	100.00	10.00	1	100	10.00	10.00	10.00	10.00	
1-007	4545000.00	4545000.00	100.00	10.00	1	100	10.00	10.00	10.00	10.00	
1-008	4545000.00	4545000.00	100.00	10.00	1	100	10.00	10.00	10.00	10.00	
1-009	4545000.00	4545000.00	100.00	10.00	1	100	10.00	10.00	10.00	10.00	
1-010	4545000.00	4545000.00	100.00	10.00	1	100	10.00	10.00	10.00	10.00	
1-011	4545000.00	4545000.00	100.00	10.00	1	100	10.00	10.00	10.00	10.00	
1-012	4545000.00	4545000.00	100.00	10.00	1	100	10.00	10.00	10.00	10.00	
1-013	4545000.00	4545000.00	100.00	10.00	1	100	10.00	10.00	10.00	10.00	
1-014	4545000.00	4545000.00	100.00	10.00	1	100	10.00	10.00	10.00	10.00	
1-015	4545000.00	4545000.00	100.00	10.00	1	100	10.00	10.00	10.00	10.00	
1-016	4545000.00	4545000.00	100.00	10.00	1	100	10.00	10.00	10.00	10.00	
1-017	4545000.00	4545000.00	100.00	10.00	1	100	10.00	10.00	10.00	10.00	
1-018	4545000.00	4545000.00	100.00	10.00	1	100	10.00	10.00	10.00	10.00	
1-019	4545000.00	4545000.00	100.00	10.00	1	100	10.00	10.00	10.00	10.00	
1-020	4545000.00	4545000.00	100.00	10.00	1	100	10.00	10.00	10.00	10.00	

Estaciones	Geodetic Data		Elevation (meters)	Antenna Height (m)	Latitude	Longitude	Date	Main Tides (mm)	Expenditure (mm)	New Tides (mm)
	North	East								
1-0000	4545000.00	4545000.00	100.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00
1-0001	4545000.00	4545000.00	100.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00
1-0002	4545000.00	4545000.00	100.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00
1-0003	4545000.00	4545000.00	100.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00
1-0004	4545000.00	4545000.00	100.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00
1-0005	4545000.00	4545000.00	100.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00
1-0006	4545000.00	4545000.00	100.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00
1-0007	4545000.00	4545000.00	100.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00
1-0008	4545000.00	4545000.00	100.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00
1-0009	4545000.00	4545000.00	100.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00
1-0010	4545000.00	4545000.00	100.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00
1-0011	4545000.00	4545000.00	100.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00
1-0012	4545000.00	4545000.00	100.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00
1-0013	4545000.00	4545000.00	100.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00
1-0014	4545000.00	4545000.00	100.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00
1-0015	4545000.00	4545000.00	100.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00
1-0016	4545000.00	4545000.00	100.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00
1-0017	4545000.00	4545000.00	100.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00
1-0018	4545000.00	4545000.00	100.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00
1-0019	4545000.00	4545000.00	100.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00
1-0020	4545000.00	4545000.00	100.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00
1-0021	4545000.00	4545000.00	100.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00
1-0022	4545000.00	4545000.00	100.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00
1-0023	4545000.00	4545000.00	100.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00
1-0024	4545000.00	4545000.00	100.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00
1-0025	4545000.00	4545000.00	100.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00
1-0026	4545000.00	4545000.00	100.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00
1-0027	4545000.00	4545000.00	100.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00
1-0028	4545000.00	4545000.00	100.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00
1-0029	4545000.00	4545000.00	100.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00
1-0030	4545000.00	4545000.00	100.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00

Identificación	Coordenadas Geográficas		Altitud Superficie (m)	Profundidad PZ (m)	Estado	Caudal (litros/s)	Temperatura (Grados C)	Caudal (m³/s)	Observaciones
	Norte	Este							
1-061	4545000.00	4545000.00	100.00	10.00	1	100	10.00	10.00	
1-062	4545000.00	4545000.00	100.00	10.00	1	100	10.00	10.00	
1-063	4545000.00	4545000.00	100.00	10.00	1	100	10.00	10.00	
1-064	4545000.00	4545000.00	100.00	10.00	1	100	10.00	10.00	
1-065	4545000.00	4545000.00	100.00	10.00	1	100	10.00	10.00	
1-066	4545000.00	4545000.00	100.00	10.00	1	100	10.00	10.00	
1-067	4545000.00	4545000.00	100.00	10.00	1	100	10.00	10.00	
1-068	4545000.00	4545000.00	100.00	10.00	1	100	10.00	10.00	
1-069	4545000.00	4545000.00	100.00	10.00	1	100	10.00	10.00	
1-070	4545000.00	4545000.00	100.00	10.00	1	100	10.00	10.00	
1-071	4545000.00	4545000.00	100.00	10.00	1	100	10.00	10.00	
1-072	4545000.00	4545000.00	100.00	10.00	1	100	10.00	10.00	
1-073	4545000.00	4545000.00	100.00	10.00	1	100	10.00	10.00	
1-074	4545000.00	4545000.00	100.00	10.00	1	100	10.00	10.00	
1-075	4545000.00	4545000.00	100.00	10.00	1	100	10.00	10.00	
1-076	4545000.00	4545000.00	100.00	10.00	1	100	10.00	10.00	
1-077	4545000.00	4545000.00	100.00	10.00	1	100	10.00	10.00	
1-078	4545000.00	4545000.00	100.00	10.00	1	100	10.00	10.00	
1-079	4545000.00	4545000.00	100.00	10.00	1	100	10.00	10.00	
1-080	4545000.00	4545000.00	100.00	10.00	1	100	10.00	10.00	

Identificación	Código Único		Elevación Superficie (metros)	Elevación Codo Piezo (m)	Altitud (metros)	Cota (metros)	Cota Piezo (metros)	Elevación Superficie (metros)	Elevación Codo Piezo (metros)
	Antes	Después							
P-001	4440000000	4440000000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
P-002	4440000000	4440000000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
P-003	4440000000	4440000000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
P-004	4440000000	4440000000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
P-005	4440000000	4440000000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
P-006	4440000000	4440000000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
P-007	4440000000	4440000000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
P-008	4440000000	4440000000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
P-009	4440000000	4440000000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
P-010	4440000000	4440000000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
P-011	4440000000	4440000000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
P-012	4440000000	4440000000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
P-013	4440000000	4440000000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
P-014	4440000000	4440000000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
P-015	4440000000	4440000000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
P-016	4440000000	4440000000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
P-017	4440000000	4440000000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
P-018	4440000000	4440000000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
P-019	4440000000	4440000000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
P-020	4440000000	4440000000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000

Identificación	Código Único		Elevación Superficie (metros)	Elevación Codo Piezo (m)	Altitud (metros)	Cota (metros)	Cota Piezo (metros)	Elevación Superficie (metros)	Elevación Codo Piezo (metros)
	Antes	Después							
P-021	4440000000	4440000000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
P-022	4440000000	4440000000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
P-023	4440000000	4440000000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
P-024	4440000000	4440000000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
P-025	4440000000	4440000000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
P-026	4440000000	4440000000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
P-027	4440000000	4440000000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
P-028	4440000000	4440000000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
P-029	4440000000	4440000000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
P-030	4440000000	4440000000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
P-031	4440000000	4440000000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
P-032	4440000000	4440000000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
P-033	4440000000	4440000000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
P-034	4440000000	4440000000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
P-035	4440000000	4440000000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
P-036	4440000000	4440000000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
P-037	4440000000	4440000000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
P-038	4440000000	4440000000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
P-039	4440000000	4440000000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
P-040	4440000000	4440000000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000

Identificación	Código Único		Elevación Superficie (metros)	Elevación Codo Piezo (m)	Altitud (metros)	Cota (metros)	Cota Piezo (metros)	Elevación Superficie (metros)	Elevación Codo Piezo (metros)
	Antes	Después							
P-041	4440000000	4440000000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
P-042	4440000000	4440000000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
P-043	4440000000	4440000000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
P-044	4440000000	4440000000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
P-045	4440000000	4440000000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
P-046	4440000000	4440000000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
P-047	4440000000	4440000000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
P-048	4440000000	4440000000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
P-049	4440000000	4440000000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
P-050	4440000000	4440000000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000

Identificación	Código Único		Elevación Superficie (metros)	Elevación Codo Piezo (m)	Altitud (metros)	Cota (metros)	Cota Piezo (metros)	Elevación Superficie (metros)	Elevación Codo Piezo (metros)
	Antes	Después							
P-051	4440000000	4440000000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
P-052	4440000000	4440000000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
P-053	4440000000	4440000000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
P-054	4440000000	4440000000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
P-055	4440000000	4440000000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
P-056	4440000000	4440000000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
P-057	4440000000	4440000000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
P-058	4440000000	4440000000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
P-059	4440000000	4440000000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
P-060	4440000000	4440000000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000

Tabla 21.- Inventario de piezómetros pre-existentes en la zona de estudio

Tabla 22.- Inventario de pozos de agua accionados por el viento

3. INVENTARIO DE PUNTOS DE AGUA

Pozos con Molinos	Coordenadas Gauss-Kruger		Eleva-ci (msnm)	Profun-	CE (uS/cm)	pH	T (°C)	Q (l/s)	Nivel Freático (m)
	Norte (1)	Este (1)							
Campo de Pozos en Poblado Puerto San Julián			-	-	583	7.9	-	13	-
Pozo en Estancia 17 de Marzo.	4579465	2466540	-	-	450	8.1	11	0.5	-
Pozo en Estancia La Gruta	4589900	2472000	-	-	893	8.35	11.7	-	-
WW-3 (MOLINO 2), pampa, antes del macizo.	4589251	2459436	306.42	25	519	7.52	9.4	0 ⁽²⁾	286.3
WW-1 (MOLINO 1), sur de veta María.	4594051	2461453	331.8	42.86	-	-	-	0 ⁽²⁾	320.2
WW-2, centro volcánico.	4597271	2463843	342.65	79.1	1079	8.17	10.3	0 ⁽²⁾	341.6

(1) Pozo ubicado a 160 km al este del área del proyecto, se tomó como referencia del agua que conduce a la Pampa cerca al pueblo Puerto San Julián.

(2) Sistema de molino que accionaba el pozo fue destruido por tormenta ocurrida unos años atrás. Por lo que actualmente no producen flujo.

Tabla 23 .- Inventario de lagunas, manantiales, filtraciones, calicatas y descargas de mina

Identificación	Coordenadas Gauss-Kruger		CE (uS/cm)	pH	T (°C)	Q (l/s)
	Norte	Este				
Laguna de Estancia La Gruta ⁽¹⁾	4590540	2472040	970	9	18	-
	4590556	2472030	2740	9	2	-
	4590006	2472202	2880	9	2	-
Manantial Espejo ⁽²⁾	4585653	2457120	305	8	12	2
	4585653	2457120	469	9	10	2
Laguna ubicada a 30 km al oeste del proyecto	4596741	2425537	1610	10	17	-
Manantial 1 asociado a la laguna anterior	4597395	2425763	300	9	14	10
Manantial 2 asociado a la laguna anterior	4597345	2425411	305	8	13	3
Manantial 3 asociado a la laguna anterior	4597320	2425058	320	8	13	1
Laguna P-1	4596341	2456910	8630	9	7	-
Laguna P-2	4591425	2463177	1080	9	4	-
Calicata junto Laguna P-2	4591425	2463180	37900	9	3	-
Laguna P-3	4591409	2463188	191400	9	6	-
Calicata junto Laguna P-3	4591409	2463188	191400	9	6	-
Filtraciones, cerca de la laguna P-3	4591490	2463295	1031	9	5	-
Calicata TP-1 en Centro Volcánico	4597252	2463849	2970	8	8	-
Calicata TP-2 en Centro Volcánico	4597042	2463601	7130	8	8	-
Descarga de Mina Martha	4606191	2447969	500	8	14	-

(1)La química de la laguna en la Estancia La Gruta cambia substancialmente entre las estaciones. Como se aprecia su conductividad eléctrica en febrero fue de aprox. 1000 $\mu\text{S/cm}$ mientras que en mayo, en dos ubicaciones, la misma laguna presentaba una conductividad de aprox. 3000 $\mu\text{S/cm}$, es decir, la salinidad se incrementó tres veces por evaporación.

(2)Se realizaron dos mediciones de química en Manantial Espejo, la primera en febrero y la otra en mayo. En mayo se incrementó ligeramente la conductividad eléctrica.

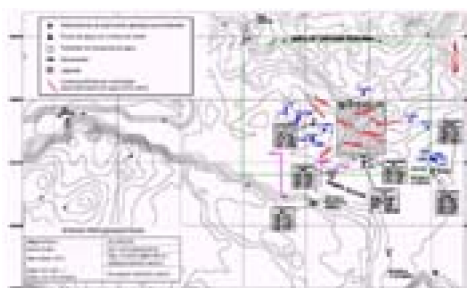


Figura 4.- Inventario de puntos de agua en el área regional



Figura 5.- Inventario de puntos de agua en el área local

4. PERFORACIÓN, INSTALACIÓN Y MONITOREO DE NUEVOS PIEZÓMETROS

4.1 Generalidades

Piezómetro es una palabra que significa literalmente “medidor de presión”, utilizándose para determinar los niveles piezométricos existentes en un punto de una masa de suelo o roca. El tipo más utilizado en hidrogeología es el piezómetro de tubería PVC ranurada, el cuál se utiliza debido a las múltiples ventajas que ofrece, siendo la principal el bajo costo. Debido a la ausencia de adecuada tubería de PVC para la instalación de piezómetros en la región, éstos se instalaron utilizando tubería plástica continua ABS de 2.54 cm. de diámetro. A continuación se describen las características generales de los piezómetros instalados con tubería, ya sea de PVC o ABS.

Uso

Se utiliza para monitorear niveles piezométricos del agua subterránea en suelo y roca, incluyendo: control de construcción y monitoreo de la estabilidad de estructuras (terraplenes, presas y reservorios); investigaciones de estabilidad de taludes naturales y

de corte; control de operaciones de drenaje; investigaciones hidrológicas y de recursos de agua; estudios de contaminación de aguas, control de construcción de obras subterráneas; medidas de permeabilidad.

Descripción

Consiste de un tubo ranurado, instalado en el sondaje a la profundidad donde se medirá el nivel piezométrico. En el caso de tubería PVC, este tubo ranurado se une a una columna de tubos de PVC abierta a la presión atmosférica, la cuál se eleva hasta la superficie. En el caso de tubería ABS, todo es una sola pieza de tubería continua hasta la superficie.

La tubería instalada generalmente tiene un diámetro de 1" y 2", dependiendo de la permeabilidad del suelo o roca. El agua pasa a través del tubo ranurado y se eleva en el tubo hasta que la presión atmosférica iguala la presión de agua de poro en el piezómetro. Los niveles de agua en este piezómetro se miden utilizando una sonda eléctrica. En el caso de que se trate de un pozo artesiano se coloca un manómetro en la parte superior de la tubería para medir la presión estática.

Atributos Típicos

Un sondaje de pequeño diámetro, tubería de revestimiento, un tubo ranurado (para minimizar el impacto de los piezómetros en el flujo del agua subterránea en el acuífero), pequeños intervalos de tubos ranurados (debido a que los piezómetros con un largo intervalo ranurado proveen el nivel piezométrico promedio de la sección larga en vez del nivel piezométrico de una ubicación específica), material de filtro y un sello muy efectivo en la parte alta del intervalo ranurado (para prevenir la intrusión de agua de la parte que se encuentra sobre el punto de medida).

Operación

En este tipo de piezómetro la profundidad del agua en la tubería es medida con una sonda eléctrica. En la Figura 6 se muestra una sonda eléctrica.



Figura 6.- Sonda eléctrica

La sonda eléctrica consiste de un probador de acero inoxidable o de níquel latonado, un cable o cinta con graduación métrica o inglesa y un carrete. El núcleo del carrete contiene una batería, una lámpara, una alarma y un dispositivo de ajuste de sensibilidad. La cinta contiene dos electrodos que cierran un circuito al entrar en contacto con el agua, así como elementos resistentes que permiten que la cinta soporte, en algunos modelos, cargas de hasta 50 kg. La conductividad del agua subterránea puede variar dependiendo de la ubicación, por lo que se utiliza el ajuste de sensibilidad para obtener medidas consistentes en todos los tipos de agua subterránea, así como para diferenciar una señal verdadera de una falsa. Las sondas eléctricas tienen un peso aproximado de 2 a 5 kg (dependiendo de la longitud del cable o cinta graduada). Para realizar la medición, se introduce por la boca del tubo y se desciende la sonda a través de la tubería, la cuál, al hacer contacto con el agua, la lámpara se enciende y suena la alarma. En ese momento se lee la profundidad en el cable graduado.

Ventajas

Es simple, confiable, económico, fácil de realizar lecturas, no es eléctrico, no tiene componentes calibrados y su pequeño diámetro permite instalar varios piezómetros en un mismo sondeaje.

Desventajas

La precisión depende de la habilidad del operador y son vulnerables al vandalismo y a los movimientos del terreno (ocasionados por fenómenos de inestabilidad, construcciones o excavaciones).

4.2 Objetivos

- Evaluar las características de la línea base del flujo y la calidad del agua subterránea en las áreas propuestas para los relaves, la planta y botaderos.
- Monitorear el nivel piezométrico del agua subterránea a diferentes niveles.
- Determinar las gradientes hidráulicas verticales y horizontales.
- Monitorear la variación del nivel del agua subterránea durante pruebas de bombeo.
- Obtener información representativa del agua subterránea.
- Obtener muestras de agua subterránea para determinar su calidad.
- Determinar la migración de contaminantes.
- Proveer información de las propiedades hidráulicas de los acuíferos.

4.3 Perforaciones

Con la finalidad de evaluar las características de la línea base del flujo y la calidad del agua subterránea en las áreas propuestas para los relaves, la planta y botaderos, se realizaron 7 nuevas perforaciones e instalación de piezómetros aguas abajo de las áreas mencionadas. En la Figura 5 se aprecia la potencial ubicación de botaderos, relaves, planta y tajos. La perforación diamantina HQ se llevó a cabo por la Cía. Connors Drilling (Mendoza, Argentina).

Las profundidades de perforación generalmente no excedieron los 50 m, ya que las rutas más probables de flujo se encuentran en las unidades transmisivas superiores de roca superior fracturada/meteorizada. Un resumen de las perforaciones realizadas se presenta en la Tabla 24 y las hojas de registro de los pozos perforados se adjuntan en el Anexo 1.

Pozo	Ubicación y Descripción	Profundidad (m)	Diámetro (mm)	Material de Perforación	Estado del Pozo
11-001	En el sector norte del área de estudio, cerca del botadero de relaves. Se instaló un piezómetro a 10 m de profundidad.	10.0	50.8	Acero	Operativo
11-002	En el sector central del área de estudio, cerca del botadero de relaves. Se instaló un piezómetro a 15 m de profundidad.	15.0	50.8	Acero	Operativo
11-003	En el sector sur del área de estudio, cerca del botadero de relaves. Se instaló un piezómetro a 20 m de profundidad.	20.0	50.8	Acero	Operativo
11-004	En el sector este del área de estudio, cerca del botadero de relaves. Se instaló un piezómetro a 25 m de profundidad.	25.0	50.8	Acero	Operativo
11-005	En el sector oeste del área de estudio, cerca del botadero de relaves. Se instaló un piezómetro a 30 m de profundidad.	30.0	50.8	Acero	Operativo
11-006	En el sector norte del área de estudio, cerca del botadero de relaves. Se instaló un piezómetro a 35 m de profundidad.	35.0	50.8	Acero	Operativo
11-007	En el sector central del área de estudio, cerca del botadero de relaves. Se instaló un piezómetro a 40 m de profundidad.	40.0	50.8	Acero	Operativo

Tabla 24.- Resumen de pozos perforados

Pozo	Ubicación y Descripción	Longitud	Diámetro (cm)	Profundidad (m)	Equipamiento (Instrumentos)	Tipos de Mediciones
T-436	Carbón en el lado sur de la zona de estudio Cercado de la zona de estudio Cercado de la zona de estudio Cercado de la zona de estudio	100 m	100 m	100 m	100 m	100 m
T-437	Carbón en el lado norte de la zona de estudio Cercado de la zona de estudio Cercado de la zona de estudio Cercado de la zona de estudio	100 m	100 m	100 m	100 m	100 m
T-438	Carbón en el lado sur de la zona de estudio Cercado de la zona de estudio Cercado de la zona de estudio Cercado de la zona de estudio	100 m	100 m	100 m	100 m	100 m

4.4 Instalación de Piezómetros

Para determinar la ubicación más apropiada de las rejillas en los piezómetros únicos y múltiples en 7 sondajes, se utilizó la información obtenida de las pruebas de inyección de agua con obturador y del registro de fracturas. El detalle de la instalación de los pozos se muestra en la tabla 25 y en el Anexo 2 se presentan gráficamente los detalles de instalación de cada piezómetro, aunque como ejemplo, en la Figura 7, se presenta los detalles de la instalación de piezómetros en el sondaje T 436.

Debido a la ausencia de adecuada tubería de PVC para la instalación de piezómetros en la región, éstos se instalaron utilizando tubería plástica continua ABS de 2.54 cm de diámetro. No se requirieron prefiltros de arena en las instalaciones debido a que “canastillas de cementación” fueron instaladas sobre las rejillas para sostener los sellos de mezcla de bentonita y cemento. Se instaló un sello de bentonita granular de 3 a 5 m de espesor sobre la “canastillas de cementación” del piezómetro más profundo antes de adicionar el sello de mezcla cemento-bentonita. Bentonita en polvo fue adicionada al cemento en 2% para prevenir el agrietamiento. Un segundo piezómetro, también consistente de tubería plástica continua ABS de 2.54 cm de diámetro fue instalado en la parte superior del sondaje. Un sello de bentonita fue colocado en la parte superior para prevenir el ingreso de agua superficial y para sostener la tubería de protección superficial.

Pozo	Ubicación de la zona de estudio	Longitud (m)	Diámetro (cm)	Profundidad (m)	Equipamiento (Instrumentos)	Tipos de Mediciones
T-436	Carbón en el lado sur de la zona de estudio	100 m	100 m	100 m	100 m	100 m
T-437	Carbón en el lado norte de la zona de estudio	100 m	100 m	100 m	100 m	100 m
T-438	Carbón en el lado sur de la zona de estudio	100 m	100 m	100 m	100 m	100 m

Tabla 25.- Detalles de construcción de piezómetros

Notas: m.s.n.m. = metros sobre el nivel del mar

m.b.n.t. = metros bajo el nivel del terreno

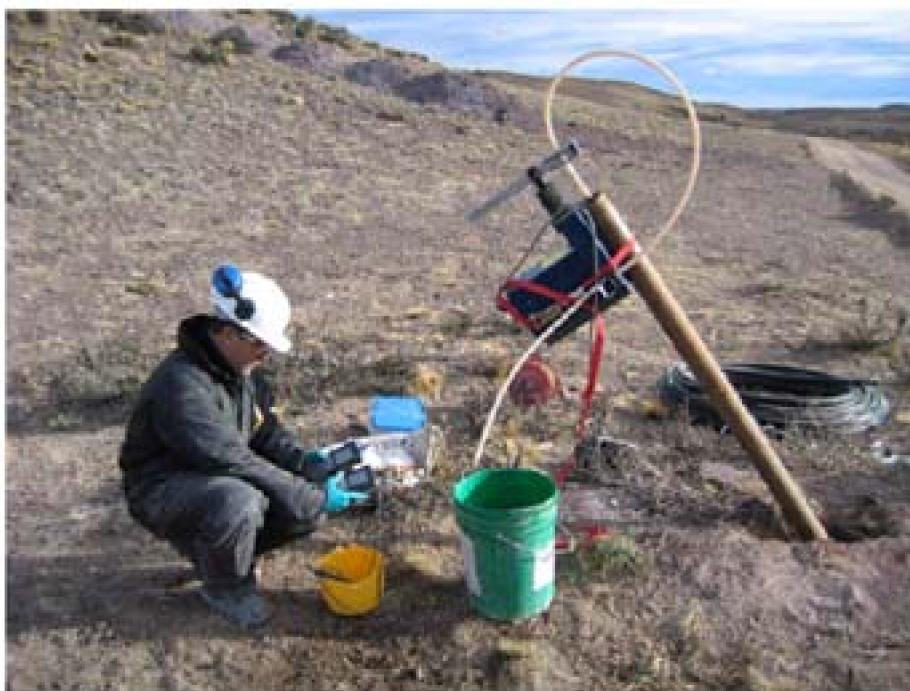


Foto8.- Desarrollo de pozo

GWI		DESARROLLO DE POZO	
Geotecnia y Obras Civiles		PROYECTO: Manantial Espinosa	
		POZO No: T434	
Profundidad de pozo (cm)	1000	Tipo de Tronco	Acero inoxidable
Nivel del agua (cm)	100	Material de revestimiento	Plástico
Material de revestimiento	Plástico	Profundidad de base de revestimiento	100 cm
Material de revestimiento en pozo (cm)	1000	Nivel de agua en revestimiento	100 cm
Material de perforación (cm)	1000	Nivel de agua en revestimiento en pozo	100 cm
Material de perforación	1000	Nivel de agua en perforación	100 cm
Material de perforación en pozo	1000	Material de perforación (cm)	100

Orden	Fecha	Profundidad (cm)	Material (cm)	Material (cm)	Material (cm)	Material (cm)	Material (cm)	Material (cm)	Material (cm)
1	10/05/2004	1000	100	100	100	100	100	100	100
2	11/05/2004	1000	100	100	100	100	100	100	100
3	12/05/2004	1000	100	100	100	100	100	100	100
4	13/05/2004	1000	100	100	100	100	100	100	100
5	14/05/2004	1000	100	100	100	100	100	100	100
6	15/05/2004	1000	100	100	100	100	100	100	100
7	16/05/2004	1000	100	100	100	100	100	100	100
8	17/05/2004	1000	100	100	100	100	100	100	100
9	18/05/2004	1000	100	100	100	100	100	100	100
10	19/05/2004	1000	100	100	100	100	100	100	100
11	20/05/2004	1000	100	100	100	100	100	100	100
12	21/05/2004	1000	100	100	100	100	100	100	100
13	22/05/2004	1000	100	100	100	100	100	100	100
14	23/05/2004	1000	100	100	100	100	100	100	100
15	24/05/2004	1000	100	100	100	100	100	100	100
16	25/05/2004	1000	100	100	100	100	100	100	100
17	26/05/2004	1000	100	100	100	100	100	100	100
18	27/05/2004	1000	100	100	100	100	100	100	100
19	28/05/2004	1000	100	100	100	100	100	100	100
20	29/05/2004	1000	100	100	100	100	100	100	100
21	30/05/2004	1000	100	100	100	100	100	100	100
22	31/05/2004	1000	100	100	100	100	100	100	100
23	01/06/2004	1000	100	100	100	100	100	100	100
24	02/06/2004	1000	100	100	100	100	100	100	100
25	03/06/2004	1000	100	100	100	100	100	100	100
26	04/06/2004	1000	100	100	100	100	100	100	100
27	05/06/2004	1000	100	100	100	100	100	100	100
28	06/06/2004	1000	100	100	100	100	100	100	100
29	07/06/2004	1000	100	100	100	100	100	100	100
30	08/06/2004	1000	100	100	100	100	100	100	100
31	09/06/2004	1000	100	100	100	100	100	100	100
32	10/06/2004	1000	100	100	100	100	100	100	100
33	11/06/2004	1000	100	100	100	100	100	100	100
34	12/06/2004	1000	100	100	100	100	100	100	100
35	13/06/2004	1000	100	100	100	100	100	100	100
36	14/06/2004	1000	100	100	100	100	100	100	100
37	15/06/2004	1000	100	100	100	100	100	100	100
38	16/06/2004	1000	100	100	100	100	100	100	100
39	17/06/2004	1000	100	100	100	100	100	100	100
40	18/06/2004	1000	100	100	100	100	100	100	100
41	19/06/2004	1000	100	100	100	100	100	100	100
42	20/06/2004	1000	100	100	100	100	100	100	100
43	21/06/2004	1000	100	100	100	100	100	100	100
44	22/06/2004	1000	100	100	100	100	100	100	100
45	23/06/2004	1000	100	100	100	100	100	100	100
46	24/06/2004	1000	100	100	100	100	100	100	100
47	25/06/2004	1000	100	100	100	100	100	100	100
48	26/06/2004	1000	100	100	100	100	100	100	100
49	27/06/2004	1000	100	100	100	100	100	100	100
50	28/06/2004	1000	100	100	100	100	100	100	100
51	29/06/2004	1000	100	100	100	100	100	100	100
52	30/06/2004	1000	100	100	100	100	100	100	100
53	01/07/2004	1000	100	100	100	100	100	100	100
54	02/07/2004	1000	100	100	100	100	100	100	100
55	03/07/2004	1000	100	100	100	100	100	100	100
56	04/07/2004	1000	100	100	100	100	100	100	100
57	05/07/2004	1000	100	100	100	100	100	100	100
58	06/07/2004	1000	100	100	100	100	100	100	100
59	07/07/2004	1000	100	100	100	100	100	100	100
60	08/07/2004	1000	100	100	100	100	100	100	100
61	09/07/2004	1000	100	100	100	100	100	100	100
62	10/07/2004	1000	100	100	100	100	100	100	100
63	11/07/2004	1000	100	100	100	100	100	100	100
64	12/07/2004	1000	100	100	100	100	100	100	100
65	13/07/2004	1000	100	100	100	100	100	100	100
66	14/07/2004	1000	100	100	100	100	100	100	100
67	15/07/2004	1000	100	100	100	100	100	100	100
68	16/07/2004	1000	100	100	100	100	100	100	100
69	17/07/2004	1000	100	100	100	100	100	100	100
70	18/07/2004	1000	100	100	100	100	100	100	100
71	19/07/2004	1000	100	100	100	100	100	100	100
72	20/07/2004	1000	100	100	100	100	100	100	100
73	21/07/2004	1000	100	100	100	100	100	100	100
74	22/07/2004	1000	100	100	100	100	100	100	100
75	23/07/2004	1000	100	100	100	100	100	100	100
76	24/07/2004	1000	100	100	100	100	100	100	100
77	25/07/2004	1000	100	100	100	100	100	100	100
78	26/07/2004	1000	100	100	100	100	100	100	100
79	27/07/2004	1000	100	100	100	100	100	100	100
80	28/07/2004	1000	100	100	100	100	100	100	100
81	29/07/2004	1000	100	100	100	100	100	100	100
82	30/07/2004	1000	100	100	100	100	100	100	100
83	31/07/2004	1000	100	100	100	100	100	100	100
84	01/08/2004	1000	100	100	100	100	100	100	100
85	02/08/2004	1000	100	100	100	100	100	100	100
86	03/08/2004	1000	100	100	100	100	100	100	100
87	04/08/2004	1000	100	100	100	100	100	100	100
88	05/08/2004	1000	100	100	100	100	100	100	100
89	06/08/2004	1000	100	100	100	100	100	100	100
90	07/08/2004	1000	100	100	100	100	100	100	100
91	08/08/2004	1000	100	100	100	100	100	100	100
92	09/08/2004	1000	100	100	100	100	100	100	100
93	10/08/2004	1000	100	100	100	100	100	100	100
94	11/08/2004	1000	100	100	100	100	100	100	100
95	12/08/2004	1000	100	100	100	100	100	100	100
96	13/08/2004	1000	100	100	100	100	100	100	100
97	14/08/2004	1000	100	100	100	100	100	100	100
98	15/08/2004	1000	100	100	100	100	100	100	100
99	16/08/2004	1000	100	100	100	100	100	100	100
100	17/08/2004	1000	100	100	100	100	100	100	100

Figura 8.- Ejemplo de hoja de registro de desarrollo del pozo T434.

4.5. Monitoreo de Niveles de Agua en Pozos Recientes

Con la finalidad de determinar los niveles estáticos en los pozos instalados durante mayo del 2004, luego del desarrollo de los pozos, se realizaron mediciones semanales por casi

En la tabla 26, se presentan los resultados obtenidos del monitoreo de niveles de agua. Desde la Figura 9 hasta la Figura 15 se presenta la vagriación temporal de estos niveles hasta obtener el nivel estático, siendo estas variaciones debidas en muchos casos al desarrollo de los pozos realizados para tomar muestras de agua, al descenso del nivel de agua luego de terminar la perforación y pruebas hidráulicas de inyección/extracción instantánea realizadas durante el programa de monitoreo de niveles de agua.

Date	Temp			Wind			Pressure			Humidity			Clouds			Rain		
	Max	Min	Avg	Dir	Spd	Gust	Bar	Sea	Land	Rel	Wet	Wet	Wet	Wet	Wet	Wet	Wet	
1/1/2018	15	5	10	10	10	10	1010	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	
2/1/2018	18	8	13	10	10	10	1010	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	
3/1/2018	20	10	15	10	10	10	1010	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	
4/1/2018	22	12	17	10	10	10	1010	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	
5/1/2018	25	15	20	10	10	10	1010	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	
6/1/2018	28	18	23	10	10	10	1010	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	
7/1/2018	30	20	25	10	10	10	1010	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	
8/1/2018	32	22	27	10	10	10	1010	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	
9/1/2018	35	25	30	10	10	10	1010	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	
10/1/2018	38	28	33	10	10	10	1010	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	
11/1/2018	40	30	35	10	10	10	1010	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	
12/1/2018	42	32	37	10	10	10	1010	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	
13/1/2018	45	35	40	10	10	10	1010	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	
14/1/2018	48	38	43	10	10	10	1010	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	
15/1/2018	50	40	45	10	10	10	1010	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	
16/1/2018	52	42	47	10	10	10	1010	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	
17/1/2018	55	45	50	10	10	10	1010	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	
18/1/2018	58	48	53	10	10	10	1010	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	
19/1/2018	60	50	55	10	10	10	1010	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	
20/1/2018	62	52	57	10	10	10	1010	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	
21/1/2018	65	55	60	10	10	10	1010	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	
22/1/2018	68	58	63	10	10	10	1010	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	
23/1/2018	70	60	65	10	10	10	1010	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	
24/1/2018	72	62	67	10	10	10	1010	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	
25/1/2018	75	65	70	10	10	10	1010	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	

Tabla 26.- Resultados del monitoreo de niveles piezométricos en piezómetros recientes

[illegible][illegible]

Figura 9.- Monitoreo de niveles de agua en piezómetros T432 y T385

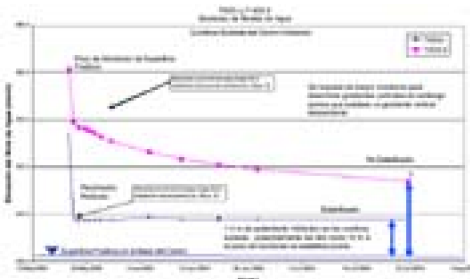


Figura 10.- Monitoreo de niveles de agua en piezómetros T433-I y T433-II

4. PERFORACIÓN, INSTALACIÓN Y MONITOREO DE NUEVOS PIEZÓMETROS

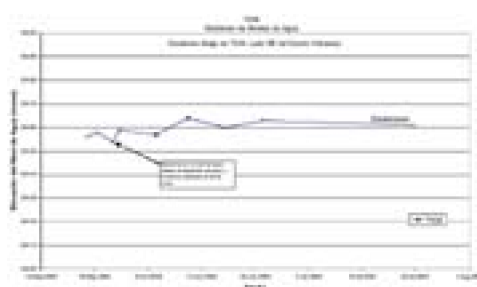


Figura 11.- Monitoreo de niveles de agua en piezómetro T-434



Figura 12.- Monitoreo de niveles de agua en piezómetros T435-I y T435-II

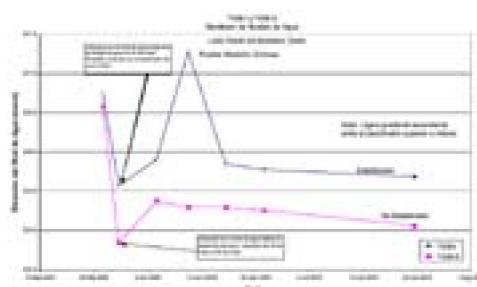


Figura 13.- Monitoreo de niveles de agua en piezómetros T436-I y T436-II

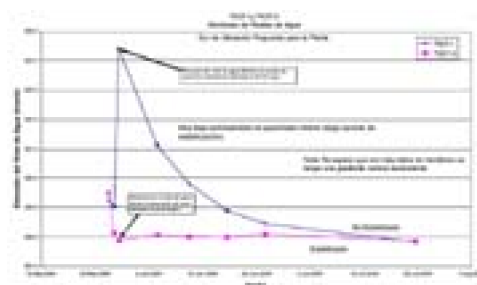


Figura 14.- Monitoreo de niveles de agua en piezómetros T437-I y T437-II



Figura 15.- Monitoreo de niveles de agua en piezómetros T438-I y T438-II

5 PIEZOMETRÍA

5.1 Generalidades

Una superficie piezométrica es el lugar geométrico de los puntos que indican la altura piezométrica de cada una de las porciones de un acuífero, referidas a una determinada profundidad. Las superficies piezométricas se representan mediante curvas llamadas isopiezas o hidroisohipsas, que son líneas de igual altura piezométrica; y que se asocian también a líneas equipotenciales. A partir de las líneas equipotenciales, se trazan las líneas de flujo o líneas de corriente que deben ser normales a las isopiezas. En esta sección se presentan las superficies piezométricas regional y local del área de estudio.

5.2 Objetivos

- Realizar las superficies piezométricas regional y local.
- Determinar la dirección del flujo del agua subterránea en la zona.
- Determinar gradientes horizontales.

5.3 Metodología

Debido a que los niveles piezométricos medidos en el área del proyecto se concentran alrededor de las vetas o sitios propuestos para botaderos o depósitos de relaves, fue necesario obtener más puntos para poder determinar la superficie piezométrica regional (ver Figura 16). Dos consideraciones que sirvieron de base para tomar puntos adicionales fueron:

- Los niveles piezométricos medidos en la zona indican una superficie piezométrica relacionada con la topografía, es decir, que el agua subterránea fluye desde zonas de recarga de mayor elevación hacia áreas de descarga de baja elevación (cuencas), esto se nota claramente en los niveles piezométricos medidos en la zona del centro volcánico.
- La litología de la zona es similar en todo el macizo volcánico: consiste de tobas y brechas volcánicas.

Con estos datos reales y puntos adicionales se obtuvo una primera superficie freática utilizando el programa de cómputo SURFER versión 8, donde se generó una superficie piezométrica regional con curvas de nivel a intervalos de 5 m y una superficie piezométrica local con curvas de nivel a intervalos de 2 m. Es importante destacar que luego de obtener las primeras superficies freáticas, éstas fueron revisadas con la finalidad de asegurar que las isopiezas tengan sentido de acuerdo a las condiciones hidrogeológicas observadas en el campo, así como con la geología existente en el área. Esto último significa que se cambiaron algunas isopiezas manualmente, así como que se adicionaron o quitaron puntos adicionales, obteniendo como resultados finales la Figura 16 y la Figura 17 que se presentan en este trabajo. Los datos que se utilizaron para obtener las figuras finales mencionadas hacen un total de 257 puntos de niveles de agua, los cuales constituyen cuatro grupos de datos que se describen a continuación:

- Mediciones reales de niveles piezométricos en perforaciones de exploración geológica y piezómetros pre-existentes. Estas mediciones se realizaron en mayo del 2004. Este grupo está conformado por 107 mediciones (87 pozos de exploración geológica, 10 piezómetros pre-existentes, 3 pozos con molinos de viento y 7 piezómetros instalados por GWI). Como se observa en la Figura 16 y en la Figura 17, la mayor parte de estas mediciones se concentran en la zona de las vetas. Estos datos se encuentran en la Tabla 27, los cuáles se utilizaron para determinar la piezometría local.
- Niveles piezométricos estimados en 94 bases de cuencas en la zona, asumiendo que estos niveles se encontraban en o cercanos a la superficie, tal como sucede en la cuenca en que se ubica el centro volcánico. Estos datos se encuentran en la Tabla 28 y fueron utilizados en su mayoría para generar la piezometría regional.
- Niveles piezométricos estimados en 23 cumbres del terreno. Aquí se consideró que el nivel piezométrico en las cumbres debe ser siempre mayor a la laguna o fondo de valle

más cercano, tal como sucede en los datos piezométricos medidos en la zona del centro volcánico y alrededores. Estos datos se encuentran en la Tabla 29 y en su mayoría fueron utilizados para generar la piezometría regional.

Niveles piezométricos estimados en la zona de contacto macizo volcánico / pampa aluvial. Son 31 puntos auxiliares para definir mejor las condiciones de la superficie piezométrica. Estos datos se presentan en la Tabla 30 y fueron utilizados en su mayoría para generar la piezometría regional.

Código	Participante	Coordenadas		Alt. Pto. (m)	Código	Participante	Coordenadas		Alt. Pto. (m)
		Norte (m)	Este (m)				Norte (m)	Este (m)	
1	1	1000000	1000000	1000	1	1	1000000	1000000	1000
2	2	1000000	1000000	1000	2	2	1000000	1000000	1000
3	3	1000000	1000000	1000	3	3	1000000	1000000	1000
4	4	1000000	1000000	1000	4	4	1000000	1000000	1000
5	5	1000000	1000000	1000	5	5	1000000	1000000	1000
6	6	1000000	1000000	1000	6	6	1000000	1000000	1000
7	7	1000000	1000000	1000	7	7	1000000	1000000	1000
8	8	1000000	1000000	1000	8	8	1000000	1000000	1000
9	9	1000000	1000000	1000	9	9	1000000	1000000	1000
10	10	1000000	1000000	1000	10	10	1000000	1000000	1000
11	11	1000000	1000000	1000	11	11	1000000	1000000	1000
12	12	1000000	1000000	1000	12	12	1000000	1000000	1000
13	13	1000000	1000000	1000	13	13	1000000	1000000	1000
14	14	1000000	1000000	1000	14	14	1000000	1000000	1000
15	15	1000000	1000000	1000	15	15	1000000	1000000	1000
16	16	1000000	1000000	1000	16	16	1000000	1000000	1000
17	17	1000000	1000000	1000	17	17	1000000	1000000	1000
18	18	1000000	1000000	1000	18	18	1000000	1000000	1000
19	19	1000000	1000000	1000	19	19	1000000	1000000	1000
20	20	1000000	1000000	1000	20	20	1000000	1000000	1000
21	21	1000000	1000000	1000	21	21	1000000	1000000	1000
22	22	1000000	1000000	1000	22	22	1000000	1000000	1000
23	23	1000000	1000000	1000	23	23	1000000	1000000	1000
24	24	1000000	1000000	1000	24	24	1000000	1000000	1000
25	25	1000000	1000000	1000	25	25	1000000	1000000	1000
26	26	1000000	1000000	1000	26	26	1000000	1000000	1000
27	27	1000000	1000000	1000	27	27	1000000	1000000	1000
28	28	1000000	1000000	1000	28	28	1000000	1000000	1000
29	29	1000000	1000000	1000	29	29	1000000	1000000	1000
30	30	1000000	1000000	1000	30	30	1000000	1000000	1000
31	31	1000000	1000000	1000	31	31	1000000	1000000	1000

Tabla 27.- Niveles piezométricos medidos en Mayo 2004

Código	Participante	Coordenadas		Alt. Pto. (m)	Código	Participante	Coordenadas		Alt. Pto. (m)
		Norte (m)	Este (m)				Norte (m)	Este (m)	
1	1	1000000	1000000	1000	1	1	1000000	1000000	1000
2	2	1000000	1000000	1000	2	2	1000000	1000000	1000
3	3	1000000	1000000	1000	3	3	1000000	1000000	1000
4	4	1000000	1000000	1000	4	4	1000000	1000000	1000
5	5	1000000	1000000	1000	5	5	1000000	1000000	1000
6	6	1000000	1000000	1000	6	6	1000000	1000000	1000
7	7	1000000	1000000	1000	7	7	1000000	1000000	1000
8	8	1000000	1000000	1000	8	8	1000000	1000000	1000
9	9	1000000	1000000	1000	9	9	1000000	1000000	1000
10	10	1000000	1000000	1000	10	10	1000000	1000000	1000
11	11	1000000	1000000	1000	11	11	1000000	1000000	1000
12	12	1000000	1000000	1000	12	12	1000000	1000000	1000
13	13	1000000	1000000	1000	13	13	1000000	1000000	1000
14	14	1000000	1000000	1000	14	14	1000000	1000000	1000
15	15	1000000	1000000	1000	15	15	1000000	1000000	1000
16	16	1000000	1000000	1000	16	16	1000000	1000000	1000
17	17	1000000	1000000	1000	17	17	1000000	1000000	1000
18	18	1000000	1000000	1000	18	18	1000000	1000000	1000
19	19	1000000	1000000	1000	19	19	1000000	1000000	1000
20	20	1000000	1000000	1000	20	20	1000000	1000000	1000
21	21	1000000	1000000	1000	21	21	1000000	1000000	1000
22	22	1000000	1000000	1000	22	22	1000000	1000000	1000
23	23	1000000	1000000	1000	23	23	1000000	1000000	1000
24	24	1000000	1000000	1000	24	24	1000000	1000000	1000
25	25	1000000	1000000	1000	25	25	1000000	1000000	1000
26	26	1000000	1000000	1000	26	26	1000000	1000000	1000
27	27	1000000	1000000	1000	27	27	1000000	1000000	1000
28	28	1000000	1000000	1000	28	28	1000000	1000000	1000
29	29	1000000	1000000	1000	29	29	1000000	1000000	1000
30	30	1000000	1000000	1000	30	30	1000000	1000000	1000
31	31	1000000	1000000	1000	31	31	1000000	1000000	1000

Código	Participante	Coordenadas		Alt. Pto. (m)	Código	Participante	Coordenadas		Alt. Pto. (m)
		Norte (m)	Este (m)				Norte (m)	Este (m)	
1	1	1000000	1000000	1000	1	1	1000000	1000000	1000
2	2	1000000	1000000	1000	2	2	1000000	1000000	1000
3	3	1000000	1000000	1000	3	3	1000000	1000000	1000
4	4	1000000	1000000	1000	4	4	1000000	1000000	1000
5	5	1000000	1000000	1000	5	5	1000000	1000000	1000
6	6	1000000	1000000	1000	6	6	1000000	1000000	1000
7	7	1000000	1000000	1000	7	7	1000000	1000000	1000
8	8	1000000	1000000	1000	8	8	1000000	1000000	1000
9	9	1000000	1000000	1000	9	9	1000000	1000000	1000
10	10	1000000	1000000	1000	10	10	1000000	1000000	1000
11	11	1000000	1000000	1000	11	11	1000000	1000000	1000
12	12	1000000	1000000	1000	12	12	1000000	1000000	1000
13	13	1000000	1000000	1000	13	13	1000000	1000000	1000
14	14	1000000	1000000	1000	14	14	1000000	1000000	1000
15	15	1000000	1000000	1000	15	15	1000000	1000000	1000
16	16	1000000	1000000	1000	16	16	1000000	1000000	1000
17	17	1000000	1000000	1000	17	17	1000000	1000000	1000
18	18	1000000	1000000	1000	18	18	1000000	1000000	1000
19	19	1000000	1000000	1000	19	19	1000000	1000000	1000
20	20	1000000	1000000	1000	20	20	1000000	1000000	1000
21	21	1000000	1000000	1000	21	21	1000000	1000000	1000
22	22	1000000	1000000	1000	22	22	1000000	1000000	1000
23	23	1000000	1000000	1000	23	23	1000000	1000000	1000
24	24	1000000	1000000	1000	24	24	1000000	1000000	1000
25	25	1000000	1000000	1000	25	25	1000000	1000000	1000
26	26	1000000	1000000	1000	26	26	1000000	1000000	1000
27	27	1000000	1000000	1000	27	27	1000000	1000000	1000
28	28	1000000	1000000	1000	28	28	1000000	1000000	1000
29	29	1000000	1000000	1000	29	29	1000000	1000000	1000
30	30	1000000	1000000	1000	30	30	1000000	1000000	1000
31	31	1000000	1000000	1000	31	31	1000000	1000000	1000

Tabla 28.- Niveles piezométricos estimados en la base de las cuencas

Código	Coordenada Gauss-Kruger Norte (m)	Este (m)	Nivel Piezo-métrico (msnm)	Código	Coordenada Gauss-Kruger Norte (m)	Este (m)	Nivel Piezo-métrico (msnm)
C1	4605893.4	2453892.12	480	C48	4596393.11	2454464.4	295
C2	4605091.41	2453726.56	460	C49	4596354.92	2457431.64	290
C3	4604391.26	2454388.78	430	C50	4597296.05	2458897.7	307.3
C4	4605626.07	2455738.68	475	C51	4597827.18	2459069.89	329.6
C5	4605536.96	2457789	460	C52	4597324.71	2459265	310
C6	4605256.9	2460425.13	430	C53	4597835.74	2461424.23	377.3
C7	4604289.42	2460476.07	410	C54	4596534.17	2461634.88	356.4
C8	4604696.78	2466550.62	430	C55	4597066.69	2463795.11	341.9
C9	4605116.9	2472731.14	365	C56	4597295.18	2465263.87	377.2
C10	4603500.79	2451254.77	400	C57	4597930.47	2465861.15	374
C11	4602011.38	2451089.21	375	C58	4596968.72	2465243.28	374.6
C12	4602036.84	2460551.25	410	C59	4597090.88	2471521.3	315
C13	4602125.95	2461519.1	420	C60	4597969.26	2472374.54	325
C14	4602100.49	2461862.94	420	C61	4596823.55	2473648.03	305
C15	4602011.38	2462270.46	420	C62	4596747.17	2474424.86	300
C16	4603067.97	2464932.06	400	C63	4596314.35	2472934.88	305
C17	4603449.67	2467203.22	420	C64	4594786.52	2453586.48	300
C18	4603538.78	2468107.4	420	C65	4595601.25	2454783.56	270
C19	4603767.93	2468387.56	420	C66	4595677.63	2455675.01	280
C20	4603335.1	2469037.04	420	C67	4594137.29	2455420.31	295
C21	4601017.27	2452324.14	345	C68	4593933.61	2455866.03	295
C22	4601297.33	2455138.55	345	C69	4595270.26	2457050.38	280
C23	4601080.92	2461162.16	425	C70	4595818.2	2459837.38	306.9
C24	4601208.22	2462843.17	395	C71	4595045.57	2459738.65	320
C25	4600584.45	2463479.92	395	C72	4595888.73	2463391.11	360.7
C26	4601450.09	2464333.16	415	C73	4595169.99	2464102.16	368.8
C27	4600928.16	2463951.11	400	C74	4595638.83	2469752.14	325
C28	4599247.8	2451649.19	310	C75	4595333.31	2469854.02	325
C29	4598293.05	2451025.18	320	C76	4594518.58	2471293.07	300
C30	4598471.27	2451598.25	320	C77	4594760.46	2472401	300
C31	4598140.29	2451840.21	320	C78	4592430.61	2455052.37	330
C32	4598814.98	2453432.08	320	C79	4593308.99	2462278.58	364
C33	4599833.38	2454107.03	320	C80	4593487.2	2468857.01	305
C34	4599616.97	2455240.43	315	C81	4591780.54	2470692.13	280
C35	4599642.43	2456170.08	320	C82	4592378.74	2473049.79	270
C36	4598101.07	2461935.06	370.4	C83	4591869.98	2456771.89	335
C37	4599682.53	2464418.23	380	C84	4591182.56	2460923.47	325
C38	4599100.13	2463367.64	400	C85	4591246.21	2463292.16	320
C39	4598739.7	2463397.17	380	C86	4591737.52	2465326.32	297.7
C40	4598356.07	2463228.77	400	C87	4591956.73	2466717.35	291.5

Código	Coordenada Gauss-Kruger Norte (m)	Este (m)	Nivel Piezo-métrico (msnm)	Código	Coordenada Gauss-Kruger Norte (m)	Este (m)	Nivel Piezo-métrico (msnm)
C41	4598703.76	2464771.12	380	C88	4591080.72	2466807	295
C42	4598828.39	2465267.28	375.1	C89	4590966.15	2467278.19	295

Código	Coordenadas Gauss-Kruger Norte (m)	Este (m)	Nivel Piezo-métrico (msnm)	Código	Coordenadas Gauss-Kruger Norte (m)	Este (m)	Nivel Piezo-métrico (msnm)
					Norte (m)		
C43	4598574.04	2465631.14	375	C90	4591929.86	2467223.12	291
C44	4598647.07	2466127.81	375	C91	4591411.7	2468908.26	300
C45	4598617.27	2466363.84	374	C92	4590609.71	2469010.14	300
C46	4599844.91	2469329.6	370	C93	4590100.51	2469965.26	300
C47	4596074.86	2450643.93	300	C94	4590405.87	2472259.61	280

Tabla 29.- Niveles piezométricos estimados en cumbres

Código	Coordenadas Gauss-Kruger Norte (m)	Este (m)	Nivel Piezo-métrico (msnm)	Código	Coordenadas Gauss-Kruger Norte (m)	Este (m)	Nivel Piezo-métrico (msnm)
	Norte (m)	Este (m)	métrico (msnm)		Norte (m)	Este (m)	métrico (msnm)
P1	4604774.85	2453108.53	465	P13	4599304.37	2472522.62	360
P2	4604591.67	2455813.24	500	P14	4599304.37	2468929.47	385
P3	4605097.24	2456626.84	485	P15	4590048.28	2470916.44	315
P4	4602928.43	2455798.58	500	P16	4600152.38	2451249.92	350
P5	4604276.61	2458613.22	460	P17	4599071.56	2450813.07	335
P6	4605419.58	2461738.5	470	P18	4600130.54	2456776.16	340
P7	4604401.12	2463851.71	455	P19	4597510.39	2452920.9	340
P8	4604291.21	2465259.04	440	P20	4595850.96	2452189.17	325
P9	4602452.01	2471464.77	395	P21	4592748.44	2455946.82	345
P10	4602847.67	2472652.2	385	P22	4592759.35	2457759.77	340
P11	4604005.34	2473077.33	405	P23	4600293.67	2468032.85	405
P12	4600494.36	2471124.68	390				

Tabla 30.- Niveles piezométricos estimados en puntos auxiliares

Código	Coordenadas Gauss-Kruger Norte (m)	Este (m)	Nivel Piezo-métrico (msnm)	Código	Coordenadas Gauss-Kruger Norte (m)	Este (m)	Nivel Piezo-métrico (msnm)
	Norte (m)	Este (m)			Norte (m)	Este (m)	métrico

Código	Coordenadas Gauss-Kruege		Nivel Piezo-métrico (msnm)	Código	Coordenadas Gauss-Kruege		Nivel Piezo-
							(msnm)
A1	4594006.84	2451270.07	298	A17	4589248.8	2469999.83	274
A2	4590022.46	2451250.72	300	A18	4590138.51	2472360.4	272
A3	4589229.46	2453533.89	297	A19	4589210.12	2473927.66	271
A4	4593445.94	2454153.06	296	A20	4592053.34	2472515.19	270
A5	4590989.55	2455526.83	294	A21	4592768.98	2473250.45	270
A6	4589229.46	2455081.81	294	A22	4592246.75	2473850.26	270
A7	4591008.89	2457829.35	291	A23	4591782.55	2473347.19	270
A8	4589248.8	2458022.84	290	A24	4591171.06	2452868.81	297
A9	4590506.01	2459319.22	287	A25	4590787.82	2456501.89	292.5
A10	4590834.81	2462589.19	284.5	A26	4590465.45	2460362.32	285.75
A11	4589268.14	2462550.49	283	A27	4590582.29	2461369.33	285.75
A12	4591182.96	2464872.36	282	A28	4590923.83	2463284.44	283.25
A13	4589248.8	2464717.57	280	A29	4591058.64	2464273.47	283.25
A14	4590544.69	2467387.72	278	A30	4590069.99	2468505.23	276
A15	4589210.12	2467368.37	277	A31	4589313.81	2461440.81	283
A16	4589771.02	2469999.83	274.5				

5.4 Piezometría Regional

La superficie piezométrica regional se presenta en la Figura 16, donde debido a la densidad de puntos utilizados para determinar esta superficie piezométrica, se colocan sólo los códigos de los puntos considerados, códigos que permiten determinar el nivel piezométrico en las Tablas 27, 28, 29 y 30. En este caso se observa que:

- El flujo regional de agua subterránea se mueve desde las zonas altas del norte hacia el suroeste y sureste. En general, el movimiento de agua subterránea es controlado topográficamente con un movimiento radial de agua subterránea hacia las cuencas desde las cumbres que las rodean. En base a los patrones de flujo observados, es probable que el flujo de agua superficial y agua subterránea que se originen de las operaciones de minado impacten las cuencas indicadas con las letras A hasta las F. La cuenca C es una de las cuencas más grandes y profundas en el área del proyecto y probablemente interceptará agua superficial y agua subterránea del botadero oeste. No es evidente que la cuenca G (laguna La Gruta) sea un receptor de contaminantes desde el botadero este.
- El flujo en el acuífero Pampa Aluvial se dirige de oeste hacia el este, mostrando aportes de flujo hacia el macizo volcánico en los extremos suroeste y sureste del área

de estudio. La zona sureste corresponde al área de la Laguna La Gruta.

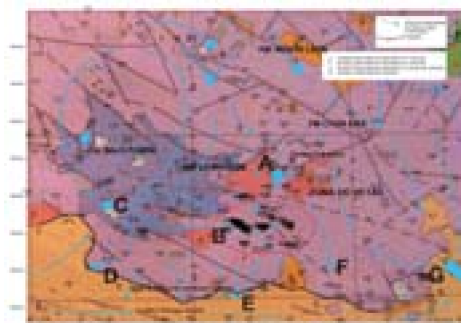


Figura 16.- Piezometría regional

5.5 Piezometría Local

La superficie piezométrica local se presenta en la Figura 17, debido a la densidad de puntos utilizados para determinar esta superficie piezométrica, se colocan sólo los códigos de los puntos considerados, códigos que permiten determinar el nivel piezométrico en las Tablas 27, 28, 29 y 30. En este caso se tiene que:

- El flujo se dirige hacia las vetas, para luego drenar principalmente por la zona de la veta María hacia el sureste, por lo que parece ser que la veta María es un conducto lineal con dirección sureste para el movimiento de agua subterránea.
- Es probable que las otras vetas principales en el área del proyecto también sean conductos, pero puede ser que no se aprecia debido a la ausencia de datos en esas áreas. Sin embargo, las vetas tienden a descender la superficie piezométrica indicando que las porciones superiores de las vetas son bien drenadas hasta un nivel similar a los valles adyacentes.
- El flujo en el centro volcánico es radial.

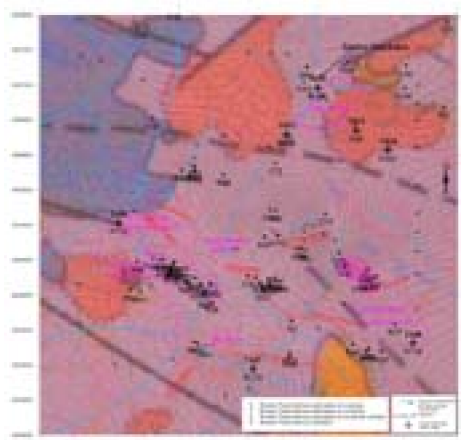


Figura 17.- Piezometría local

6. PARÁMETROS HIDRÁULICOS

6.1 Generalidades

Con la finalidad de determinar la conductividad hidráulica (permeabilidad respecto al agua) de los materiales geológicos en la zona del proyecto se efectuaron pruebas de inyección de agua con obturador (mientras se perforaba) y pruebas de extracción/inyección instantánea (en los piezómetros ya instalados). En la Figura 18 se presenta la distribución espacial de las pruebas hidráulicas realizadas en la zona de estudio.

Es mejor que la conductividad hidráulica sea medida in-situ, pues los datos obtenidos en campo son más confiables y más representativos que aquellos determinados en el laboratorio. Esto debido a las siguientes razones: a) la permeabilidad de los materiales depende de la macroestructura (estratificación) y microestructura (disposición de las partículas) del suelo; b) el gran volumen de material probado in-situ y c) se evita la perturbación asociada con el muestreo.

Como en esta sección de la presente Tesis, determinaremos la conductividad hidráulica, definiremos brevemente este parámetro hidráulico. La permeabilidad es el caudal que pasa o atraviesa una sección vertical unitaria del acuífero, bajo un gradiente unidad y a una temperatura dada. Esta permeabilidad se calcula utilizando la ley de

Darcy, la cuál se expresa de la siguiente manera:

$$Q = -KAi$$

donde:

Q = caudal (m^3/s). El signo negativo no se utiliza en cálculos, pues sólo indica que la velocidad tiene signo contrario a la pendiente.

i = gradiente hidráulico = pendiente del nivel freático.

A = área de la sección perpendicular a la dirección del flujo (m^2).

K = coeficiente de permeabilidad de Darcy (m/s).

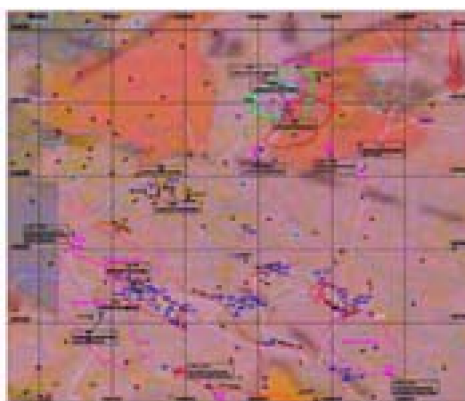


Figura 18.- Distribución espacial de pruebas hidráulicas realizadas

En los sondeos pre-existentes se tenían algunos pozos abiertos, por lo que se ensayó en el caso del macizo volcánico toda la columna de roca desde el nivel estático hasta el fondo de los sondeos y en el caso de la pampa aluvial, toda la columna de suelo desde el nivel estático hasta el fondo de los pozos. En los pozos nuevos, instalados en el macizo volcánico se ensayó la parte de roca meteorizada/fracturada y la parte de roca sana más profunda, esto se logró ensayando los piezómetros instalados a diferentes niveles en los pozos nuevos. En los pozos instalados en la base de las cuencas se ensayó toda la columna de limoarcillitas, desde el nivel estático hasta el fondo de los pozos.

El ensayo de inyección instantánea en el sondeo T-316, único sondeo ensayado que intercepta la veta María, indica que la veta María tiene una permeabilidad de 10^{-4} m/s. En la pampa aluvial se realizaron dos ensayos de inyección/extracción obteniendo una permeabilidad de 9×10^{-7} m/s (variando de 10^{-6} a 10^{-7} m/s). En las limolitas que rellenan las cuencas se realizaron cuatro ensayos de inyección/extracción obteniendo una media geométrica de permeabilidad 5.6×10^{-9} m/s (variando de 10^{-8} a 10^{-10} m/s). En las rocas del macizo volcánico se realizaron 17 ensayos de inyección/extracción instantánea y 4 ensayos con obturador, obteniendo en la zona meteorizada/fracturada una media geométrica de permeabilidad 4×10^{-8} m/s (variando de 10^{-6} a 10^{-11} m/s) y en la zona de roca sana una media geométrica de permeabilidad de 5×10^{-10} m/s (variando de 10^{-8} a 10^{-11} m/s).

6.2 Objetivos

- Determinar la conductividad hidráulica de los materiales geológicos en la zona del proyecto

6.3 Pruebas de Inyección de Agua con Obturador

- Estas pruebas permiten evaluar la permeabilidad de un tramo de roca seleccionado. Es particularmente útil en roca, indicando sólo conductividad

hidráulica secundaria, ya que el flujo se da por las discontinuidades. Los datos y cálculos de estas pruebas se encuentran en el Anexo 4, aunque en la Figura 19 se presenta un ejemplo de los cálculos realizados con la prueba de obturador.

En esta prueba, el obturador se inserta en el sondaje hasta cierto intervalo, se expanden las glándulas de caucho del obturador usando nitrógeno y se inyecta agua a 5 presiones diferentes en el sondaje. Se registran los caudales obtenidos en cada presión hasta obtener caudales constantes. Finalmente, con estos datos de presión y caudal se determina la permeabilidad del intervalo de roca ensayado. Debido a la naturaleza impermeable de la roca en el área (permeabilidad $<10^{-8}$ m/s) sólo se realizaron 4 pruebas de obturador en dos de los sondajes, ya que el rango de permeabilidades recomendable para ejecutar esta prueba es de 10^{-4} a 10^{-7} m/s, siendo las pruebas de inyección / extracción instantáneas las que producen resultados más confiables fuera del rango mencionado.

Los resultados de estas pruebas se presentan en la Tabla 31. En general, las permeabilidades de roca son bajas debido a la baja frecuencia de fracturas, encontrando las permeabilidades más altas en los primeros 20 m (zona meteorizada/fracturada – presentando en promedio 3 fracturas por metro), mientras que debajo de esta profundidad se encontraron permeabilidades 10 a 100 veces menores, presentando en promedio 1 fractura por metro. El criterio para desarrollar estas pruebas fue el comparar la permeabilidad de la zona meteorizada y fracturada con las zonas más profundas de roca no meteorizada y menos fracturada.

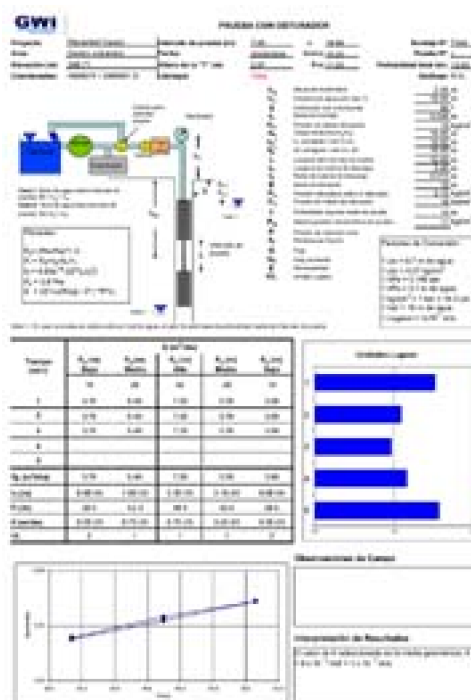


Figura 19.- Hoja de cálculo para la prueba hidráulica con obturador

Tabla 31.- Resultados de pruebas con obturador en rocas del macizo volcánico

Pozo	Prueba Número	Intervalo de Prueba (m)		K (m/s) (2)	K (m/d) (2)	T (m ² /d) (2)	Litología
		Desde	Hasta				
T-434	1	7.45	19.94	1.00E-07	8.64E-03	0.11	Toba meteorizada y fracturada
	2	19.24	45.38	9.30E-08	8.04E-03	0.21	Toba no meteorizada
T-433	(1)	8	27	3.05E-08	2.63E-03	0.05	Intercalaciones de brecha volcánica y toba, meteorizada y fracturada
	1	27	55	1.20E-10	1.04E-05	0	Intercalaciones de brecha volcánica y toba, no meteorizada
	2	8	55	1.30E-08	1.12E-03	0.05	Intercalaciones de brecha volcánica y toba

Nota: ⁽¹⁾ Intervalo calculado usando la resta de transmisividades obtenidas en las dos pruebas con obturador realizadas en el pozo T-433. ⁽²⁾ K = permeabilidad, T = transmisividad.

6.4 Pruebas de Inyección / Extracción Instantánea y

Pruebas de Carga Constante

La prueba de inyección consiste en introducir un volumen de agua conocido en el pozo, mientras que en la prueba de extracción, se extrae un volumen de agua conocido del pozo. Los datos y cálculos de estas pruebas se presentan en el Anexo 4 y en la Figura 20 se muestra un ejemplo de los cálculos realizados con la prueba de inyección/extracción instantánea. En ambos casos, inmediatamente luego de perturbar el nivel estático, se miden los niveles de agua hasta que se recupere por lo menos un 70%. Luego, se utilizan estos datos de recuperación y los parámetros de diseño de pozo para calcular la conductividad hidráulica usando el Método Bower-Rice, el cual es aplicable a acuíferos libres. En nuestro caso es conveniente pues el acuífero pampa aluvial y la parte superior del macizo volcánico pueden considerarse como acuíferos libres. Los niveles de agua fueron registrados usando un cable eléctrico coaxial.

Pruebas de carga constante fueron realizadas en los pozos WW-1 y T-436-II, pues eran los pozos con las permeabilidades más altas. El bombeo para esta prueba fue desarrollado usando una bomba inercial Waterra Hydrolift II de 220 voltios y una bomba inercial sumergible (la cual consistió en tubería de polietileno de alta densidad y una "Checkvalve" Delron Plastic). A partir de las mediciones del descenso del nivel de agua, el caudal y los parámetros de pozo, se calculó la conductividad hidráulica de la zona ensayada. Los resultados de estas pruebas se presentan en la Tabla 32.

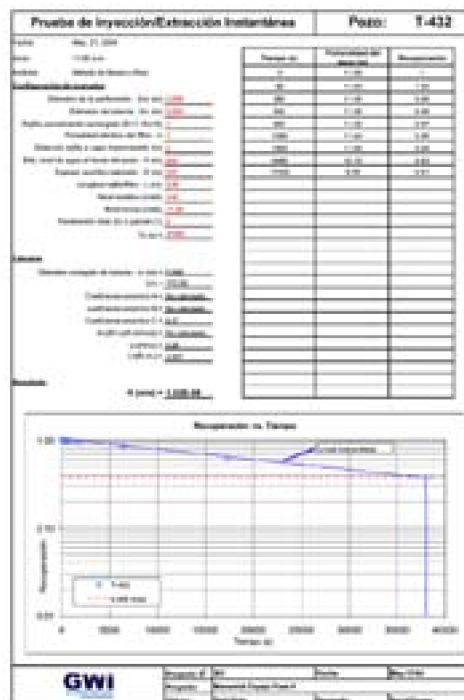


Figura 20.- Hoja de cálculo para la prueba de inyección/extracción instantánea

7. HIDROGEOQUÍMICA

7.1 Generalidades

En este capítulo se describen las características químicas del agua subterránea y los métodos de campo y analíticos usados para el estudio de su composición.

7.2 Objetivos

- Caracterizar la geoquímica de las aguas subterráneas.
- Evaluar la calidad del agua subterránea.
- Determinar los principales fenómenos modificadores y su influencia en la composición química del agua subterránea.

7.3 Toma de Muestras y Valoración de Datos

Con la finalidad de caracterizar la hidrogeoquímica de la línea base del agua subterránea en la zona del proyecto se tomaron 16 muestras de agua subterránea entre el 20 y el 27 de mayo del 2004, de las cuales, 1 muestra es duplicado de la muestra tomada en el punto ME1-1 (Manantial Espejo). Las primeras 15 muestras se dividieron en 4 grupos de muestras representativas: 3 muestras de la pampa aluvial y alrededores, 5 muestras del macizo volcánico, 3 muestras de aguas subterráneas en las cuencas y 4 muestras de aguas superficiales en las cuencas (lagunas). En la Tabla 33 se presentan los puntos de muestreo.

Las primeras 15 muestras se enviaron a analizar al laboratorio de aguas Ingeniería Laboral y Ambiental S.A. en Córdoba, Argentina, mientras que la muestra duplicado se envió al laboratorio ALS Environmental, Lima, Perú. En la Tabla 34 se presenta la lista de parámetros analizados en cada muestra de agua. Los resultados completos de los laboratorios se presentan en el Anexo 3.

Grupo	Código	Punto	Coordenadas		Descripción	Laboratorio
			WGS 84	UTM		
Pampa Aluvial	ME1-1	24 de Mayo	484000	497000	Manantial Espejo	Ing. Laboral y Ambiental
	ME1-2	27 de Mayo	484000	497000	Paso de Estancia de Santa Cruz	Ing. Laboral y Ambiental
	ME1-3	27 de Mayo	484000	497000	Manantial Espejo - zona de drenaje	Ing. Laboral y Ambiental
Macizo Volcánico	ME2-1	27 de Mayo	484000	497000	El Volcán	Ing. Laboral y Ambiental
	ME2-2	27 de Mayo	484000	497000	El Volcán	Ing. Laboral y Ambiental
	ME2-3	27 de Mayo	484000	497000	El Volcán	Ing. Laboral y Ambiental
	ME2-4	27 de Mayo	484000	497000	El Volcán	Ing. Laboral y Ambiental
	ME2-5	27 de Mayo	484000	497000	El Volcán	Ing. Laboral y Ambiental
Cuenca	ME3-1	27 de Mayo	484000	497000	Manantial Espejo - zona de drenaje	Ing. Laboral y Ambiental
	ME3-2	27 de Mayo	484000	497000	Manantial Espejo - zona de drenaje	Ing. Laboral y Ambiental
	ME3-3	27 de Mayo	484000	497000	Manantial Espejo - zona de drenaje	Ing. Laboral y Ambiental

Tabla 33.- Puntos de muestreo de aguas

Grupo	Código	Punto	Coordenadas		Descripción	Laboratorio
			WGS 84	UTM		
Agua superficial	ME4-1	27 de Mayo	484000	497000	Manantial Espejo - zona de drenaje	Ing. Laboral y Ambiental
	ME4-2	27 de Mayo	484000	497000	Manantial Espejo - zona de drenaje	Ing. Laboral y Ambiental
	ME4-3	27 de Mayo	484000	497000	Manantial Espejo - zona de drenaje	Ing. Laboral y Ambiental
Agua subterránea	ME5-1	27 de Mayo	484000	497000	Manantial Espejo - zona de drenaje	Ing. Laboral y Ambiental
	ME5-2	27 de Mayo	484000	497000	Manantial Espejo - zona de drenaje	Ing. Laboral y Ambiental
	ME5-3	27 de Mayo	484000	497000	Manantial Espejo - zona de drenaje	Ing. Laboral y Ambiental

Tabla 34.- Parámetros analizados por el laboratorio Ingeniería Laboral y Ambiental S.A.

Parámetro	Métodos Analíticos	Límite de detección	Unidades
Conductividad (M. Filtrada)	SM- 2510 B	0.02	uS/cm
PH	SM 4500 H+B - Electrométrico	0.01	pH
Aniones / Cationes Totales	SM- 2510 B	0.01	mEq/l
Sólidos Suspendidos Totales	SM-2540 B&G	1	mg/l
Dureza Total (CaCO ₃)	SM 2340 - C	1	mg/l
Alcalinidad (Total & PP como CaCO ₃)	SM – 2320-B	0.5	mg/l
Calcio Total	SM 3500 Ca-Absorción Atómica	0.1	mg/l
Calcio Disuelto	SM 3500 Ca-Absorción Atómica	0.1	mg/l
Magnesio Total	SM 3500 Mg-Absorción Atómica	0.1	mg/l
Magnesio Disuelto	SM 3500 Mg-Absorción Atómica	0.1	mg/l
Potasio Total	SM 3500 K-Absorción Atómica	0.01	mg/l
Potasio Disuelto	SM 3500 K-Absorción Atómica	0.01	mg/l
Sodio Total	SM 3500 Na-Absorción Atómica	0.1	mg/l
Sodio Disuelto	SM 3500 Na-Absorción Atómica	0.1	mg/l
Bicarbonato	SM – 2320-B	0.5	mg/l
Carbonato	SM – 2320-B	0.5	mg/l
Cloro Libre	SM 4500 Cl -E	0.5	mg/l
Cloruro	SM 4500 Cl ⁻ -E	0.1	mg/l
Cianuro Total	SW 9010 – ASTM D4374	0.01	mg/l
Sulfato	SM 4500 SO ₄ ²⁻ - E	0.1	mg/l
Sulfuro	SM 4500 S ²⁻ - D	0.01	mg/l
Fósforo	SM 4500 P- E	0.03	mg/l
Nitrato	SM 4500 NO ₃ ⁻ - E	0.2	mg/l
Nitrito	SM 4500 NO ₂ ⁻ -B	0.01	mg/l
Amoniaco	SM 4500 NH ₃ C	0.04	mg/l
Aluminio Total	SM 3500 Al-B- Absorción Atómica	0.001	mg/l
Aluminio Disuelto	SM 3500 Al-B- Absorción Atómica	0.001	mg/l
Antimonio Total	U.S. EPA -200.8 ICP-MS	0.0001	mg/l

Parámetro	Métodos Analíticos	Límite de detección	Unidades
Antimonio Disuelto	U.S. EPA -200.8 ICP-MS	0.0001	mg/l
Arsénico Total	U.S. EPA -200.8 ICP-MS	0.0001	mg/l
Arsénico Disuelto	U.S. EPA -200.8 ICP-MS	0.0001	mg/l
Bario Total	U.S. EPA -200.8 ICP-MS	0.0002	mg/l
Bario Disuelto	U.S. EPA -200.8 ICP-MS	0.0001	mg/l
Berilio Total	SM 3500 Be-Absorción Atómica	0.0002	mg/l
Berilio Disuelto	SM 3500 Be-Absorción Atómica	0.0002	mg/l
Boro Total	U.S. EPA -200.8 ICP-MS	0.0006	mg/l
Boro Disuelto	U.S. EPA -200.8 ICP-MS	0.0006	mg/l
Cadmio Total	SM 3500 Cd-Absorción Atómica	0.0002	mg/l
Cadmio Disuelto	SM 3500 Cd-Absorción Atómica	0.0002	mg/l
Cromo Total	SM 3500 Cr- Absorción Atómica	0.001	mg/l
Cromo Disuelto	SM 3500 Cr- Absorción Atómica	0.001	mg/l
Cobalto Total	SM 3500 Co-Absorción Atómica	0.002	mg/l
Cobalto Disuelto	SM 3500 Co-Absorción Atómica	0.002	mg/l
Cobre Total	SM 3500 Cu-Absorción Atómica	0.0009	mg/l
Cobre Disuelto	SM 3500 Cu-Absorción Atómica	0.0009	mg/l
Hierro Total	SM 3500 Fe-Absorción Atómica	0.007	mg/l
Hierro Disuelto	SM 3500 Fe-Absorción Atómica	0.005	mg/l
Plomo Total	SM 3500 Pb-Absorción Atómica	0.001	mg/l
Plomo Disuelto	SM 3500 Pb-Absorción Atómica	0.001	mg/l
Manganeso Total	SM 3500 Mn-Absorción Atómica	0.004	mg/l
Manganeso Disuelto	SM 3500 Mn-Absorción Atómica	0.002	mg/l
Litio Total	U.S. EPA -200.8 ICP-MS	0.001	mg/l
Litio Disuelto	U.S. EPA -200.8 ICP-MS	0.001	mg/l
Mercurio Total	U.S. EPA -200.8 ICP-MS	0.00002	mg/l
Mercurio Disuelto	U.S. EPA -200.8 ICP-MS	0.00002	mg/l

Parámetro	Métodos Analíticos	Límite de detección	Unidades
Molibdeno Total	U.S. EPA -200.8 ICP-MS	0.0009	mg/l
Molibdeno Disuelto	U.S. EPA -200.8 ICP-MS	0.0005	mg/l
Níquel Total	SM 3500 Ni-Absorción Atómica	0.001	mg/l
Níquel Disuelto	SM 3500 Ni-Absorción Atómica	0.001	mg/l

Parámetro	Métodos Analíticos	Límite de detección	Unidades
Selenio Total	U.S. EPA -200.8 ICP-MS	0.0001	mg/l
Selenio Disuelto	U.S. EPA -200.8 ICP-MS	0.0001	mg/l
Silicio Total	U.S. EPA -200.8 ICP-MS	0.009	mg/l
Silicio Disuelto	U.S. EPA -200.8 ICP-MS	0.006	mg/l
Plata Total	U.S. EPA -200.8 ICP-MS	0.0001	mg/l
Plata Disuelto	U.S. EPA -200.8 ICP-MS	0.0001	mg/l
Estroncio Total	U.S. EPA -200.8 ICP-MS	0.007	mg/l
Estroncio Disuelto	U.S. EPA -200.8 ICP-MS	0.001	mg/l
Azufre Total	U.S. EPA -200.8 ICP-MS	0.3	mg/l
Azufre Disuelto	U.S. EPA -200.8 ICP-MS	0.2	mg/l
Talio Total	U.S. EPA -200.8 ICP-MS	0.0002	mg/l
Talio Disuelto	U.S. EPA -200.8 ICP-MS	0.0001	mg/l
Estaño Total	U.S. EPA -200.8 ICP-MS	0.0009	mg/l
Estaño Disuelto	U.S. EPA -200.8 ICP-MS	0.0005	mg/l
Titanio Total	U.S. EPA -200.8 ICP-MS	0.0001	mg/l
Titanio Disuelto	U.S. EPA -200.8 ICP-MS	0.0001	mg/l
Uranio Total	U.S. EPA -200.8 ICP-MS	0.0009	mg/l
Uranio Disuelto	U.S. EPA -200.8 ICP-MS	0.0003	mg/l
Vanadio Total	U.S. EPA -200.8 ICP-MS	0.0009	mg/l
Vanadio Disuelto	U.S. EPA -200.8 ICP-MS	0.0001	mg/l
Cinc Total	SM 3500 Zn-Absorción Atómica	0.0006	mg/l
Cinc Disuelto	SM 3500 Zn-Absorción Atómica	0.0006	mg/l
Zirconio Total	U.S. EPA -200.8 ICP-MS	0.0050	mg/l
Zirconio Disuelto	U.S. EPA -200.8 ICP-MS	0.0003	mg/l

Al comparar los resultados obtenidos del análisis de la muestra tomada en el Manantial Espejo (ME1) en el laboratorio Ingeniería Laboral y Ambiental S.A. y de su duplicado en el laboratorio ALS Environmental, se tiene que los resultados son totalmente comparables dentro del error analítico (ver Figura 21).

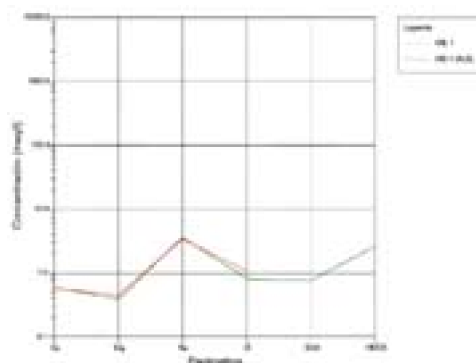


Figura 21.- Diagrama de Schoeller-Berkaloff correspondiente a la muestra del manantial Espejo (ME-1). Se aprecia la correlación entre los laboratorios ALS e Ingeniería Laboral y Ambiental SA. En la muestra enviada a ALS no se analizaron SO_4^{2-} ni HCO_3^- .

Los cálculos realizados para la valoración de los análisis químicos de aguas subterráneas (ver Tabla 35 y Tabla 36) muestran que los datos son válidos para realizar las interpretaciones en este estudio. A continuación se presenta un resumen de los resultados obtenidos de la validación de los datos:

- El balance iónico muestra errores inferiores al 5% en todas las muestras analizadas. Un error de hasta 5% es admisible en este tipo de validación.
- La coherencia entre la dureza y el contenido de Ca^{2+} y Mg^{2+} es muy buena, tienen en su mayoría error cero.
- La conductividad y el contenido de iones generan un factor en promedio 100, lo cual es correcto.
- La relación alcalinidad carbonatada (carbonato y bicarbonato) tiene un error de 20% en todos los pozos, lo cual es admisible. Si se tuviera un error mayor a 25% se podría considerar la posibilidad de un error en los análisis o que falta determinar algún componente significativo.

Muestra	Ca	Mg	Na+K	Cl	SO4	HCO3	Dureza	Alcalinidad	Factor	% Error
ME-1	100	50	100	10	10	10	170	10	100	0
ME-2	120	60	110	12	12	12	192	12	100	0
ME-3	140	70	120	14	14	14	214	14	100	0
ME-4	160	80	130	16	16	16	236	16	100	0
ME-5	180	90	140	18	18	18	258	18	100	0
ME-6	200	100	150	20	20	20	280	20	100	0
ME-7	220	110	160	22	22	22	302	22	100	0
ME-8	240	120	170	24	24	24	324	24	100	0
ME-9	260	130	180	26	26	26	346	26	100	0
ME-10	280	140	190	28	28	28	368	28	100	0

Tabla 35.- Tabla de balance iónico

Muestra	Ca	Mg	Na+K	Cl	SO4	HCO3	Dureza	Alcalinidad	Factor	% Error
ME-1	100	50	100	10	10	10	170	10	100	0
ME-2	120	60	110	12	12	12	192	12	100	0
ME-3	140	70	120	14	14	14	214	14	100	0
ME-4	160	80	130	16	16	16	236	16	100	0
ME-5	180	90	140	18	18	18	258	18	100	0
ME-6	200	100	150	20	20	20	280	20	100	0
ME-7	220	110	160	22	22	22	302	22	100	0
ME-8	240	120	170	24	24	24	324	24	100	0
ME-9	260	130	180	26	26	26	346	26	100	0
ME-10	280	140	190	28	28	28	368	28	100	0

Notas:

(1) Factor de conversión de mg/l a meq/l

(2) % Error = $100 \times (\sum \text{Cationes} - \sum \text{Aniones} / \sum \text{Cationes} + \sum \text{Aniones})$

Muestra	Alcalinidad (eq/L)					Dureza (mg/L)					Conductividad (µS/cm)				
	Ca	Mg	Na+K	Cl	SO4	Ca	Mg	Na+K	Cl	SO4	Ca	Mg	Na+K	Cl	SO4
1	1.2	0.8	1.5	0.2	0.1	1.2	0.8	1.5	0.2	0.1	1.2	0.8	1.5	0.2	0.1
2	1.5	1.0	1.8	0.3	0.2	1.5	1.0	1.8	0.3	0.2	1.5	1.0	1.8	0.3	0.2
3	1.8	1.2	2.0	0.4	0.3	1.8	1.2	2.0	0.4	0.3	1.8	1.2	2.0	0.4	0.3
4	2.0	1.4	2.2	0.5	0.4	2.0	1.4	2.2	0.5	0.4	2.0	1.4	2.2	0.5	0.4
5	2.2	1.6	2.4	0.6	0.5	2.2	1.6	2.4	0.6	0.5	2.2	1.6	2.4	0.6	0.5
6	2.5	1.8	2.6	0.7	0.6	2.5	1.8	2.6	0.7	0.6	2.5	1.8	2.6	0.7	0.6
7	2.8	2.0	2.8	0.8	0.7	2.8	2.0	2.8	0.8	0.7	2.8	2.0	2.8	0.8	0.7
8	3.0	2.2	3.0	0.9	0.8	3.0	2.2	3.0	0.9	0.8	3.0	2.2	3.0	0.9	0.8
9	3.2	2.4	3.2	1.0	0.9	3.2	2.4	3.2	1.0	0.9	3.2	2.4	3.2	1.0	0.9
10	3.5	2.6	3.5	1.1	1.0	3.5	2.6	3.5	1.1	1.0	3.5	2.6	3.5	1.1	1.0

Tabla 36.- Tabla de coherencias de alcalinidad, dureza y factor de conductividad

Muestra	Alcalinidad (eq/L)					Dureza (mg/L)					Conductividad (µS/cm)				
	Ca	Mg	Na+K	Cl	SO4	Ca	Mg	Na+K	Cl	SO4	Ca	Mg	Na+K	Cl	SO4
1	1.2	0.8	1.5	0.2	0.1	1.2	0.8	1.5	0.2	0.1	1.2	0.8	1.5	0.2	0.1
2	1.5	1.0	1.8	0.3	0.2	1.5	1.0	1.8	0.3	0.2	1.5	1.0	1.8	0.3	0.2
3	1.8	1.2	2.0	0.4	0.3	1.8	1.2	2.0	0.4	0.3	1.8	1.2	2.0	0.4	0.3
4	2.0	1.4	2.2	0.5	0.4	2.0	1.4	2.2	0.5	0.4	2.0	1.4	2.2	0.5	0.4
5	2.2	1.6	2.4	0.6	0.5	2.2	1.6	2.4	0.6	0.5	2.2	1.6	2.4	0.6	0.5
6	2.5	1.8	2.6	0.7	0.6	2.5	1.8	2.6	0.7	0.6	2.5	1.8	2.6	0.7	0.6
7	2.8	2.0	2.8	0.8	0.7	2.8	2.0	2.8	0.8	0.7	2.8	2.0	2.8	0.8	0.7
8	3.0	2.2	3.0	0.9	0.8	3.0	2.2	3.0	0.9	0.8	3.0	2.2	3.0	0.9	0.8
9	3.2	2.4	3.2	1.0	0.9	3.2	2.4	3.2	1.0	0.9	3.2	2.4	3.2	1.0	0.9
10	3.5	2.6	3.5	1.1	1.0	3.5	2.6	3.5	1.1	1.0	3.5	2.6	3.5	1.1	1.0

(1) Se compara la alcalinidad de las muestras con la suma de carbonatos y bicarbonatos, pues al pH en que se encuentran las aguas ($\text{pH} > 8$) la presencia del ión carbonato es significativa y no sería correcto comparar la alcalinidad solo con el ión bicarbonato.

(2) $M = (\text{aniones} + \text{cationes}) / 2$

(3) $f = \text{conductividad} / M = \text{factor de conductividad que caracteriza las aguas de un mismo acuífero o río.}$

(4) Las celdas vacías indican pobre cantidad de CO_3^{2-} ($< 0.5 \text{ mg/l}$). Estas bajas concentraciones de CO_3^{2-} coincide con valores de $\text{pH} < 8.3$. Cuando el $\text{pH} > 8.3$ toda la alcalinidad se debe a la suma de CO_3^{2-} y HCO_3^- .

7.4 Calidad del Agua

El término “calidad de agua” se refiere a las características que debe tener el agua para un requerimiento determinado, es decir, la calidad del agua depende del uso que se le va a dar. En nuestro caso determinaremos la “calidad del agua” respecto a irrigación, bebida humana y bebida de ganado, utilizando la Ley 24585 de Calidad de Agua usada en Argentina. Desde la Figura 22 hasta la Figura 32 se presentan las comparaciones de los iones con las regulaciones mencionadas.

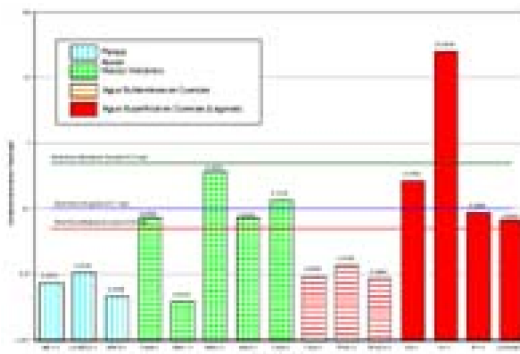


Figura 22.- Contenido de arsénico total comparado con la Ley 24585 de calidad de agua usada en Argentina.

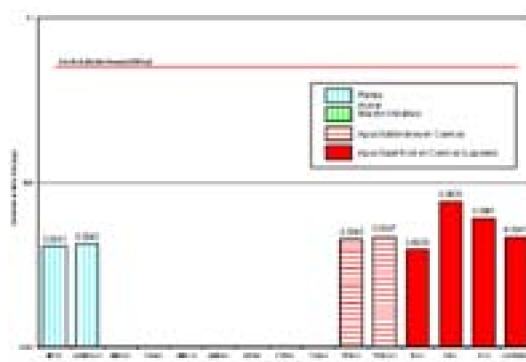


Figura 23.- Contenido de plata total comparado con la Ley 24585 de calidad de agua usada en Argentina.

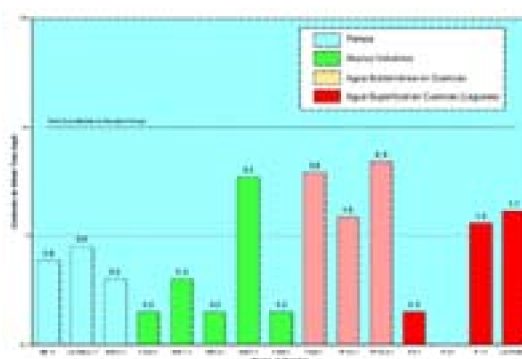


Figura 24.- Contenido de nitrato total comparado con la Ley 24585 de calidad de agua usada en Argentina.

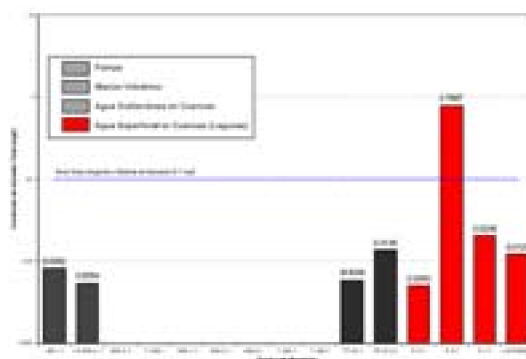


Figura 25.- Contenido de vanadio total comparado con la Ley 24585 de calidad de agua usada en Argentina.

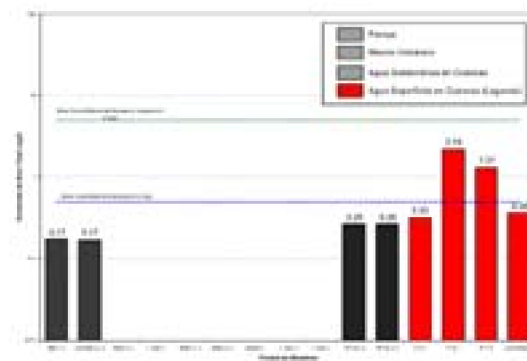


Figura 26.- Contenido de boro total comparado con la Ley 24585 de calidad de agua usada en Argentina.

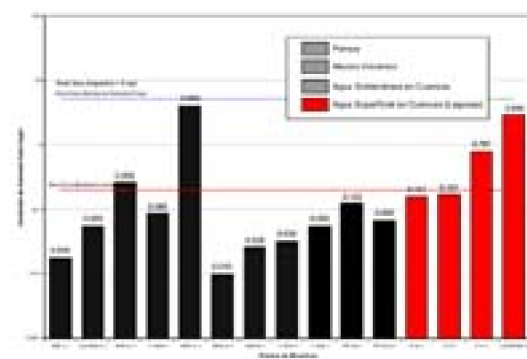


Figura 27- Contenido de aluminio total comparado con la Ley 24585 de calidad de agua usada en Argentina.

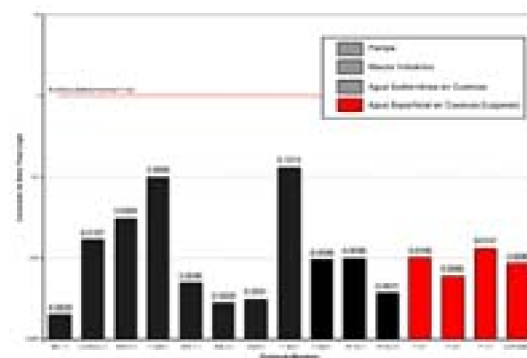


Figura 28.- Contenido de bario total comparado con la Ley 24585 de calidad de agua usada en Argentina.

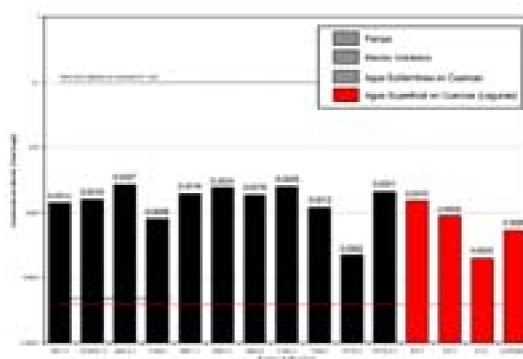


Figura 29.- Contenido de berilio total comparado con la Ley 24585 de calidad de agua usada en Argentina.

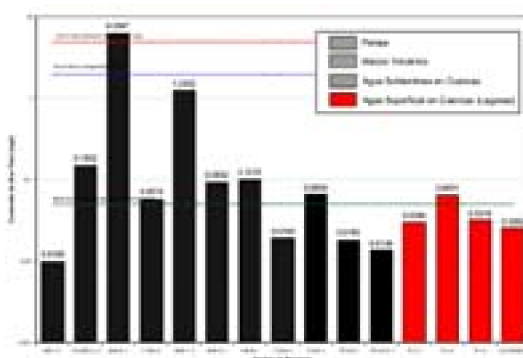


Figura 30.- Contenido de zinc total comparado con la Ley 24585 de calidad de agua usada en Argentina.

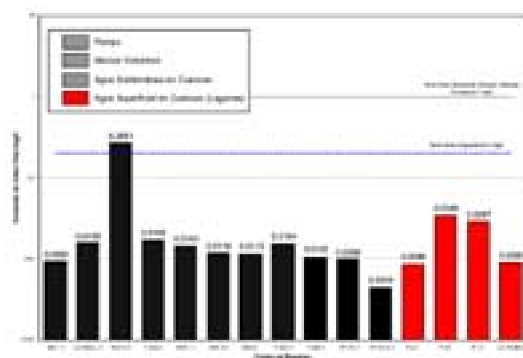


Figura 31.- Contenido de cobre total comparado con la Ley 24585 de calidad de agua usada en Argentina.

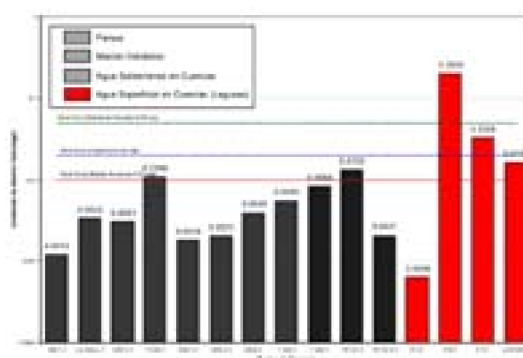


Figura 32.- Contenido de selenio total comparado con la Ley 24585 de calidad de agua usada en Argentina.

En base a los gráficos mostrados se presenta un resumen de la calidad del agua encontrada en el área del proyecto, según grupos de agua:

- Macizo Volcánico.- El agua del pozo WW2 es la de peor calidad, no es apta para bebida humana (exceso de arsénico y berilio), bebida de ganado (exceso de zinc) o irrigación (exceso de arsénico). El agua de los pozos T434 y 436II no son aptas para bebida humana (exceso de arsénico, berilio y selenio (sólo en T434)) ni para bebida de ganado (exceso de zinc), pero si son aptas para irrigación. El agua del pozo WW1 no es apta para bebida humana (exceso de aluminio y berilio) ni para bebida de ganado (exceso de zinc) pero si para irrigación. El agua del pozo T353 no es apta para bebida humana (exceso de arsénico y berilio) ni para irrigación (exceso de arsénico), pero si para bebida de ganado.
- Pampa Aluvial.- El agua del pozo WW3 es la de peor calidad, no es apta para bebida humana (exceso de aluminio), bebida de ganado (exceso de zinc) o irrigación (exceso de cobre). El agua del manantial ME1 y el agua del pozo LG-WELL no son aptas para bebida humana (exceso de berilio), pero si para bebida de ganado o irrigación.
- Agua Subterránea en las Cuencas.- El agua del pozo T432 es la de peor calidad, no es apta para bebida humana (exceso de berilio) ni para bebida de ganado (exceso de zinc), aunque sí para irrigación. El agua de las calicatas TPVC1 y TPVC2 no son aptas para bebida humana (exceso de berilio y selenio (sólo en TPVC1)), pero si son aptas para bebida de ganado e irrigación.
- Agua Superficial en las Cuencas.- El agua de la laguna P3 es la de peor calidad, no es apta para bebida humana (exceso de arsénico, boro, berilio y selenio), bebida de ganado (exceso de arsénico, vanadio, selenio y zinc) e irrigación (exceso de arsénico, vanadio y selenio). El agua de la laguna P2 no es apta para bebida humana (exceso de arsénico y berilio) ni para irrigación (exceso de arsénico) pero si para bebida de ganado. El agua de la laguna P1 no es apta para bebida humana (exceso de arsénico, boro, aluminio, berilio y selenio), ni para irrigación (exceso de selenio), pero si para bebida de ganado. El agua de la laguna LG-POND no es apta para bebida humana (exceso de arsénico, aluminio, berilio y selenio) pero si es apta para bebida de ganado e irrigación.

Debido a que en esta etapa de muestreo ninguna muestra resultó apta para el consumo humano, se debe seguir tomando muestras de los pozos existentes en la pampa aluvial por lo menos una vez cada estación, con la finalidad de tener datos de línea base en el área de la mina y de verificar la presencia de contaminantes. En caso que la presencia de los contaminantes se confirme por un muestreo continuo el agua debe ser tratada antes de utilizarse para consumo humano.

La Tabla 37 presenta los resultados de la evaluación de calidad de agua y en la Tabla 38 se indican las posibles razones para la presencia de los principales contaminantes encontrados en el agua subterránea, siendo las posibles razones que más aplican a la zona de estudio indicadas con un fondo amarillo.

Tabla 37.- Resultados de evaluación de calidad de agua

Uso	Grupo de Agua (1)	Agua Aceptable	Agua No Aceptable	Contaminantes
Bebida Humana	A		WW-3	Al
			ME-1, LG-WELL	Be
	B		WW-2, T-436II, T353	As,Be
			T-434	As,Be,Se
	C		T-432, TPVC2	Be
			TPVC1	Be,Se
	D		P3	As,B, Be,Se
			P2	As,Be
			P1	As,B,Al,Be,Se
			LG-POND	As,Al,Be,Se
Bebida de Ganado	A	ME-1, LG-WELL	WW-3	Zn
	B	T-353	WW-2, T-434, T-436II	Zn
	C	TPVC1, TPVC2	T-432	Zn
	D	P2, P1, LG-POND	P3	As,V,Se,Zn
Irrigación	A	ME-1, LG-WELL	WW-3	Cu
	B	T-434,T-436II	WW-2, T-353	As
	C	T-432, TPVC1, TPVC2		
	D	LG-POND	P3	As,V,Se
			P2	As
			P1	Se

Notas:

(1) Grupo de Agua: A=Pampa Aluvial, B=Macizo Volcánico, C=Agua Subterránea en Cuencas, D= Agua Superficial en Cuencas

Tabla 38.- Posibles razones para presencia de principales contaminantes

Contaminante	Símbolo	Posibles razones de su presencia en el agua subterránea ⁽¹⁾
Aluminio	Al	Presencia de silicatos de aluminio en rocas ígneas y arcillas.
Arsénico	As	Sulfuros con arsénico, asociados al depósito mineral de sulfuros y oro, tal como la arsenopirita.
		Oxidación de las rocas que contienen arsenopirita
		Aplicación de insecticidas en granjas
		Gases volcánicos y aguas geotermiales.
		Quema de carbón y fundición de minerales.
		Erupción volcánica que cubrió con cenizas toda la zona.
Berilio	Be	Silicato Berilo, presente mayormente en pegmatitas.
		Emisiones industriales, tales como producción de metal y la combustión de carbón y aceite
Boro	B	Constituyente esencial de varios silicatos tales como la turmalina y la datolita.
Cobre	Cu	Sulfuros como la calcocita, covelita, calcopirita, bornita y enargita. Óxidos como la cuprita, tenorita, malaquita, azurita, crisocola y brocantita.
		Insecticidas y estiércol que contienen cobre en la agricultura.
		Fundiciones que procesan el mineral cobre en metal.
		Corrosión de tuberías de cobre
		Aguas residuales.
		Tormentas de polvo, descomposición de la vegetación, incendios forestales y aerosoles marinos.
Selenio	Se	Suelos seleníferos.
		Aguas con altas concentraciones de sólidos disueltos.
		Fertilizantes en los cultivos.
		Residuos peligrosos.
		Combustión de carbón y aceite.
Zinc	Zn	Sulfuros como la blenda, marmatita o esfalerita.
		Agua almacenada en tanques de metal.
		Fuentes industriales o emplazamientos para residuos tóxicos.
		Estiércol que contiene zinc en granjas.
		Combustión de carbón
		Procesado del acero

Nota:

(1) Las celdas con fondo amarillo indican las posibles razones que más aplicarían a la zona de estudio.

7.5 Interpretación de Datos

7.5.1 Química de Campo

Se realizaron análisis químicos en campo en todos los manantiales y cursos de agua de superficie en las proximidades del emplazamiento del proyecto. Los datos, que consisten en pH, conductividad eléctrica, temperatura y flujos estimados (para los manantiales) se suministran en la Tabla 23. A continuación se presenta un resumen de los datos de campo obtenidos en el área del proyecto, según grupos de agua:

- **Pampa Aluvial:** En este grupo estamos considerando a los manantiales que recargan el acuífero de la pampa aluvial. Los manantiales presentan agua con una baja conductividad eléctrica, de 300 a 700 uS/cm. El menor valor de conductividad eléctrica fue encontrado en los tres manantiales que descargan desde el Basalto Gregores ubicado aproximadamente 30 km al oeste del sitio del proyecto, estos manantiales son los que presentan mayor flujo (aprox. 15 l/s en conjunto). El pH promedio fue 8.
- **Macizo Volcánico:** Las conductividades eléctricas varían de 1,824 uS/cm (piezómetro T436-II) a 8,230 uS/cm (piezómetro T438-II), siendo el promedio 4,500 uS/cm. El valor de pH promedio fue 8. Todos estos valores corresponden al agua contenida en las rocas volcánicas de la Fm. Chon Aike. Las conductividades y pH medidos se encuentran en las hojas de desarrollo de pozos adjuntas en el Anexo 3. Es importante notar que estos valores de conductividad son similares a las conductividades encontradas en las aguas subterráneas en los bordes del centro volcánico (calicatas y pozo WW-2), esto indicaría que el agua subterránea del macizo volcánico está relacionada con el agua subterránea que se tiene en el centro volcánico.
- **Agua Superficial en Cuencas (Lagunas):** Las conductividades eléctricas varían de 970 a 191,400 uS/cm. En estos cuerpos de agua los valores en conductividad eléctrica se encuentran zonificados, desde las zonas de la cuenca con recarga reciente por manantiales o filtraciones (generalmente en los bordes) hasta la parte aislada de las zonas de recarga (generalmente en la parte central). Por ejemplo, en el borde suroeste de una laguna se obtuvo una conductividad de 1,080 uS/cm (Laguna P2), mientras que en su parte interior se obtuvo una conductividad de 191,400 uS/cm (Laguna P3). El pH promedio fue 9.
- **Agua Subterránea en Cuencas:** Para analizar este tipo de aguas se seleccionó el centro volcánico, pues es la cuenca donde se tiene mayor cantidad de datos (sitio potencial para los relaves). En este caso se aprecia que las conductividades eléctricas se incrementan conforme se aproximan al centro de la cuenca, en el pozo WW-2, ubicado en el borde norte del centro volcánico se tiene una conductividad de 1,079 uS/cm mientras que en el pozo T432, ubicado casi al centro del centro volcánico se obtuvo una conductividad eléctrica de 17,750 uS/cm. El pH promedio fue 9. Todos estos valores de química corresponden al agua existente en las limoarcillitas que rellenan el centro volcánico.

7.5.2 Diagramas Hidrogeoquímicos

Para realizar la interpretación de los datos, se utilizaron los diagramas de Stiff modificados (Figura 34), de Piper (Figura 36) y de Schoeller-Berkaloff (Figura 37). Todos los diagramas hidrogeoquímicos fueron realizados utilizando el programa de cómputo AquaChem Versión 4 (Waterloo Hydrogeologic Software). A continuación se presentan los resultados de los análisis realizados con estos diagramas.

Diagramas de Stiff Modificados

Este diagrama consiste de tres rectas divididas en seis segmentos por una perpendicular. La longitud de cada segmento es proporcional a la concentración en meq/L de un determinado ion. Los segmentos situados a la izquierda representan, de arriba a abajo, la concentración en Na^+ , Mg^{2+} y Ca^{2+} , y a la derecha Cl^- , SO_4^{2-} y HCO_3^- . Los extremos de los segmentos se unen dibujando un polígono cuya forma puede asociarse a un determinado tipo de agua (ver Figura 33).

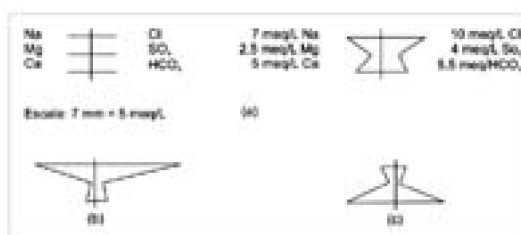


Figura 33.- Diagramas de Stiff (a), representativos de un agua clorurada sódica (b) y un agua bicarbonatada cálcica (c).

Estos diagramas ubicados en un mapa sobre el punto de donde se ha tomado la muestra de agua indican la variación espacial de la composición del agua del acuífero. Debe indicarse la escala a la que se representan los diagramas. Cuando alguna de las aguas es muy salina o muy diluida el diagrama que resulta es muy alargado y puede entonces tomarse otra escala e indicarlo variando el color o el sombreado.

La distribución espacial de los diagramas de Stiff se presenta en la Figura, donde, rápidamente se aprecia que las zonas con mayor concentración de iones son las cuencas (zonas de descarga), tal como se tiene en el centro volcánico (WW2, TPVC2, TPVC1), en la laguna más importante del lado oeste (P1) y en la laguna en la Estancia La Gruta (LG-Pond). Se debe indicar que la cuenca con agua de mayor salinidad (P3), la cual se ubica junto a P2, no se presenta en la Figura debido a que alcanza concentraciones de iones de hasta aprox. 2,500 meq/l, con lo cual, a la escala a la que se han presentado los diagramas de Stiff (100 meq/l) se extendería fuera del área presentada.

En las zonas de descarga de la zona local de estudio (cuencas) no se tienen manantiales, por lo que el análisis de evolución hidrogeoquímica se hará comparando la química del agua subterránea obtenida de los piezómetros instalados en el macizo volcánico con la química del agua subterránea y superficial existente en las cuencas, así como con el agua subterránea existente en la pampa aluvial. Se tiene descarga de manantiales hacia una cuenca desde los basaltos Gregores, pero no se tomaron muestras de esta agua porque estos manantiales se ubican a aprox. 30 km al oeste del proyecto (fuera del área de estudio y demasiado lejos para utilizarlos como abastecimiento de agua) y porque pertenecen a los basaltos Gregores y no a los

"Programa Cybertesis PERÚ - Derechos son del Autor"

Figura 34.- Distribución espacial de diagramas de Stiff

Al analizar la evolución hidrogeoquímica desde las zonas de recarga (como T434 y T353) hacia zonas de descarga (como las cuencas P1, LG Pond, Centro Volcánico) se tiene que en ambas zonas las aguas varían de cloruradas sódicas a sulfatadas sódicas, es decir, el tipo de agua prácticamente no cambia, pero si se incrementa notablemente la concentración de iones, notándose el incremento de los iones Na^+ y la disminución de los iones Ca^{+2} , así como el incremento de Cl^- y SO_4^{-2} . Estos hechos se podrían dar debido a intercambio iónico de ablandamiento (al entrar en contacto el agua con las limolitas que rellenan las cuencas), precipitación de carbonato cálcico e incremento de iones de sodio y sales por evaporación. La presencia de SO_4^{-2} en el agua del macizo volcánico podría estar relacionada con la oxidación de los sulfuros en la capa de roca fracturada poco profunda en el macizo volcánico. En el caso de la evolución hidrogeoquímica desde las zonas de recarga hacia el acuífero de la pampa (WW3, ME1) se puede observar que las aguas cloruradas sódicas a sulfatadas sódicas del macizo volcánico pasan a ser aguas bicarbonatadas sódicas en la pampa aluvial, presentando una baja concentración de sales. Esto indicaría la influencia del agua de recarga reciente en el acuífero aluvial.

El diagrama de Piper es un diagrama de tipo triangular, consta de dos diagramas triangulares y uno romboidal central. En un triángulo equilátero se representan las concentraciones en meq/l de los cationes Ca^{2+} , Mg^{2+} y Na^+ (en ocasiones $\text{Na}^+ + \text{K}^+$) y en otro las concentraciones en meq/l de los aniones HCO_3^- , SO_4^{2-} y Cl^- (o $\text{Cl}^- + \text{NO}_3^-$). Cada uno de los vértices de los triángulos representa el 100% de un ion, de tal manera que la ubicación de un punto en el interior del triángulo indica el porcentaje presente de cada ion respecto del total de los tres. El diagrama de Piper permite:

- Representar la composición química mayoritaria de muchas aguas sobre un único gráfico, facilitando la comparación y la clasificación de las aguas.
- Agrupar aguas por familias hidrogeoquímicas y establecer relaciones genéticas; por ejemplo, si los puntos se alinean entre dos aguas extremas, es probable que se trate de aguas de mezcla entre ambas.
- Determinar las reacciones modificadoras de la composición del agua.

En la figura 35 se muestra el diagrama de Piper y las sectores en los que se divide.

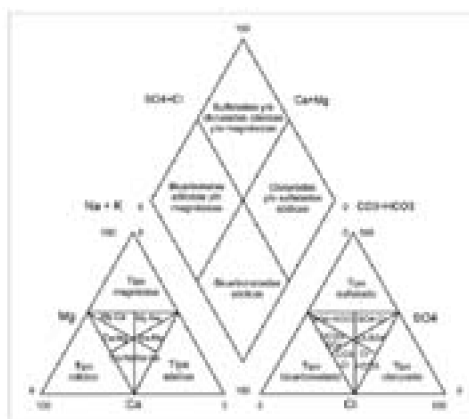


Figura 35- Diagrama de Piper con sectores en que se divide

El diagrama de Piper preparado utilizando los datos de la zona del proyecto se presenta en Figura 36 y se tiene

- Pampa aluvial: El agua del manantial espejo (ME-1) es del tipo Na-HCO_3 . El pozo en la pampa (WW3) indica agua del tipo $\text{Na-Ca-HCO}_3\text{-Cl-SO}_4$ y el pozo en la estancia La Gruta (LG WELL) tiene un agua tipo $\text{Na-Ca-HCO}_3\text{-SO}_4\text{-Cl}$. Al parecer, conforme nos acercamos al macizo volcánico el agua de la pampa se enriquece en Ca , SO_4 y Cl . La similitud entre el agua del pozo en la pampa y el pozo en la Estancia La Gruta sugieren que estas aguas podrían estar relacionadas, indicando un posible flujo desde la Pampa hacia la laguna en la Estancia La Gruta, tal como se aprecia en la piezometría regional. Considerando sólo el primer catión y anión, el agua sería principalmente bicarbonatada sódica.
- Agua Subterránea en Cuencas: En las limolitas que rellenan la base del centro volcánico, el agua captada en los primeros 12 m de profundidad (pozo T432) es del tipo $\text{Na-SO}_4\text{-Cl}$, mientras que las aguas captadas en los primeros 1.5 m de profundidad, por las calicatas TPVC y TPVC2 son del tipo $\text{Na-Ca-SO}_4\text{-Cl}$ y Na-Ca-SO_4 , respectivamente. Entonces las aguas poco profundas tienen calcio y las profundas no. Considerando sólo el primer catión y anión, el agua sería principalmente sulfatada sódica. Este tipo de agua es similar al encontrado en el agua del macizo volcánico, lo cual sugiere que el agua del macizo volcánico se relaciona con el agua subterránea en las cuencas.
- Agua Superficial en Cuencas: El agua de la laguna P3 es del tipo Na-Cl , el agua de la laguna P1 es del tipo $\text{Na-SO}_4\text{-Cl}$, el agua de la laguna P2 es del tipo $\text{Na-SO}_4\text{-HCO}_3$ y el agua de la laguna en la estancia La Gruta (LG POND) es del tipo $\text{Na-Cl-HCO}_3\text{-SO}_4$. Entonces considerando sólo el primer catión y anión, tendríamos dos tipos de aguas superficiales en las cuencas, las sulfatadas sódicas (lagunas P1 y P2) y las cloruradas sódicas (lagunas P3 y LG POND).

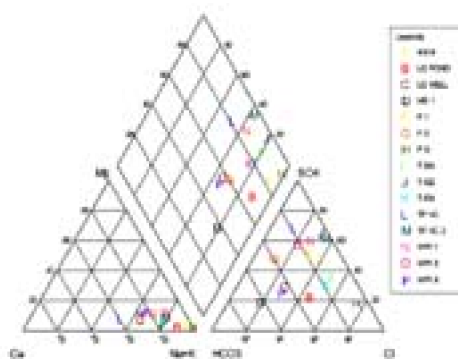


Figura 36.- Diagrama de Piper

- Macizo Volcánico: El agua en los pozos T353 y T434 tienen agua del tipo Na-Cl-SO₄. El agua en los pozos T436-II y WW1 tienen agua del tipo Na-Ca-SO₄-Cl. El agua en el pozo WW2 tiene agua del tipo Na-SO₄-HCO₃-Cl. Entonces considerando sólo el primer catión y el primer anión se tienen aguas cloruradas sódicas (T353 y T434) y aguas sulfatadas sódicas (T436-II, WW1 y WW2). Entonces, la mayoría de las muestras de agua en el Macizo Volcánico exhiben un tipo sodio-sulfato. El sulfato podría relacionarse a la oxidación de los sulfuros en la capa de roca fracturada poco profunda.
- Reacciones Modificadoras de la Composición del Agua: Durante el proceso en el cual, por filtración, el agua superficial en las cuencas pasa a ser agua subterránea en las cuencas, ocurre la precipitación de CaCO₃, el intercambio iónico de ablandamiento Ca/Na (entre las limolitas y el agua) y la reducción de SO₄⁻². El ablandamiento del agua superficial en las cuencas también puede ser notado por el incremento de los valores de pH medidos en el laboratorio (el pH en el aguas superficiales en cuencas es en promedio 8.8 y el pH en el agua subterránea de las cuencas es en promedio 7.9). En el desplazamiento del agua subterránea desde el macizo volcánico hasta el fondo de las cuencas, ocurre la disminución de bicarbonatos y el incremento de sulfatos.

Diagrama de Schoeller-Berkaloff

Los diagramas de Schoeller-Berkaloff constan de columnas graduadas con escalas logarítmicas todas del mismo módulo. Se representan los iones: Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺, Cl⁻, SO₄²⁻ y HCO₃⁻, en mg/L cada uno en una columna. En los extremos se sitúan escalas en meq/L. Las escalas con las concentraciones de los iones se sitúan de modo que el peso equivalente del ion esté en la misma vertical que el 1 de las escalas en meq/L. De esta manera el paso de cualquier concentración en mg/L a meq/L o a la inversa se hace siguiendo la horizontal desde una escala a la otra y no es necesario hacer cálculos para cambiar las unidades. Comparando la forma en que queda representada cada muestra de agua pueden deducirse posibles reacciones que han tenido lugar y también establecer grupos de aguas con características similares. El diagrama de Schoeller-Berkaloff se presenta en la Figura 37 y se tiene:

- Pampa Aluvial: El agua de la pampa aluvial es la menos salina (ME1, WW3 y LG WELL), siendo el agua de tipo bicarbonatada sódica.

- Agua Subterránea en las Cuencas y en el Macizo Volcánico: Es evidente que ambas aguas subterráneas son similares, mayormente sulfatadas sódicas, por lo que deben estar relacionadas. Se aprecia que han ganado Na^+ y que han perdido HCO_3^- y Ca^{+2} . Esto último indicaría precipitación de carbonato cálcico e intercambio iónico de ablandamiento.
- Agua Superficial en las Cuencas: Se aprecia que la laguna P3 es la más salina, siendo de tipo clorurada sódica. Si se le compara con las otras lagunas (P1, P2 y LG POND) se observa que la laguna P3 está enriquecida con Na^+ , Cl^- , SO_4^{-2} y HCO_3^- .

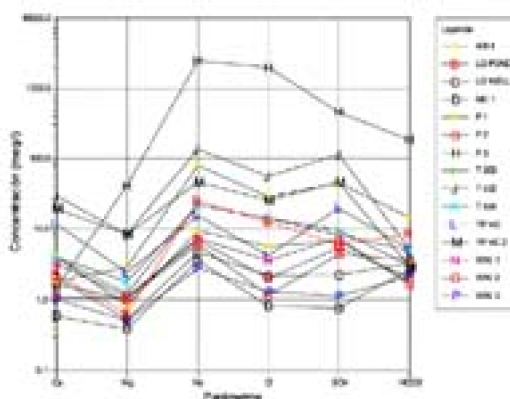


Figura 37.- Diagrama de Schoeller-Berkaloff

7.5.3 Índices Hidrogeoquímicos

En la Tabla 39 y Tabla 40 se presentan los cálculos realizados para determinar cada índice hidrogeoquímico y el análisis detallado de la distribución espacial (ver Figura 4 y Figura 5) de los mismos con la finalidad de analizar las reacciones modificadoras en la composición del agua subterránea durante su movimiento a través del macizo volcánico, cuencas y pampa aluvial.

- El índice $\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$ tiene un valor promedio de 0.33 en las aguas subterráneas del macizo volcánico, mientras que en el agua subterránea y superficial de las cuencas esta relación alcanza los valores de 1 (pozo WW2) y 27.82 (laguna P3), respectivamente. Este incremento del valor en esta relación indica que el agua subterránea que se desplaza por el macizo volcánico al descargar en las cuencas es afectada por procesos de intercambio iónico de ablandamiento (entre el agua y las limolitas que rellenan las cuencas), reducción de sulfatos y precipitación de CaCO_3 (por evaporación). Es interesante notar que el punto de muestreo P2 tiene un valor de 0.60, el cual es un valor muy pequeño en comparación con el agua superficial de las lagunas P1 y P3, lo cual permite suponer que es un punto de descarga de agua fresca desde el macizo volcánico hacia la cuenca.
- El índice $\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$ tiene valores similares en las aguas subterráneas del macizo volcánico (0.33) y la pampa aluvial (0.47), por lo que en este caso no se aprecian fenómenos modificadores del agua relacionados a este índice hidrogeoquímico.

- El índice $\text{Na}^+/\text{Ca}^{2+}$ tiene un valor promedio de 5.45 (piezómetros T353 y T434) en las aguas subterráneas del macizo volcánico que circulan al norte de la zona de vetas, alcanzando un valor promedio de 2.31 (piezómetro T436II y pozo WW1) luego de circular por la zona de vetas. Esta disminución en El índice $\text{Na}^+/\text{Ca}^{2+}$ indica que el agua que se desplaza desde el macizo volcánico hacia la pampa aluvial es afectada por un incremento de disolución de sales de calcio al circular por la zona de vetas.
- El índice $\text{Na}^+/\text{Ca}^{2+}$ en el agua subterránea poco profunda de las cuencas presenta un valor promedio de 1.83 (Calicatas TPVC2 y TPVC1), mientras que en el agua subterránea profunda esta relación alcanza un valor promedio de 5.6 (pozo WW2 y piezómetro T432). Este incremento indica que el agua subterránea profunda en la cuenca es afectada por procesos de intercambio iónico de ablandamiento y precipitación de CaCO_3 .
- El índice $\text{Na}^+/\text{Ca}^{2+}$ en el agua superficial de las cuencas alcanza los valores 10.83, 44.19 y 1678 en las lagunas LG POND, P1 y P3, respectivamente. Comparados estos valores con los obtenidos (5.45 al norte de la zona de vetas y 2.31 al sur de la zona de vetas) en el agua subterránea del macizo volcánico se infiere que en las lagunas se estarían incrementando los iones de sodio por evaporación y se estarían reduciendo los iones de Ca por procesos de intercambio iónico de ablandamiento y precipitación de CaCO_3 . Es interesante notar que el punto de muestreo P2 tiene un valor de 3.60, el cual es un valor muy pequeño en comparación con el agua superficial de las lagunas P1 y P3, lo cual permite suponer que es un punto de descarga del macizo volcánico.
- El índice $\text{Na}^+/\text{Ca}^{2+}$ tiene valores similares en las aguas subterráneas del macizo volcánico (2.31, en base al piezómetro T436-II y al pozo WW1) y de la pampa aluvial (2.75, en base al pozo WW3), por lo que en este caso no se aprecian fenómenos modificadores del agua relacionados a este índice hidrogeoquímico.

Grupo de Agua	Datos Reportados en Unidades				Unidades				Unidades				Unidades			
	mg/l	g/l	mg/l	g/l	mg/l	g/l	mg/l	g/l	mg/l	g/l	mg/l	g/l	mg/l	g/l	mg/l	g/l
Na ⁺	10.83	0.01083	44.19	0.04419	1678	1.678	10.83	0.01083	44.19	0.04419	1678	1.678	10.83	0.01083	44.19	0.04419
Ca ²⁺	0.45	0.00045	0.15	0.00015	0.15	0.00015	0.45	0.00045	0.15	0.00015	0.15	0.00015	0.45	0.00045	0.15	0.00015
CO ₃ ²⁻	0.15	0.00015	0.15	0.00015	0.15	0.00015	0.15	0.00015	0.15	0.00015	0.15	0.00015	0.15	0.00015	0.15	0.00015
HCO ₃ ⁻	0.15	0.00015	0.15	0.00015	0.15	0.00015	0.15	0.00015	0.15	0.00015	0.15	0.00015	0.15	0.00015	0.15	0.00015
Cl ⁻	0.15	0.00015	0.15	0.00015	0.15	0.00015	0.15	0.00015	0.15	0.00015	0.15	0.00015	0.15	0.00015	0.15	0.00015
SO ₄ ²⁻	0.15	0.00015	0.15	0.00015	0.15	0.00015	0.15	0.00015	0.15	0.00015	0.15	0.00015	0.15	0.00015	0.15	0.00015
Mg ²⁺	0.15	0.00015	0.15	0.00015	0.15	0.00015	0.15	0.00015	0.15	0.00015	0.15	0.00015	0.15	0.00015	0.15	0.00015
Fe ²⁺	0.15	0.00015	0.15	0.00015	0.15	0.00015	0.15	0.00015	0.15	0.00015	0.15	0.00015	0.15	0.00015	0.15	0.00015
Mn ²⁺	0.15	0.00015	0.15	0.00015	0.15	0.00015	0.15	0.00015	0.15	0.00015	0.15	0.00015	0.15	0.00015	0.15	0.00015
NO ₃ ⁻	0.15	0.00015	0.15	0.00015	0.15	0.00015	0.15	0.00015	0.15	0.00015	0.15	0.00015	0.15	0.00015	0.15	0.00015
SiO ₂	0.15	0.00015	0.15	0.00015	0.15	0.00015	0.15	0.00015	0.15	0.00015	0.15	0.00015	0.15	0.00015	0.15	0.00015

Tabla 39.- Concentración de los iones en meq/l

Grupo de Agua	Datos Reportados en Unidades				Unidades				Unidades				Unidades			
	mg/l	g/l	mg/l	g/l	mg/l	g/l	mg/l	g/l	mg/l	g/l	mg/l	g/l	mg/l	g/l	mg/l	g/l
Na ⁺	10.83	0.01083	44.19	0.04419	1678	1.678	10.83	0.01083	44.19	0.04419	1678	1.678	10.83	0.01083	44.19	0.04419
Ca ²⁺	0.45	0.00045	0.15	0.00015	0.15	0.00015	0.45	0.00045	0.15	0.00015	0.15	0.00015	0.45	0.00045	0.15	0.00015
CO ₃ ²⁻	0.15	0.00015	0.15	0.00015	0.15	0.00015	0.15	0.00015	0.15	0.00015	0.15	0.00015	0.15	0.00015	0.15	0.00015
HCO ₃ ⁻	0.15	0.00015	0.15	0.00015	0.15	0.00015	0.15	0.00015	0.15	0.00015	0.15	0.00015	0.15	0.00015	0.15	0.00015
Cl ⁻	0.15	0.00015	0.15	0.00015	0.15	0.00015	0.15	0.00015	0.15	0.00015	0.15	0.00015	0.15	0.00015	0.15	0.00015
SO ₄ ²⁻	0.15	0.00015	0.15	0.00015	0.15	0.00015	0.15	0.00015	0.15	0.00015	0.15	0.00015	0.15	0.00015	0.15	0.00015
Mg ²⁺	0.15	0.00015	0.15	0.00015	0.15	0.00015	0.15	0.00015	0.15	0.00015	0.15	0.00015	0.15	0.00015	0.15	0.00015
Fe ²⁺	0.15	0.00015	0.15	0.00015	0.15	0.00015	0.15	0.00015	0.15	0.00015	0.15	0.00015	0.15	0.00015	0.15	0.00015
Mn ²⁺	0.15	0.00015	0.15	0.00015	0.15	0.00015	0.15	0.00015	0.15	0.00015	0.15	0.00015	0.15	0.00015	0.15	0.00015
NO ₃ ⁻	0.15	0.00015	0.15	0.00015	0.15	0.00015	0.15	0.00015	0.15	0.00015	0.15	0.00015	0.15	0.00015	0.15	0.00015
SiO ₂	0.15	0.00015	0.15	0.00015	0.15	0.00015	0.15	0.00015	0.15	0.00015	0.15	0.00015	0.15	0.00015	0.15	0.00015

Tabla 40.- Cálculo de los índices hidrogeoquímicos

- El índice Cl/HCO_3^- en el agua subterránea del macizo volcánico tiene un valor entre 2.20 (pozo WW1) y 4.80 (piezómetro T353), incrementándose a 10.88 (piezómetro T432) en el agua subterránea de las cuencas y a 10.59 el agua superficial de cuenca (laguna P3). Los resultados indican un incremento en la concentración de sales en las aguas del macizo volcánico que descargan a las cuencas, debido a la evaporación que

afecta las cuencas. Es interesante notar que el punto de muestreo P2 tiene un valor de 0.31, el cual es un valor muy pequeño en comparación con el agua superficial de las lagunas P1 (1.90) y P3 (10.59), lo cual permite suponer que es un punto de descarga del macizo volcánico.

- El índice $\text{Cl}^-/\text{HCO}_3^-$ en el agua subterránea del macizo volcánico tiene un valor entre 2.20 (pozo WW1) y 4.80 (piezómetro T353), reduciéndose a 0.59 (pozo WW3) en el agua subterránea de la pampa aluvial, indicando que el agua subterránea de la pampa aluvial tiene menos concentración de sales que el agua en el macizo volcánico.
- El índice icb(-) en el agua subterránea del macizo volcánico al norte de la zona mineralizada alcanzan el valor promedio de -0.57 (piezómetros T353 y T434), mientras en la zona de vetas y al sur de la misma los valores de esta relación se incrementa a -0.44 (T436-II y WW1). Este incremento indica que el agua que se desplaza desde el macizo volcánico hacia la pampa aluvial es afectada por un cambio de bases de endurecimiento al circular por la zona de vetas. El valor negativo de esta relación icb indica que las aguas están relacionadas con rocas volcánicas.
- El índice icb(-) en el agua superficial de las cuencas alcanza -0.89 (laguna P1), -0.84 (laguna P3) y -0.81 (laguna LG POND), valores que al compararlos con los obtenidos en el macizo volcánico (-0.57 al norte de las vetas y -0.44 al sur de las vetas), indican que el agua que se desplaza desde el macizo volcánico hacia las aguas superficiales de las cuencas es afectada por un cambio de bases de ablandamiento.
- El índice icb(-) en el agua subterránea del macizo volcánico al sur de las zonas de vetas es -0.44 (T436-II y WW1) y en la pampa aluvial es -0.47 (pozo WW3). Esto indica que el agua que se desplaza del macizo volcánico hacia la pampa aluvial no sufre reacciones de ablandamiento ni de endurecimiento.
- El índice Kr en el agua subterránea del macizo volcánico muestra valores entre 2.89 (pozo WW1) y 32.98 (piezómetro T434), incrementándose estos valores en el agua superficial y subterránea de las cuencas, alcanzando 135.61 (laguna P1) y 259 (piezómetro T432). Este incremento indica que se está produciendo reducción de sulfatos en el agua superficial y subterránea de las cuencas.
- El índice Kr al sur de la zona mineralizada muestra valores entre 2.89 a 4.37, mientras que en el agua subterránea de la pampa aluvial se tienen valores entre 1.37 y 7.81. Esta similitud entre los valores indica que no se aprecian fenómenos modificadores del agua relacionados a este índice hidrogeoquímico.
- El índice $(\text{Na}^+ + \text{K}^+ - \text{Cl}^-) / (\text{Na}^+ + \text{K}^+ - \text{Cl}^- + \text{Ca}^{2+})$ indica que es probable que la meteorización de las plagioclasas influya en la química del agua subterránea en el macizo volcánico (pozos T436 II, T-353, T-434 y WW1), en el agua subterránea de las cuencas (T432, TPVC1 y TPVC2) y en el agua subterránea de la pampa aluvial (WW3). Esto último relacionaría estas aguas, indicando que el agua subterránea del macizo volcánico estaría recargando el agua subterránea de las cuencas y el acuífero de la pampa aluvial.
- El índice $(\text{Na}^+ + \text{K}^+ - \text{Cl}^-) / (\text{Na}^+ + \text{K}^+ - \text{Cl}^- + \text{Ca}^{2+})$ indica que no es probable que la meteorización de las plagioclasas influya en la química del agua subterránea en el

pozo WW2, en el manantial Espejo (ME1) y en el agua superficial de las cuencas (lagunas P1, P3 y LG POND). Es interesante notar que en el punto P2 si se tiene la probable influencia de la meteorización de plagioclasas en la química de su agua, pudiendo indicar que este punto P2 es un punto de descarga de agua del macizo rocoso hacia la cuenca P3.

- El índice $\text{Na}^+ / (\text{Na}^+ + \text{Cl}^-)$ en todos los grupos de agua, indica que el sodio no proviene de halita o de albita, siendo probable que provenga de intercambio iónico. Esto nos indica que las aguas en esta zona se encuentran relacionadas.
- El índice $(\text{Na}^+ + \text{K}^+ - \text{Cl}^-) / (\text{Na}^+ + \text{K}^+ - \text{Cl}^- + \text{Ca}^{2+})$ indica que la meteorización de las plagioclasas influye en la química del agua subterránea en el macizo volcánico (pozos T436 II, T-353, T-434 y WW1), en el agua subterránea de las cuencas (T432, TPVC1 y TPVC2) y en el agua subterránea de la pampa aluvial (WW3). Esto último relacionaría estas aguas, indicando que el agua subterránea del macizo volcánico estaría recargando el agua subterránea de las cuencas y el acuífero de la pampa aluvial.
- El índice $(\text{Na}^+ + \text{K}^+ - \text{Cl}^-) / (\text{Na}^+ + \text{K}^+ - \text{Cl}^- + \text{Ca}^{2+})$ indica que no es probable que la meteorización de las plagioclasas influya en la química del agua subterránea en el pozo WW2, en el manantial Espejo (ME1) y en el agua superficial de las cuencas (lagunas P1, P3 y LG POND). Es interesante notar que en el punto P2 si se tiene la probable influencia de la meteorización de plagioclasas en la química de su agua, pudiendo indicar que este punto P2 es un punto de descarga de agua del macizo rocoso hacia la cuenca P3.

Entonces, en base al análisis desarrollado, se presentan los resultados obtenidos en la Tabla 41.

Tabla 41.- Resultados del análisis de variación espacial de los índices hidrogeoquímicos

Flujo	Reacción Modificadora de la Química del Agua	Índices Hidrogeoquímicos
Agua subterránea del macizo volcánico al descargar en las cuencas	Intercambio iónico de ablandamiento	Mg/Ca, Na/Ca, icb(-), Na/(Na+Cl)
	Precipitación de carbonato cálcico	Mg/Ca, Na/Ca
	Reducción de sulfatos	Mg/Ca, Kr
	Incremento de iones de sodio por evaporación	Na/Ca
	Incremento de la sales por evaporación	Cl/HCO ₃
Agua subterránea del macizo volcánico al pasar por las zonas mineralizadas	Disolución de sales de calcio	Na/Ca
	Cambio de bases de endurecimiento	icb(-)
Agua subterránea desde niveles someros hacia niveles profundos en las cuencas	Intercambio iónico de ablandamiento	Na/Ca
	Precipitación de carbonato cálcico	Na/Ca
Agua subterránea del macizo volcánico al ingresar a la pampa aluvial	Ninguna. Todos los índices hidrogeoquímicos tienen valores muy similares en el macizo volcánico y en la pampa aluvial.	Mg/Ca, Na/Ca, Kr, icb(-), Na/(Na+Cl), Cl/HCO ₃

7.5.4 Principales Iones

La Figura 38 muestra que el agua más fresca de la zona corresponde al agua subterránea de la pampa aluvial, seguido por el agua subterránea del macizo volcánico, para luego sufrir un incremento importante en la concentración de iones en el agua subterránea de las cuencas, siendo este incremento mucho mayor en el agua superficial de las cuencas (debido a la evaporación y concentración de sales). En la Tabla 42 se aprecian los valores promedio de cada grupo de agua mencionado.

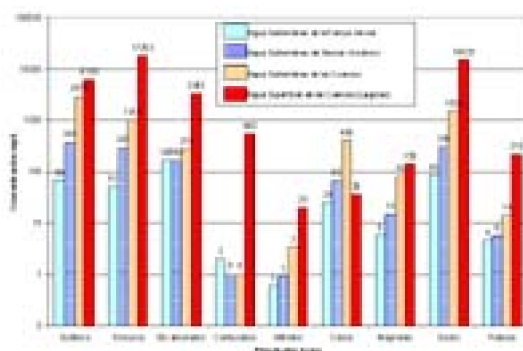


Figura 38.- Concentración de los principales iones para cada grupo de agua

Tabla 42.- Concentraciones promedio de principales iones por grupos de aguas

Iones		Agua Subterránea de la Pampa Aluvial (mg/l)	Agua Subterránea del Macizo Volcánico (mg/l)	Agua Subterránea en Cuencas (mg/l)	Agua Superficial en Cuencas (mg/l)
Aniones	Bicarbonatos	165.7	165.4	271.3	3242.5
	Carbonatos	2	<0.5	<0.5	540
	Cloruros	50.5	286.7	1014.1	17763.3
	Sulfatos	66.3	365	2875	6189.8
	Nitratos	0.6	0.9	3.4	0.2 a 77 ⁽¹⁾
Cationes	Calcio	24.7	65.4	406.5	36.4
	Sodio	84.8	309.2	1523	14920.0
	Potasio	4.4	5.6	14	219
	Magnesio	5.7	14.6	78.8	138.7

(1) demasiada variación para promediar valores, sin embargo, si se promedian las concentraciones existentes se obtiene 20 mg/l.

pH y Alcalinidad: Todas las aguas de la zona de estudio son básicas. Las aguas subterráneas de la pampa aluvial, del macizo volcánico y de las cuencas presentan un pH promedio de 7.9. Las agua superficiales (lagunas) de las cuencas tienen un pH promedio de 8.8.

La alcalinidad en las aguas subterráneas de la pampa aluvial, del macizo volcánico y de las cuencas se debe a la concentración de los bicarbonatos, pues al ser el pH de estas aguas menor a 8.3, la concentración de carbonatos es despreciable (<0.5 mg/l). En estas aguas los bicarbonatos varían de 100 mg/l (pozo WW1) a 304 mg/l (piezómetro T434) en el agua subterránea del macizo volcánico, de 180 mg/l (calicata TPVC2) a 320 mg/l (calicata TPVC1) en el agua subterránea de las cuencas y de 132 mg/l (pozo WW3) a 204 mg/l (pozo LG WELL) en el agua subterránea de la pampa aluvial.

La alcalinidad en las aguas superficiales de las cuencas se debe a la concentración de iones bicarbonatos y carbonatos, pues el pH es mayor a 8.3. En esta agua se tienen concentraciones de bicarbonatos de 225 mg/l (laguna P2) a 11,300 mg/l (laguna P3) y de carbonatos de 20 mg/l (laguna LG POND) a 1,500 mg/l (laguna P3). Entonces, se tiene que los valores más altos en bicarbonatos y carbonatos corresponden a la laguna P3. El incremento de iones bicarbonato en las aguas superficiales de cuencas cerradas, como en la laguna P3, se debe a la acumulación de sales por evaporación y a la liberación de dióxido de carbono (CO₂) debido a la reducción de sulfatos.

Cloruros: En los alrededores de la pampa aluvial se tienen concentraciones de 29 mg/l (manantial ME1) a 77 mg/l (pozo LG WELL), en la pampa aluvial se presentan 132 mg/l (pozo WW3), en el macizo volcánico se encuentran de 128 mg/l (pozo WW1) a 515 mg/l (piezómetro T353), en el agua subterránea de las cuencas alcanza los 1,987 mg/l (piezómetro T432) y en el agua superficial de las cuencas alcanza los 69,547 mg/l

(laguna P3). Se aprecia entonces que las aguas superficiales y subterráneas existentes en las cuencas tienen las mayores concentraciones de cloruros.

En las aguas subterráneas del macizo volcánico y de la pampa aluvial el cloruro está presente en concentraciones bajas, con concentraciones menores que las concentraciones de sulfatos y bicarbonatos. Esto se debe a que las rocas volcánicas no pueden producir gran cantidad de cloruros en aguas naturales.

En las aguas superficiales y subterráneas en las cuencas se tiene un alto contenido de cloruros debido a tres razones principales: 1) acumulación de sales por evaporación; 2) retención de los cloruros por las arcillas (pues sólo las moléculas de agua pasan a través de las arcillas, acumulándose los cloruros en las arcillas hasta alcanzar altas concentraciones); y 3) los cloruros no llegan a saturar casi nunca y son muy difícilmente alterados por cambio iónico u otro tipo de acción.

Sulfatos: En los alrededores de la pampa aluvial se tienen concentraciones de 37 mg/l (ME1) a 108 mg/l (LG WELL), en la pampa aluvial se presenta una concentración de 54 mg/l (WW3), en el macizo volcánico se encuentran concentraciones de 326 mg/l (T436-II) a 466 mg/l (T353), en el agua subterránea de las cuencas alcanza los 5,440 mg/l (T432) y en el agua superficial de las cuencas alcanza los 22,125 mg/l (laguna P3). Se aprecia entonces que las aguas superficiales y subterráneas existentes en las cuencas tienen las mayores concentraciones de sulfatos.

Las concentraciones ligeramente mayores en el agua subterránea del macizo volcánico podrían estar asociadas con la oxidación de los sulfuros existentes en la zona, mientras que las altas concentraciones en las cuencas se pueden deber a la presencia de evaporitas (como el yeso) entre las limolitas depositadas en la base de las cuencas, así como a la acumulación de sales por evaporación en las cuencas.

Nitratos: En los grupos de agua existentes en la zona del proyecto la presencia promedio de nitratos es muy baja, 0.6 en la pampa aluvial, 0.3 en el macizo volcánico y 3.4 en el agua subterránea de las cuencas. En la laguna P3 se tiene la mayor concentración de nitratos en la zona alcanzando los 77 mg/l, la cual se debe a la concentración de sales por evaporación. Es interesante notar que el punto P2, próximo a la laguna P3 tiene una concentración de nitratos <0.2 mg/l lo cual podría indicar que el punto P2 es un punto de descarga reciente de agua desde el macizo volcánico.

Calcio: El calcio presenta una concentración promedio de 25 mg/l en la pampa aluvial, de 65 mg/l en el macizo volcánico, de 407 mg/l en el agua subterránea de las cuencas y de 36.4 mg/l en el agua superficial de las cuencas. Se aprecia entonces que la concentración del calcio en las aguas superficiales es menor que en los otros grupos de agua. Esto último se debe a que las aguas superficiales en las cuencas pierden calcio por precipitación de carbonato de calcio e intercambio iónico.

Sodio: En la pampa aluvial se tiene una concentración promedio de 85 mg/l, en el macizo volcánico 309 mg/l, en el agua subterránea en las cuencas 3,148 mg/l (T432) y en el agua superficial de las cuencas 57,113 mg/l (laguna P3). Es interesante notar que el punto P2 tiene una concentración de 139 mg/l, lo cual indicaría que en el punto P2 se tendrían descargas recientes de agua subterránea del macizo volcánico.

El alto contenido de sodio en el agua subterránea y superficial de las lagunas se debe a la presencia de evaporitas en las limolitas que rellenan la cuenca, a la acumulación de agua de lluvia por largo tiempo, a que no se tienen importantes reacciones de precipitación que pueden mantener bajo el sodio (en la forma como la precipitación de carbonatos controla las concentraciones de calcio) a los procesos de intercambio iónico y a que las limolitas capturan el agua con su carga de solutos por largos períodos de tiempo (incrementado su concentración). Una evidencia del proceso de intercambio iónico es que en los resultados las concentraciones de calcio y magnesio son menores que las concentraciones de sodio.

Potasio: El agua subterránea de la pampa aluvial presenta una concentración promedio de 4.4 mg/l, el agua subterránea del macizo volcánico 5.6 mg/l, el agua subterránea en las cuencas alcanza los 22 mg/l (piezómetro T432) y el agua superficial en las cuencas alcanza los 844 mg/l (laguna P3). Por lo que es notorio el incremento en la concentración de potasio.

En los grupos de agua considerados se tienen bajas concentraciones de potasio debido a que es poco común en rocas volcánicas ya que el potasio es liberado con gran dificultad de los minerales silicatados y exhiben una fuerte tendencia a ser reincorporado en los productos de meteorización del suelo, especialmente en ciertos minerales de arcilla. El incremento de la concentración de potasio en las aguas superficiales de las cuencas se debe a incremento de sales por evaporación y a la disolución de sales potásicas naturales dentro de las limolitas que rellenan las cuencas.

Magnesio: En la pampa aluvial se tiene una concentración promedio de 5.7 mg/l, en el macizo volcánico 14.6 mg/l, en las aguas subterráneas de las cuencas la concentración de magnesio alcanza los 103 mg/l (piezómetro T432) y en las aguas superficiales de las cuencas la concentración de magnesio alcanza los 500 mg/l (laguna P3). Como se aprecia, el magnesio es más abundante en las aguas superficiales de las cuencas, debido a la concentración de sales por evaporación, precipitados de dolomita y magnesita en lagunas salinas y por intercambio iónico.

8 MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL

8.1 Generalidades

El modelo hidrogeológico conceptual es una representación idealizada y simplificada del sistema hidrogeológico real, describiendo en forma concisa y coherente los elementos hidrogeológicos del ambiente bajo estudio y la forma de interactuar entre ellos. Una buena referencia sobre los modelos conceptuales se encuentra en la Norma Técnica ASTM D5447. El modelo se construye en base a:

- un conocimiento detallado de las condiciones geológicas e hidrogeológicas del sitio,
- un entendimiento de la forma en la cuál interactúan los elementos hidrogeológicos así como de los procesos que influyen el acuífero, y
- una serie de hipótesis producidas utilizando datos regionales y locales.

Se debe indicar que no importa cuanto trabajo de campo sea desarrollado para describir el sistema, nuestro modelo conceptual nunca podrá describir todos los detalles del sistema real. Así como también se debe resaltar que el modelo conceptual puede variar conforme se obtenga mayor información.

8.2 Objetivos

- Utilizar el modelo en el desarrollo de hipótesis sobre los procesos hidrogeológicos que ocurren en el área.
- Utilizar esta información para administrar los recursos de agua subterránea.
- Entender el comportamiento de un sistema de flujo (cómo el agua ingresa, sale o se queda en el área de estudio).
- Identificar y describir aspectos importantes del sistema hidrogeológico.
- Sintetizar la información regional y local previamente colectada en un formato útil para evaluación.
- Contar con una herramienta importante para la toma de decisiones.
- Identificar parámetros críticos que necesitan de más datos.
- Tener la posibilidad de realizar un modelo matemático.

8.3 Unidades Hidroestratigráficas

Una unidad hidroestratigráfica se define como un grupo de formaciones, formación o parte de una formación geológica que pueden estar hidráulicamente conectadas o ser agrupadas en base a su similar conductividad hidráulica. Las unidades hidroestratigráficas existentes en los alrededores del proyecto se resumen en la Tabla 43. Como en la tabla mencionada se hace mención a los términos acuífero, acuitardo y acuicludo, así como acuíferos libre, semiconfinado y confinado, se hace una breve definición de cada término:

- **Acuífero.**- formación geológica que permite el almacenamiento y el desplazamiento o transmisión del agua por poros o por grietas, proporcionando cantidades apreciables de agua para su explotación de una manera fácil y económica.
- **Acuífugo.**- formación geológica absolutamente impermeable que no almacena agua ni la transmite.
- **Acuitardo.**- formación geológica de baja permeabilidad que almacena agua pero la transmite con mucha dificultad, es decir, muy lentamente. No es posible su explotación directa pero puede recargar, por flujo vertical inducido a otros acuíferos.
- **Acuicludo.**- formación geológica que almacena agua pero no la transmite, es decir, que por sus características no permite el movimiento o circulación del agua en su seno. Ello hace que no sea posible su explotación.
- **Acuífero libre.**- aquel que en el límite superior de saturación está a la presión

atmosférica.

- Acuífero confinado.- aquel en que el agua está en cualquier punto del mismo a mayor presión que la atmosférica y por tanto al efectuar una perforación, el agua asciende hasta un nivel superior al del techo del acuífero.
- Acuífero semiconfinado.- acuífero en condiciones similares al acuífero cautivo pero que puede recibir, recarga o perder agua a través del lecho y/o la base.

Tabla 43.- Unidades hidroestratigráficas del proyecto Manantial Espejo

Unidad Hidroestratigráfica	Rango Estimado de Conductividad Hidráulica (m/s) ⁽¹⁾	Espesor Estimado (m) ⁽²⁾	Clasificación Hidrogeológica
	Suelos		
Pampa Aluvial	10^{-6} a 10^{-3}	40 a 120 ⁽³⁾	Acuífero (libre a semiconfinado)
Aluviales al sur de la pampa aluvial	10^{-7} a 10^{-4}	0 a 10	Acuífero colgado (libre)
Limos y arcillas que cubren las limolitas que rellenan las cuencas	10^{-9} a 10^{-7}	0 a 3	Acuitardo (libre)
	Rocas		
Volcánicos meteorizados/fracturados y volcanoclásticos	10^{-8} a 10^{-6}	5 a 20 ⁽⁴⁾	Acuífero (libre)
FALLAS Y VETAS EN EL MACIZO VOLCÁNICO	10^{-7} a 10^{-4}	1 a 10 ⁽⁵⁾	Acuífero (libre a semiconfinado)
Basaltos recientes	10^{-8} a 10^{-3}	Hasta 50	Acuífero a acuitardo (libre a semiconfinado)
Limolitas (rellenos en cuencas)	10^{-11} a 10^{-8}	0 a >40 ⁽⁴⁾	Acuitardo a acuicludo (libre a semiconfinado)
Rocas competentes	10^{-14} a 10^{-10}	Ilimitado	Acuicludo a acuitardo (confinado)

(1) Intervalos de conductividad estimados en base a las pruebas hidráulicas realizadas por GWI SAC (2004) y a la base de datos Enviro-Base Lite (Waterloo Hydrogeologic, 2003).

(2) Espesores estimados en base a observaciones de campo in-situ, salvo se indique lo contrario.

(3) Espesor estimado en base al estudio geofísico de resistividad realizado por QGA S.A.(2004)

(4) Espesor estimado en base a las perforaciones recientes realizadas por GWI SAC

(Mayo, 2004).

(5) Espesor variable estimado en base a la revisión de las hojas de registro geológico de los más de 200 pozos realizados por exploración mineral en la zona.

8.3.1 Acuíferos Basálticos

Los acuíferos basálticos cercanos al proyecto Manantial Espejo incluyen el Basalto Gregores, Basalto Cerro Tejedor y el Basalto La Angélica. La permeabilidad de estos basaltos probablemente sean altamente variables, en el rango de 10^{-8} m/s (relativamente no fracturada) a 10^{-3} m/s (fracturada a porosa). La permeabilidad de los basaltos depende de la velocidad de enfriamiento del flujo, del número y características de las zonas interflujos, del espesor del flujo y del relleno (material de grano fino o precipitado). La velocidad de enfriamiento es más rápida cuando los flujos de lavas basálticas ingresan al agua; sin embargo, todas las formaciones basálticas en el área se formaron luego de la regresión del Mar de Patagonia. Por consiguiente, estos basaltos no pueden ser tan porosos y transmisivos como los basaltos recientes en almohadas ("pillow lavas"). Sin embargo, los basaltos en el área tienen zonas fracturadas y brechadas en las partes altas y bajas de cada flujo. Estas zonas interflujo pueden tener altas permeabilidades. Las partes altas de cada flujo tienden a ser más vesiculares que las partes inferiores del flujo. Vesículas de 1 a 5 cm fueron observadas en el Basalto La Angélica la cual se ubica a unos 20 km al oeste del proyecto. El centro de los flujos son más fluidos y se enfrían más lentamente; por lo tanto, el centro del flujo forma una zona de baja permeabilidad entre dos zonas más permeables. Algunas de las formaciones basálticas están constituidas de varios flujos delgados los cuales tienden a ser más fracturados y vesiculares que los flujos más gruesos.

Prominentes escarpas se han formado a lo largo del lado norte de la Pampa con alturas mayores a los 50 m. Tres manantiales fueron ubicados en la base del Basalto Gregores (aproximadamente 30 km al oeste del sitio del proyecto) fluyendo a un flujo combinado de aprox. 15 l/s. Estos manantiales alimentan una laguna, donde el agua se evapora y se infiltra hacia la pampa. Debido a que no se observaron otras filtraciones o manantiales en las paredes del basalto, parece que la secuencia basáltica es bien drenada y libre. El espesor saturado del acuífero basáltico debe ser considerable al norte de la Pampa.

8.3.2 Acuíferos de Arenisca (Miembro Monte León - Fm. Patagonia)

El miembro Monte León de la Formación Patagonia aflora en varios sitios cerca al proyecto Manantial Espejo. En esta formación, 160 km al este del área del proyecto, se instaló un campo de pozos para abastecer de agua al poblado Puerto San Julián, donde dada su configuración geológica se le considera un acuífero semiconfinado. En base a las pruebas hidráulicas realizadas en el campo de pozos, se determinó una transmisividad de $40 \text{ m}^2/\text{día}$, un almacenamiento de 3.5×10^{-4} y una permeabilidad de $6 \times 10^{-2} \text{ m/día}$. La producción individual de los pozos es en promedio de 12 m³/h, manteniendo el nivel dinámico por encima del filtro, lo que determina un caudal específico

de 1.2 m³/h/m. La zona productora en el acuífero presentó una resistividad entre 30 y 100 ohmios-metro, alcanzando entre 40 a 50 metros de espesor.

Las areniscas tienen algo de porosidad primaria – particularmente en los estratos fosilíferos; sin embargo, el coeficiente de almacenaje en los pozos de San Julián sugiere una roca fracturada y bien interconectada. El movimiento de agua subterránea probablemente sea a través de los estratos fosilíferos y fracturas. Es incierto cuan continua es la Fm. Monte León en los alrededores del área del proyecto Manantial Espejo.

8.3.3 Acuífero Pampa Aluvial (Fm. La Avenida)

Los sedimentos que conforman el acuífero en la pampa aluvial fueron depositados por un río antiguo relacionado con el sistema de drenaje del Río Chico. El paleocauce posee un ancho promedio de aproximadamente 3.5 km que se ensancha hacia una cuenca aluvial de grandes dimensiones inmediatamente al este del Manantial Espejo. En base a los datos proporcionados por el pozo WW3, el nivel freático del acuífero aluvial parece estar en los primeros 20 m bajo la superficie.

El acuífero de la pampa aluvial es uno de los principales objetivos como sistema de suministro de agua para la mina. La elección de una zona para instalar un campo de pozos debe tomar en consideración la posibilidad de recarga, el uso de los terrenos presentes y pre-existentes, el uso existente del agua, la capacidad de los pozos y la calidad el agua.

En Julio del 2004, la compañía Quantec Geoscience Argentina S.A. (QGA S.A.) realizó un estudio geofísico de resistividad por búsqueda de mineralización en el macizo volcánico y por búsqueda de potenciales sitios para obtener aguas subterráneas en la pampa aluvial. Las líneas de resistividad realizadas para la exploración por agua subterránea fueron las líneas 1,7 y 8, cuyas ubicaciones se presentan en la Figura . La línea 7 de resistividad realizada en la Pampa aluvial a 4.5 km al oeste de la zona del proyecto indica un depósito aluvial con un espesor de 45 m, incrementándose a 75 m en los alrededores de la línea Norte 4591000. Mientras que en la Línea 1 de resistividad realizada en la zona de la Estancia Manantial Espejo se tiene un depósito aluvial con un espesor que varía de 40 m en los extremos de la línea hasta 120 m en la parte central. En los tres perfiles de resistividad mencionados se tiene una alta resistividad, lo que sugiere agua subterránea con baja mineralización. Es probable que los coeficientes de almacenamiento para el acuífero sean altos ya que la mayoría de los depósitos se encuentran inconsolidados.

8.4 Hidrogeología del Centro Volcánico

El Centro Volcánico es una cuenca cerrada, donde en base a las lecturas realizadas en el piezómetro T433-II (ubicado en las cumbres sureste del centro volcánico) y el piezómetro

T435-II (ubicado en las cumbres suroeste del centro volcánico), se tiene que el nivel freático en las cumbres sureste se encuentra a 4 m más elevado que el nivel freático en la base del centro volcánico (ver Figura 10), mientras que en las cumbres suroeste el nivel freático se ubica a 15 m más elevado que el nivel freático en la base del centro volcánico (ver Figura 12). El nivel freático en la base del centro volcánico se ubica a los 341 m.s.n.m.

En base al análisis de los niveles de agua medidos en los piezómetros T385 y T432 (ver Figura 9) se ha determinado que en el centro de la cuenca existe una gradiente vertical ascendente de 0.03 m/m.

Aunque la concentración de sales por evaporación es un fenómeno que rara vez ocurre en acuíferos, en este caso puede ocurrir debido a que el nivel de agua en el fondo del centro volcánico es poco profundo (sólo 1.5 m) y la franja capilar en los materiales limoarcillosos que rellenan la base de estas cuencas puede variar de 1 a 4 m, siendo el agua del acuífero que asciende por capilaridad fácilmente afectada por la evaporación.

Las mayores elevaciones del nivel freático en las cumbres que en la base del centro volcánico y la presencia de rocas de baja permeabilidad evitan que escapen filtraciones hacia los alrededores (considerando que el nivel freático en los relaves no excedan los niveles freáticos en las cumbres de los alrededores). En la Figura 39 se muestra la sección hidrogeológica del Centro Volcánico, la cual se preparó en base a los piezómetros T385, T432, T433-I, T433-II y T434.

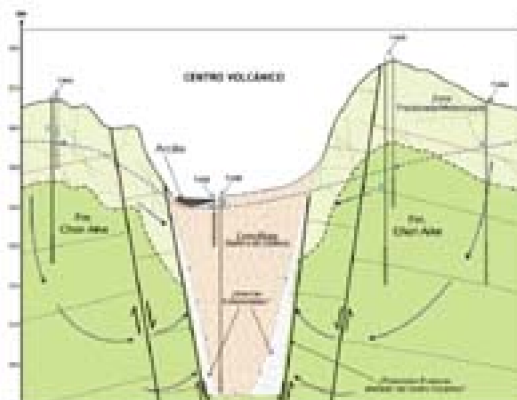


Figura 39.- Sección hidrogeológica en el centro volcánico

8.5 Hidrogeología del Depósito Mineral

Se tienen cuatro tipos principales de alteración asociados con la mineralización: oxidación (superficial), propilítica (bloque piso), silicificación (veta) y argílica (bloque techo). En general las zonas de silicificación ("vuggy silica") o fracturada tienen la más alta porosidad y permeabilidad, por lo que el flujo de agua subterránea se concentra a lo largo de las vetas y estructuras asociadas. Las zonas de alteración argílica (arcillosas) tienen las permeabilidades más bajas, inhibiendo el flujo de agua subterránea. El nivel freático, en

base a las mediciones de niveles de agua en pozos pre-existentes en las vetas María y Karina Unión, indican una profundidad de aprox. 50 m desde la superficie. En la Figura se aprecia una sección típica del depósito mineral (Veta María, Foto 9) en la cual se tiene un espesor de zona meteorizada/oxidada con un espesor que varía entre 20 y 50 m, el cual coincide con la ubicación del nivel freático. En esta zona, la porosidad y permeabilidad deben ser mayores que los valores de las mismas en la roca no meteorizada profunda.



Foto.9- Veta María (vista mirando desde el oeste sur oeste hacia la pampa aluvial)

Aunque las vetas tienen una permeabilidad mucho más alta que las rocas encajonantes, la recarga de estas estructuras es probablemente muy baja debido a la limitada exposición en superficie y a que promueven la escorrentía (ya que las vetas son más resistentes a la meteorización y forman elevaciones topográficas en el área). La recarga solo ocurrirá durante las precipitaciones y el deshielo.

En la Figura 16 se aprecia que regionalmente el flujo tiende a desplazarse desde las partes altas del norte hacia el SE y SO, siendo el flujo que se dirige hacia el SO desviado hacia el SE por la Veta María, lo cual indicaría que la veta María es una de las estructuras más transmisivas. Tal vez las otras vetas también sean tan transmisivas como la veta María, pero como no se tienen suficientes datos de niveles de agua en las otras vetas, no se puede afirmar con seguridad lo anterior. También es probable que las vetas tengan permeabilidades variables a lo largo de su rumbo debido al fallamiento y a que tienden a acuíñarse. Generalmente las fallas y zonas de corte paralelas a las vetas restringen el movimiento de agua subterránea perpendicular al rumbo e incrementa la circulación en la dirección del rumbo. Aunque, también podrían actuar como barreras hidráulicas, bloqueando el flujo del agua subterránea perpendicular al rumbo de la estructura. Este efecto producido por las fallas a lo largo de las vetas generaría compartimentos hidráulicos, determinando que la veta sea anisotrópica (diferentes conductividades hidráulicas en diferentes direcciones). Por ejemplo, esta anisotropía podría producir un nivel piezométrico alto en el bloque techo de la falla y un nivel piezométrico menor en el bloque piso.

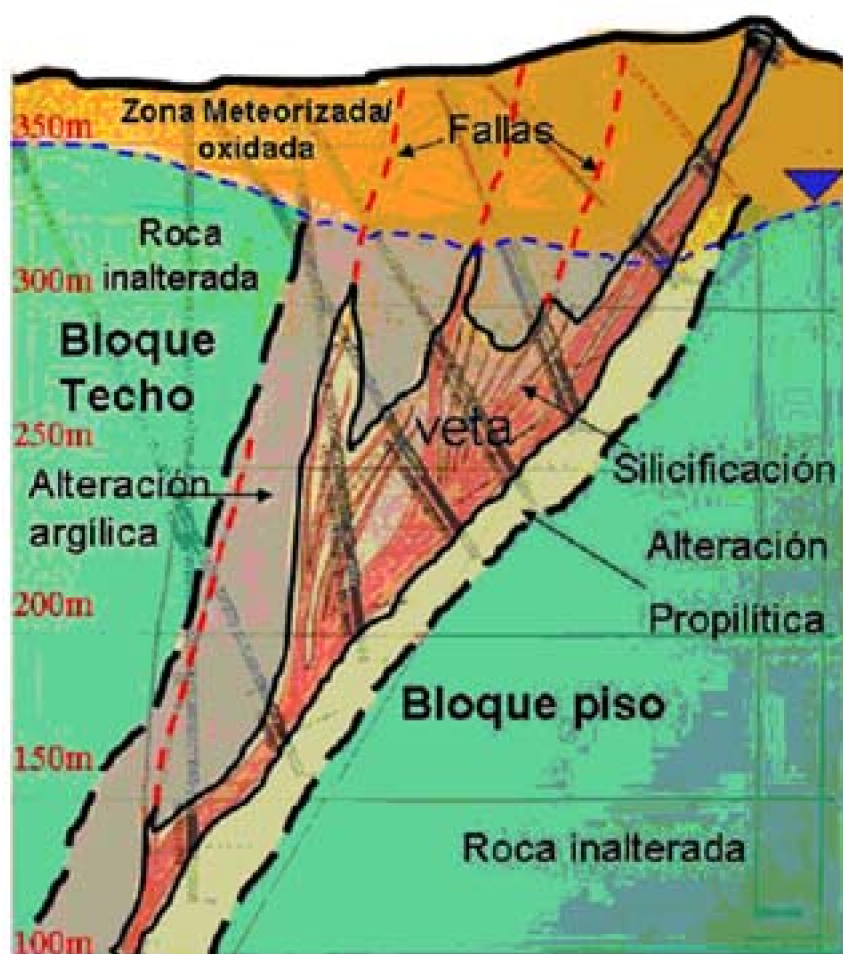


Figura 40.- Sección hidrogeológica conceptual del depósito mineral (veta María)

9. BALANCE HÍDRICO

9.1 Generalidades

El balance hídrico, consiste en aplicar el principio de la conservación de la masa a una región definida por unas determinadas condiciones de contorno. Se establece que la diferencia entre las entradas y las salidas del sistema que se ha definido, es igual a la variación de almacenamiento, es decir, debe existir un equilibrio entre las entradas, las salidas y las variaciones del sistema. Un balance siempre responde a una ecuación del tipo:

$$\text{Entradas} - \text{Salidas} = \text{Variación del almacenamiento} + \text{error}$$

9.2 Objetivos

- Realizar el balance hídrico en el área del macizo volcánico y el área de la pampa aluvial.

9.3 Macizo Volcánico

En base a la información obtenida a la fecha, se estima que el 95% de la precipitación anual total que cae en el área de estudio se pierde por evapotranspiración. Se estima que aproximadamente el 3% se deriva por escorrentía (subsuperficial mayormente) y el 2% ingresa al sistema de agua subterránea profunda, para luego desplazarse a través del Macizo Volcánico por zonas transmisivas, tales como fracturas, fallas y vetas (toda estructura geológica que tenga una permeabilidad considerablemente más alta que la permeabilidad de las rocas en el macizo). Esta agua que se infiltra se descargaría en el acuífero de la Pampa Aluvial y en las cuencas al sur del Macizo Volcánico (como la Laguna La Gruta).

Los valores calculados de evapotranspiración potencial (649 mm) y real (168 mm) exceden el 100% (168 mm) de las precipitaciones en el área, por lo que se asume que tan sólo el 2% de la precipitación promedio anual (168 mm) originada en el área de la mina (estimada en 28 km²) recarga el sistema acuífero profundo, lo cual produce una recarga promedio anual en el área de la mina de 3 l/s.

9.4 Pampa Aluvial

Se confeccionó un balance hídrico (Tabla 44 y Figura 41) para el acuífero de la pampa aluvial con la finalidad de evaluar su rendimiento potencial y conveniencia como una fuente segura de agua para la mina. Para realizar este balance se consideró lo siguiente:

- El área de recarga al norte de la pampa que podría generar flujo hacia la pampa aluvial se estimó en 350 km.²
- El área de recarga al sur de la pampa que podría generar flujo hacia la pampa aluvial se estimó en 350 km.²
- El coeficiente de recarga para la roca se estimó en 2%.
- El coeficiente de recarga para el acuífero pampa aluvial se estimó en 5%. El área de recarga de la pampa aluvial se estimó en 120 km.².
- La escorrentía en pequeñas áreas de captación adyacentes a la pampa aluvial se estimó en 5%, con un área de escorrentía de 10 km.².

Basándonos en los puntos anteriores se realizan los cálculos presentados en la Tabla 44, los cuales indican que la recarga del acuífero aluvial debería ser de aproximadamente 6 millones de m³ anuales (o alrededor de 109.2 l/s). Ya que el valle no posee un curso de agua permanente, el acuífero debe transmitir completamente este caudal. En la Figura 41 se presenta este balance en forma gráfica.

Regreso a la Pampa Aluvial	Precipitación Anual (mm)	Recarga a Evaporación (% de precipitación)	Recarga a Evaporación (mm)	Área de Recarga a la Evaporación (km ²)	Recarga a Evaporación Total (litros)
Recarga desde ríos adyacentes	165	2	3.30	700	231.0
Recarga desde la Superficie del Acuífero Aluvial	165	5	8.4	130	109.2
Evaporación	165	4	6.6	100	66.0
Regreso Total a la Pampa Aluvial (litros)					306.2

Tabla 44.- Recarga estimada en el acuífero pampa aluvial

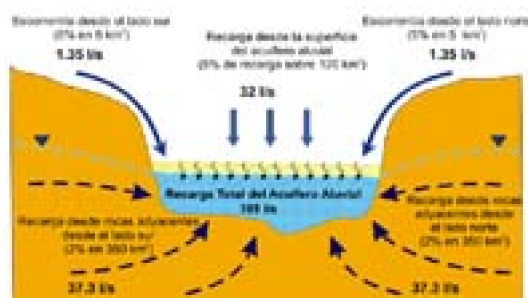


Figura 41.- Balance hídrico conceptual en el acuífero aluvial

10. POSIBILIDAD DE RECURSOS HÍDRICOS

Se requerirá una fuente de suministro de agua segura durante las etapas iniciales de la mina, la cual no se drenará hasta que profundice más de 50 m. Por lo tanto, es necesario explorar otras fuentes de agua. El suministro de agua podría provenir de fuentes de agua subterránea, agua superficial o una combinación de las dos. Existe una laguna de grandes dimensiones en la Estancia La Gruta (aproximadamente 10 km al este de la zona propuesta para la planta) que podría aportar un caudal de unos pocos litros por segundo. Si se pueden adquirir los derechos al agua de dicha laguna, la demanda de agua subterránea sería minimizada; sin embargo, todavía se requerirán fuentes de agua subterránea para un suministro constante de 50 l/s. El resto del agua podría provenir de los manantiales ubicados a 30 km al oeste, sin embargo, la tubería de conducción de dicha agua sería muy costosa. La opción más lógica para la exploración del agua subterránea es el acuífero de la pampa aluvial, en zonas cercanas al proyecto. Algunas de las condiciones geológicas y geográficas que favorecen el uso del agua subterránea desde este acuífero incluyen:

- Cercanía a la ubicación propuesta para la planta (aprox. 4 km)
- Reserva de gran volumen;
- Acuífero a poca profundidad;
- Probable alto rendimiento

- Probable alta recarga;
- Calidad de agua aceptable (baja mineralización); y
- Baja posibilidad de impacto debido a un bombeo intenso.

CONCLUSIONES

1) La topografía de la región es horizontal con colinas suaves y mesetas. Las elevaciones del sitio del proyecto normalmente varían desde 400 m.s.n.m. en el macizo volcánico hasta 290 m.s.n.m. en el borde macizo volcánico / pampa aluvial.

2) El clima del área del proyecto se describe como de tipo continental árido a seco. La temperatura anual varía entre los 20° a 30°C para los meses de verano de diciembre a marzo y -15° a 10°C durante los meses de invierno de junio a agosto.

3) La precipitación promedio anual es 168 mm. La evapotranspiración potencial según el método de Thornthwaite es de 649 mm y la evapotranspiración real según el método de Turc es de 168 mm. En ambos casos se tienen valores muy altos, los cuales exceden el 100% de las precipitaciones en la zona (168 mm), por lo que se estima que la infiltración no debe exceder el 2% de la precipitación anual en roca y el 5% de la precipitación anual en la superficie de la pampa aluvial.

4) Las vetas hidrotermales se encuentran en la Fm. Chon Aike. Estas vetas son altamente fracturadas y porosas, por lo que podrían producir altos flujos durante el drenaje de la mina. En base a las pruebas hidráulicas in-situ (GWI, 2004) y a la base de datos Enviro-Base Lite (Waterloo Hydrogeologic, 2003) se estima una permeabilidad en el rango de 10^{-7} m/s a 10^{-4} m/s.

5) Las rocas que contienen las vetas tienen bajas permeabilidades. En base a las pruebas hidráulicas in-situ (GWI, 2004) y a la base de datos Enviro-Base Lite (Waterloo Hydrogeologic, 2003) se estima una permeabilidad en el rango de 10^{-8} m/s a 10^{-6} m/s.

para la roca meteorizada que se ubica en los primeros metros desde la superficie (aproximadamente 20 m), mientras que para las rocas competentes a mayor profundidad se estima una permeabilidad de 10^{-14} m/s a 10^{-10} m/s.

6) Una vez que las vetas hayan drenado el agua almacenada en las mismas, el flujo hacia las labores mineras estará limitado por la baja permeabilidad de las paredes de la roca. El flujo de la mina debido a precipitación directa sobre los tajos será bajo debido a las bajas precipitaciones en la zona.

7) El potencial del acuífero de las Formaciones Bajo Pobre y Chon Aike es probablemente limitado, debido a las bajas permeabilidades que se estiman en estas formaciones, 10^{-14} m/s a 10^{-10} m/s. Este rango de permeabilidades ha sido estimado en base a las pruebas hidráulicas in-situ (GWI, 2004) y a la base de datos Enviro-Base Lite (Waterloo Hydrogeologic, 2003).

8) El suministro de agua podría provenir de fuentes de agua subterránea, agua superficial o una combinación de las dos. Existe una laguna de grandes dimensiones en la Estancia La Gruta (aproximadamente 10 km al este de la zona propuesta para la planta) que podría aportar un caudal de unos pocos litros por segundo. Si se pueden adquirir los derechos al agua de dicha laguna, la demanda de agua subterránea sería minimizada; sin embargo, todavía se requerirán fuentes de agua subterránea para un suministro constante de 50 l/s. El resto del agua podría provenir de los manantiales ubicados a 30 km al oeste, sin embargo, la tubería de conducción de dicha agua sería muy costosa. La opción más lógica para la exploración del agua subterránea es el acuífero de la pampa aluvial, en zonas cercanas al proyecto.

9) La Formación La Avenida parece ser un acuífero importante. Este acuífero tiene un ancho de 3 km y profundidades que varían de 40 a 120 m (QGA S.A., 2004). En base a las pruebas hidráulicas in-situ (GWI, 2004) y a la base de datos Enviro-Base Lite (Waterloo Hydrogeologic, 2003) se estima una permeabilidad en el rango de 10^{-6} m/s a 10^{-3} m/s.

10) Al realizar el balance hídrico del acuífero de la pampa aluvial, considerando un área de aporte en las rocas volcánicas de 700 km^2 , una superficie del depósito aluvial de 120 km^2 y una zona de escorrentía de 10 km^2 , se tiene que este acuífero estaría recibiendo un aporte total de 109 l/s.

11) Al realizar el balance hídrico del macizo volcánico, considerando un área de 28 km^2 , que es el área donde se encontrarán todas las instalaciones de la mina, se tiene que desde esta zona se tendrá un flujo total de 3 l/s.

12) El flujo regional de agua subterránea se mueve desde las zonas altas del norte hacia el suroeste y sureste. En general, el movimiento de agua subterránea es controlado topográficamente con un movimiento radial de agua subterránea hacia las cuencas desde las cumbres que las rodean.

13) El flujo local de agua subterránea se dirige hacia las vetas, para luego drenar principalmente por la zona de la veta María hacia el sureste, por lo que parece ser que la veta María es un conducto lineal con dirección sureste para el movimiento de agua subterránea. Es probable que las otras vetas principales en el área del proyecto también

sean conductos, pero puede ser que no se aprecia debido a la ausencia de datos en esas áreas.

14) En la zona se han caracterizado cuatro grupos de agua: el agua subterránea en la pampa aluvial (bicarbonatada sódica), el agua subterránea en el macizo volcánico (clorurada sódica y sulfatada sódica), el agua subterránea en las cuencas (sulfatada sódica) y el agua superficial en las cuencas - lagunas (clorurada sódica y sulfatada sódica).

15) Del análisis de calidad del agua subterránea en la zona se tiene que sólo el agua de los pozos T434, T436-II y WW1 es apta sólo para irrigación y sólo el agua del pozo T353 es apta sólo para bebida de ganado. Ninguna muestra resultó apta para consumo humano.

16) Las distancias de flujo desde los botaderos hacia la Pampa son entre 4 a 6 km con gradientes hidráulicas de aprox. 0.01 m/m. Asumiendo una conductividad hidráulica conservadoramente alta de 1×10^{-6} m/s, y una porosidad efectiva de 1%, la velocidad de flujo de agua subterránea en el macizo volcánico podría ser de aproximadamente 30 m/año. Como tal, el tiempo de viaje para alcanzar el acuífero La Avenida desde los botaderos podría ser del orden de 160 años. Sin embargo, una falla transmisiva que conecte los botaderos con la pampa aluvial podría incrementar la velocidad de flujo en por lo menos un orden de magnitud.

17) Las velocidades de flujo del agua subterránea en el acuífero de la pampa aluvial se estima en aprox. 125 m/año (asumiendo una conductividad hidráulica conservadoramente de 1×10^{-3} m/s, una porosidad promedio de 25%, y una gradiente hidráulica similar a la pendiente en la superficie (~ 0.001)). Según este estimado, podría tomar aprox. 1000 años para que el agua subterránea llegue al campo de pozos en San Julián, ubicado a aprox. 130 km.

RECOMENDACIONES

1) Como el acuífero de la pampa aluvial se perfila como el principal recurso de agua subterránea en la zona, se recomienda realizar un mínimo de cuatro perforaciones en este acuífero, donde dependiendo de los resultados se deben instalar por lo menos dos pozos de bombeo para realizar pruebas hidráulicas y otros dos pozos de monitoreo. Esta investigación nos permitirá caracterizar el acuífero con mayor detalle y determinar sus parámetros hidráulicos con mayor precisión. Estos pozos deben estar ubicados lo más cerca posible a la zona donde se ubicará la planta de la mina.

2) Debido a que en esta etapa de muestreo ninguna muestra resultó apta para el consumo humano, se deben seguir muestreando los pozos existentes en la pampa aluvial. También si se realizaran los dos pozos indicados en la recomendación anterior en la pampa aluvial, estos deben ser muestreados por lo menos una vez cada estación, con la finalidad de tener datos de línea base en el área de la mina y de verificar la presencia de contaminantes. En caso que la presencia de los contaminantes se confirme por un muestreo continuo el agua debe ser tratada antes de utilizarse para consumo humano.

3) Como en el macizo volcánico, en el área de la Veta María se realizará el tajo principal, se requiere realizar una evaluación hidrogeológica de más detalle en la Veta María, por lo que se recomienda realizar por lo menos 3 pozos que intercepten esta veta, donde dependiendo de los resultados se instalarán hasta dos pozos de bombeo y se utilizarán los pozos pre-existentes en la zona como pozos de monitoreo. La realización de pruebas de bombeo nos permitirá definir los parámetros hidráulicos de la Veta María con mayor precisión. Sería ideal ubicar estos pozos fuera del área del tajo y de las zonas

donde se depositarán los desmontes, de tal manera que se les pueda utilizar en un futuro como pozos de drenaje o de monitoreo del tajo.

4) Antes de realizar cualquier programa de exploración por agua, revisar la legislación argentina existente sobre la exploración y explotación de pozos de agua subterránea. Esta legislación se adjunta en el Anexo 5. La cotización para el programa propuesto en la pampa aluvial y la zona del tajo principal se presenta en el Anexo 6.

BIBLIOGRAFÍA

- A.C. Waltham, PhD. (1999). "Foundations of Engineering Geology". Blackie Academic & Professional.
- Arthur Holmes – Doris L. Holmes (1987). "Geología Física". Tercera Edición. Ediciones Omega, S.A., Barcelona - España.
- ASTM (2000), Annual Book of American Society for Testing Materials Standards: "ASTM D5447 - Standard Guide for Application of a Ground-Water Flow Model to a Specific Problem".
- Barrick Exploraciones Argentina S.A. (1996): "Geología y Evaluación de Recursos, Distrito Manantial Espejo, Santa Cruz, Argentina", Vol. I al V.
- Consejo Federal de Inversiones Servicios Públicos Sociedad del Estado (1989): "Provisión de Agua a San Julián – Provincia de Santa Cruz, San Julián, Argentina".
- Custodio E.; Llamas R. (2001): "Hidrología Subterránea" 2da ed.; Vol. I y II, Ed. Omega S.A., Barcelona, España.
- C.W. Fetter (1988): "Applied Hydrogeology". Second Edition. Merrill Publishing Company.
- D.G.A. Whitten – J.R.V. Brooks (1980). "Diccionario de Geología". Alianza Editorial, S.A., Madrid – España.
- Easdon, Michael (1998): "Due Diligence Study on the Triton Mining Corporation Manantial Espejo Gold-Silver Project, Santa Cruz Province, Argentina".

- Elfadil A. Azrag, Ph.D., P.E. (2003): "Ground-Water Modeling - Training for Geotechnical Personnel at Chuquicamata Mine". Hydrologic Consultants, Inc. of Colorado. Santiago-Chile.
- ERA-Maptec (1997): "An Integrated Structural Study for Gold Exploration in the Manantial Espejo Project, Santa Cruz Province, Argentina".
- FCIHS (2004): "Curso Internacional de Hidrología Subterránea". Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España.
- F.G.H. Blyth – M.H. de Freitas (1998). "Geología para Ingenieros". Quinta Reimpresión. Compañía Editorial Continental, S.A. México.
- Herbert F. Wang, Mary P. Anderson (1982): "Introduction to Groundwater Modeling". W.H. Freeman and Company, New York - USA.
- John D. Hem (1992): "Study and Interpretation of the Chemical Characteristics of Natural Water". Third Edition. United States Geological Survey.
- Jorge Dávila Burga (1999): "Diccionario Geológico". Tercera Edición. INGEMMET. Lima – Perú.
- Kilborn-SNC-Lavalin (1997): "Manantial Espejo Project, Pre-Feasibility Study. Santa Cruz Province, Argentina".
- Klohn Crippen (2001). "Site Investigation Manual".
- Konkin, K.J. (1999): "Manantial Espejo Project, Rock and Soil Geochemical Program. Santa Cruz Province, Argentina".
- Konkin, K.J. (1998): "Manantial Espejo Project, Diamond Drill Hole and Regional Reconnaissance Mapping and Rock Sampling Program. Santa Cruz Province, Argentina".
- Landrum, D. and Sanders G. (1997): "Manantial Espejo Project, Phase I Geologic Evaluation and Gold-Silver Resource Estimation of the Maria Vein Gold-Silver Deposit; Five Volumes. Santa Cruz Province, Argentina".
- Martin N. Sara (1994): "Standard Handbook for Solid and Hazardous Waste Facility Assessments". Lewis Publishers, USA.
- Bermuda Meléndez (1981): "Colección Geología y Petróleo - Tomo I - Geodinámica Externa". Paraninfo. Madrid – España.
- Patrick A. Domenico, Franklin W. Schwartz (1990): "Physical and Chemical Hydrogeology". John Wiley and Sons, USA.
- QGA S.A (2004). "Pole-Dipole Induced Polarization Surveys at Manantial Espejo Project. Santa Cruz Province, Argentina".
- Rick Brassington (1998): "Field Hydrogeology". Second Edition. Wiley.
- Sanders, G. and Landrum, D. (1998): "Manantial Espejo Project, Phase II Geologic Evaluation and Gold-Silver Estimation, Maria Deposit, Union-Karina Deposit, Concepcion Deposit; Three Volumes. Santa Cruz Province, Argentina".
- SEGEMAR (1998): "Hoja Geológica 4969-I Gobernador Gregores"; Programa Nacional de Cartas Geológicas de la República Argentina; Escala 1/250,000.
- Waterloo Hydrogeologic Inc. (2003): "Database Enviro-Base Lite". Waterloo, Ontario, Canada.

- William D. Thornbury (1960). "Principios de Geomorfología". Editorial Kapelusz. Buenos Aires – Argentina.
- William J. Deutsch (1997): "Groundwater Geochemistry". Lewis Publishers, USA.
- W. Kenneth Hamblin, James D. Howard (1995). "Exercises in Physical Geology". Ninth Edition. Prentice Hall, Inc., USA.

ANEXOS

CONSULTAR EN EL FORMATO IMPRESO