

Memo: Revisión del contexto hidrogeológico del Túnel Marcelo

Para:	Marcelo Cabral	Fecha:	30/06/15
Empresa:	BEASA	De:	J.M. Sitjá y Balbastro; C. de los Hoyos; A. Sfriso
Con Copia:	Elizabeth Vizcaíno	Nº Doc:	BEASA12210-2211-C- RP-0003-A
Asunto:	Revisión de contexto hidrogeológico del Túnel Marcelo		

1 Introducción

Este documento resume y revisa la hidrogeología del Túnel Marcelo, del proyecto binacional Pascua-Lama, para la evaluación, diseño y ejecución de un tapón de hormigón como cierre temporal del túnel.

El proyecto binacional Pascua-Lama abarca la zona fronteriza entre Chile (Pascua) y Argentina (Lama), cuyas instalaciones están a altitudes aproximadas entre 3800 y 5200 msnm. En Chile, el proyecto está ubicado en la Provincia de Huasco (Región de Atacama), mientras que en Argentina se ubica al noroeste de la Provincia de San Juan, a 363 km de la ciudad capital.

BEASA es la propietaria del Proyecto Binacional Pascua-Lama y desde el año 2011 construye el Túnel Marcelo, de unos 4 km de longitud, que tiene como objetivo conectar los portales chileno (Pascua) y argentino (Lama) para permitir la instalación de una cinta transportadora y movilizar el mineral desde el chancador primario hasta la planta de procesos.

El método de excavación utilizado corresponde al de perforación-tronadura tanto desde el portal de Pascua como desde el portal Lama. Los primeros 1.200 m (ubicando el inicio en el Portal Lama), se ubica dentro de un acuífero secundario alojado en las estructuras del macizo rocoso. El agua que ingresa al túnel es naturalmente ácida y de tipo sulfatada cálcica.

1.1 Objetivos

El objetivo de este informe es recopilar la información generada y disponible relacionada con la hidrogeología del Túnel Marcelo, ya sea producida por SRK Consulting o por otras consultoras y contratistas que actuaron durante su planificación, diseño y construcción.

1.2 Alcance

Esta es una recopilación de gabinete. La precisión y veracidad de parte de la información que se recopila a continuación está ligada a los autores de los informes originales que están enunciados en cada sección y que no siempre corresponden a SRK Consulting.

2 Resumen de la geología local

2.1 Calidad de roca

De acuerdo con el plano 069-2074-G-001 y el mapeo *as-built* llevado a cabo por Golder Associates S.A. (Golder) (2011-2013) el portal del Túnel Marcelo está formado por ferricretas, las cuales están representadas por brechas sedimentarias compactas de color pardo oscuro, clasto a matriz soportadas, con abundante cemento de óxidos de hierro. Luego, el túnel atraviesa un tramo de aproximadamente 250m formado por granitos y granodioritas de color gris claro, seguido por un tramo de unos 50m de dioritas. En los siguientes 1000 m de túnel predominan ampliamente los granitos y granodioritas, con dioritas muy compactas aproximadamente a los 700m excavados (denominación PK 0+700m) y en PK 1+000m (1000m excavados). Aproximadamente entre PK 1+250m y 1+500m, el túnel atraviesa un tramo de tobas dacíticas silicificadas, siguiendo luego con granitos-granodioritas hasta PK 1+650m.

En el tramo descrito, el Túnel Marcelo atraviesa al menos seis fallas importantes identificadas en superficie, de rumbo NS a NO-SE, alto ángulo e inclinación hacia el este. En base a la interpretación de imágenes satelitales, topografía de superficie y mapeo litológico/estructural en superficie, Golder interpreta una estructura de tipo Graben para el área del túnel Marcelo (Figura 2-1), basados en (1) la secuencia de tobas y tobas brechosas dacíticas de la zona cumbre de la frontera se repite al este a una altitud notablemente menor (dentro de la elipse en la Figura 2-1) y (2) la mayor parte de las fallas identificadas en superficie e interior del túnel consisten en grupos de fracturas abiertas y sin relleno. La presencia de fallas normales “abiertas” explicaría en parte la conductividad hidráulica relativamente alta (unos 2 órdenes de magnitud mayores a las rocas sin falla) del macizo rocoso en las zonas de falla.

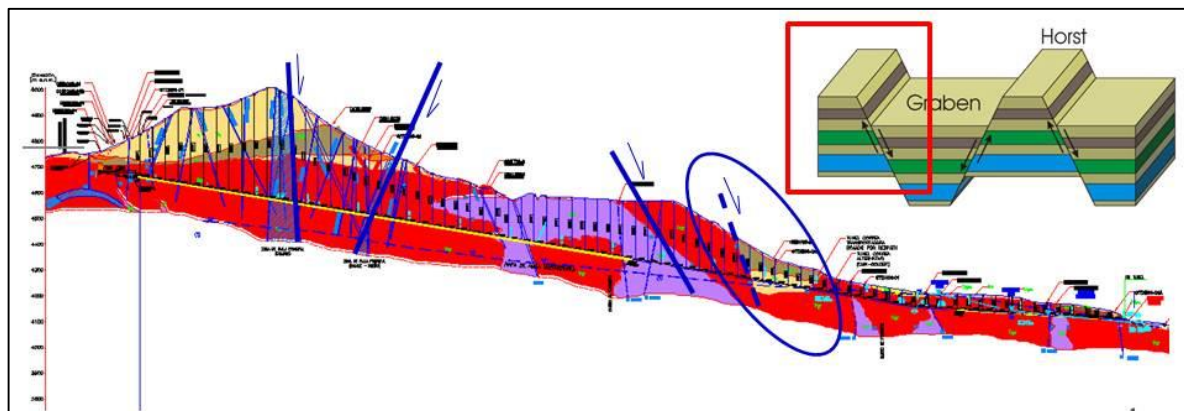


Figura 2-1. Perfil geológico esquemático de la situación estructural interpretada por Golder.

Las zonas de falla interceptadas presentan una alta densidad de discontinuidades de dos tipos:

- Con relleno de granulometría arcillosa; y
- Fracturas abiertas, sin relleno.

En el interior del túnel, entre 2011 y 2013, Golder mapeó alrededor de 60 zonas de falla en la zona saturada del túnel, con espesores de 3.5m a 4.0m y con fracturas abiertas. Dichas zonas de falla constituyen sectores muy fracturados, con al menos cinco familias de discontinuidades y espaciado pequeño (menos de 30cm).

El Túnel Marcelo tiene calidades predominantes de roca mala a muy mala en los primeros ochocientos metros, y de calidad media a partir de PK0+800m. La peor competencia mecánica del macizo cercano al portal Lama puede estar relacionada con la delgada cobertura del túnel, que varía entre 40m y 80m de un macizo rocoso alterado hidrotermalmente, meteorizado y fracturado.

De acuerdo con Golder Associates, la calidad geotécnica se clasifica como sigue:

- Roca tipo A ($Q \geq 0.7$): Roca de moderado a buen RQD, moderada a baja frecuencia de fracturas con rellenos menores a moderados, blandos a duros, argílicos a argílico-arenosos con superficies planas suaves a rugosas, en general ubicadas lejos de estructuras tectónicas.
- Roca tipo B ($0.2 \leq Q < 0.7$): Roca de moderado a buen RQD, moderada frecuencia de fractura, rellenos moderados, blandos a duros, probablemente de fragmentos molidos de roca, arcillas, con superficies planas.
- Roca tipo B- ($0.02 \leq Q < 0.2$): Roca de moderado a bajo RQD, ocurrencia de varias familias de fracturas, formación de bloques de tamaño pequeño a moderado, rellenos moderados a intensos en general de material fino como arcillas blandas.
- Roca tipo C ($Q < 0.02$): Zona del portal, muy meteorizada, o zonas al interior del túnel muy fracturadas, o zonas de estructuras. Bajo RQD, rellenos importantes de arcillas, con fracturamientos un tanto abiertos, bajo autosoprote, importantes infiltraciones.

2.2 Mineralización

El Túnel Marcelo está ubicado en el contexto geológico del yacimiento Pascua-Lama, un sistema epitermal de alta sulfuración. Dicho yacimiento está alojado principalmente en rocas graníticas triásicas, donde la mineralización de oro (Au), plata (Ag) y cobre (Cu) ocurre en numerosas brechas de origen freatomagmático y redes de fracturas relacionadas. La mineralización es de edad miocena y está caracterizada por la asociación alunita ($KAl_3(SO_4)_2(OH)_6$ – pirita (FeS_2) – enargita (Cu_3AsS_4) con presencia de metales preciosos como Au y Ag, donde la pirita impregna distintos tipos de roca a nivel regional, incluidas las rocas que están sobre la traza del túnel. Como es típico

para los sistemas epitermales de alta sulfuración, el sistema Pascua-Lama tuvo su origen a partir de fluidos hidrotermales ácidos con alta concentración de ácido sulfhídrico (H₂S), el cual además de disolver y transportar metales preciosos causó la mineralización con pirita en un área amplia.

3 Hidrología e hidrogeología general

3.1 Hidrología general

La zona está caracterizada por la presencia de una serie de arroyos y ríos permanentes (aunque de caudales muy variables de acuerdo a la época del año) como el Arroyo Turbio, Canito, Las Taguas, entre otros, y decenas de cursos de agua temporarios o intermitentes. En el contexto del Túnel Marcelo, el arroyo principal es el Turbio y sus tributarios.

3.2 Hidrogeología general

En cuanto al ámbito subterráneo, se distinguen dos grandes áreas en el contexto del túnel, más ampliamente, en la quebrada y valle del Arroyo Turbio. La zona superior está caracterizada por la presencia de un acuífero secundario, donde el agua se aloja dentro de las discontinuidades del macizo rocoso. En la zona media y baja, topográficamente más cercana a la zona del portal del túnel, existe también un acuífero primario alojado en los sedimentos aluviales del arroyo y sobre los cuales además, se construyen la mayor parte de los edificios y estructuras del proyecto.

La zona de recarga más importante del acuífero primero es la parte más alta de la cordillera principal, la que actúa como límite entre la Argentina y Chile. Allí, debido a las nevadas, sobre todo de los meses de invierno, y los glaciares y glaciaretos que se ubican en su parte más superior se recarga este acuífero de fisuras. Su zona de descarga, es el acuífero primario aluvial del valle del Arroyo Turbio y algunos manantiales en quebradas de la cabecera del valle.

El acuífero primario aluvial se recarga gracias a los arroyos que descienden por las quebradas más empinadas e infiltran en la zona aluvial, más permeable (en general) que la zona alta rocosa. Además, hay un volumen de agua que ingresa (aunque más lentamente) desde el acuífero secundarios que lo rodea. La zona de descarga más típica de este acuífero son las vegas que se pueden hallar a lo largo del valle aluvial del Arroyo Turbio.

3.3 Hidrología superficial local

Dentro del macizo rocoso se aloja agua líquida localizada en las fracturas abiertas de roca de muy baja permeabilidad primaria. El volumen de fracturas abiertas es muy pequeño comparado al volumen total del macizo, casi siempre inferior al 0,1 %. El agua alojada en este volumen de almacenamiento fluye de forma subterránea lentamente hacia las quebradas, alimentando los escasos cursos permanentes, y hacia el centro de los valles donde parte de su caudal se transfiere directamente a los sedimentos intermontanos.

Las zonas de falla y lineamientos estructurales en superficie controlan fuertemente la orientación de los cursos de agua por encima del túnel. Esto implica que los arroyos escurren por encima de zonas de alta permeabilidad y alta capacidad de infiltración y, por lo tanto, controlan la recarga del agua subterránea que se infiltra al túnel. Como puede observarse en la Figura 3-1, las principales recargas al macizo rocoso del túnel parecen provenir del Arroyo Turbio y de un arroyo con sentido de escurrimiento noroeste-sudeste, ambos tramos con cotas más elevadas que las cotas del túnel.

La superficie del terreno por encima del túnel entre PK 0+000m hasta PK 0+750m es relativamente llana (pendiente de ~5 %). En este primer tramo, el túnel acompaña la inclinación del terreno. En la PK 0+750m existe un quiebre y luego, hasta PK 1+100m, se observa una ladera de pendiente constante del orden del 15 %. El túnel sigue la inclinación del terreno. A partir del PK 1+100m la pendiente del terreno aumenta notablemente, mientras que la del túnel cambia a 16.8 %, pasando de una tapada de menos de 60 m a una pila de roca de más de 250m hacia la PK 1+800m. El túnel, a partir del PK 1+100m, se separa del lateral del valle y se inserta en el corazón del macizo rocoso.

El túnel corre subparalelamente al norte del Arroyo Turbio desde el PK 0+000m hasta el PK 1+100m. Como la diferencia de cotas entre el túnel y el arroyo no es muy significativa, el arroyo es una fuente de infiltración secundaria para el túnel. En el PK0+750m el túnel pasa por debajo de un arroyo semipermanente tributario del Turbio proveniente del norte. Debido a su orientación, este arroyo produce recarga efectiva sobre la zona del túnel y es probablemente responsable por el aumento de la infiltración en el túnel alrededor del PK0+660m y PK0+780m.

Aguas arriba del arroyo PK 0+750m existe un valle de con orientación NO – SE ocupado por arroyos de curso transitorio que también contribuyen a la recarga del área ubicada al norte del túnel entre el PK 0+750m y PK 1+100m, aunque en menor medida que el arroyo semipermanente. Por la

época del año y dado que el encuentro entre los dos frentes ocurrirá antes de la próxima ablación de nieve, este segundo valle tampoco será una fuente de recarga significativa para el túnel en construcción.

Aguas arriba el nivel freático reduce su tasa de aumento porque no hay fuentes permanentes de recarga efectiva. Puede especularse que el cambio en la pendiente superficial del terreno se debe a un cambio en el espesor de la cubierta sedimentaria, que hace que las aguas superficiales tengan menos infiltración aguas arriba de PK 0+770m, corran por superficie y alimenten el arroyo. Es seguro que este arroyo recarga de acuífero, por lo que se puede asumir el nivel freático está de alguna manera relacionado con la infiltración desde el arroyo desde PK 1+100m hacia aguas abajo, y es más significativo desde PK 0+770m hacia aguas abajo, donde debe esperarse que el nivel freático sea más permanente que hacia aguas arriba.

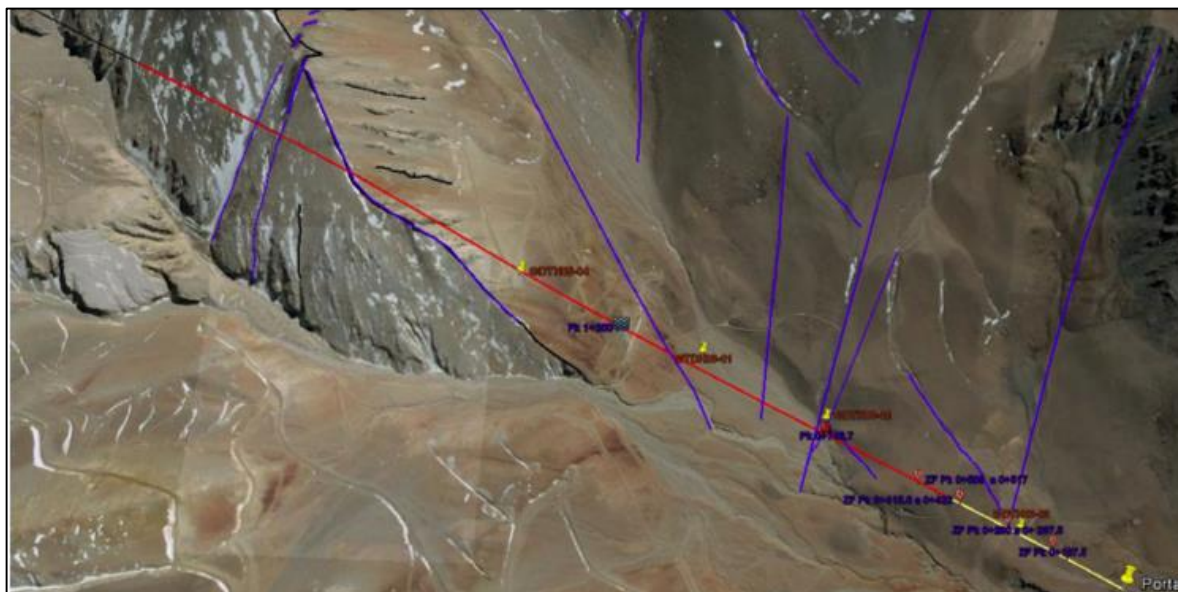


Figura 3-1. Túnel Marcelo y su contexto hidrológico superficial alrededor de la PK 1+200m.

3.4 Efectos de la meteorología sobre la hidrogeología local

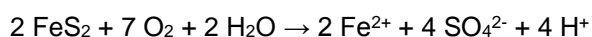
Las mediciones del nivel freático de los años 2007 y 2012 fueron realizadas en años relativamente secos. La medición de enero/febrero de 2007 fue llevada a cabo luego del año 2006, durante el cual precipitó un promedio acumulado de 126cm de nieve (Estación Campamento Pascua), lo cual es mas bajo que otros años. La medición de enero/febrero de 2012 se realizó luego del año relativamente seco 2011, durante el cual precipitó un promedio acumulado de 153cm de nieve (Estación Campamento Pascua). Debe notarse entonces que ambas mediciones representan una situación favorable de nivel freático bajo.

De acuerdo con la información meteorológica de las estaciones dentro del proyecto (bases de datos del área de Medio Ambiente de BEASA), el periodo de mayor precipitación nival es mayo-junio, donde se produce el pico de precipitaciones, con algunos eventos en abril y agosto. Se estima que a partir de septiembre/octubre comienza la etapa de deshielo, la cual se prolonga hasta enero/febrero y produce un ascenso del nivel freático en los acuíferos.

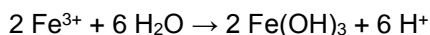
4 Hidroquímica

4.1 Hidroquímica general de la zona del proyecto

La presencia de piritita en las rocas por debajo de la zona saturada en el sector del túnel causa lo que se conoce como drenaje ácido de roca (ARD, acid rock drainage), que es una acidificación progresiva del agua debido a la oxidación de sulfuros, y explica en parte la composición sulfatada cálcica. Cuando la piritita (FeS_2) reacciona con agua meteórica, típicamente con alta concentración de oxígeno, este mineral se oxida y se liberan al agua iones hidrógeno (H^+) que aumentan la acidez, iones sulfato y Fe^{2+} , como se muestra en la siguiente ecuación:



Ya que el agua meteórica normalmente contiene suficiente oxígeno disuelto, gran parte del Fe^{2+} se oxida a Fe^{3+} , el cual reacciona con agua y precipita como $\text{Fe}(\text{OH})_3$, produciendo mayor acidez en el agua:



Cualquier reacción que ponga en solución iones H^+ producirá un pH más bajo (solución más ácida), ya que el pH es el logaritmo negativo de la concentración de iones H^+ . Como puede observarse en las ecuaciones, si el agua en el nivel freático contiene suficiente oxígeno disuelto y/o éste se renueva, el ciclo de acidificación se perpetúa y el agua se torna cada vez más ácida.

Además, la tasa de reacciones químicas de las ecuaciones mencionadas puede ser acelerada notablemente por la presencia de bacterias, como *Thiobacillus ferrooxidans*.

4.2 Hidroquímica del Arroyo Turbio y las aguas de infiltración del Túnel Marcelo

En cumplimiento con lo requerido por la Autoridad Minera en el art. 2, inc. 109 de la Resolución 064-MM-12, BEASA llevó a cabo un muestreo del agua de infiltración en el portal del túnel en el mes de agosto de 2012 cuyas muestras fueron enviadas de inmediato al Laboratorio CORPLAB S.A. para análisis físicoquímicos y químicos. Los análisis provistos por BEASA fueron proyectados por SRK en diagramas de clasificación y en diagramas de barras comparativos, con el objetivo de evaluar el estado del agua del túnel y tener un diagnóstico preliminar de la calidad de la misma. De este modo, el concepto de "calidad", siempre ligado a una línea de base particular, queda definido por la composición del agua respecto a una referencia o norma. En el presente informe se utiliza como referencia de calidad el Arroyo Turbio, que es el destino final de las aguas tratadas en el área del túnel. La calidad del agua del Arroyo Turbio fue definida en el Texto Ordenado del IIA de Pascua Lama (BEASA & Knight Piésold, Documento SA202-00027/3-4, Julio 2006), donde se comparó la hidroquímica de este curso con las Normas Argentinas de Calidad de Agua. En dicho estudio, se demostró que las aguas superficiales del Arroyo Turbio exceden las normas para pH, SDT, Al, As, B, Zn, Cu y Pb, entre otros componentes. Para el análisis de los datos, se ha tomado como referencia los valores de Línea Base del punto de monitoreo sobre el Arroyo Turbio LA-1A, actualizada al año 2012. Cabe destacar que la base de datos LA-1A ha sido monitoreada y actualizada desde el año 1999 y ha mostrado continuidad en la caracterización hidroquímica del Arroyo Turbio.

Para clasificar las muestras de agua del túnel en base a sus constituyentes mayoritarios, junto con la referencia de la composición del Arroyo Turbio, las composiciones se proyectaron en los diagramas de Piper y Stiff. El Diagrama de Piper consiste en un conjunto de triángulos equiláteros cuyos vértices representan el 100 % de un componente, y es muy útil para representar numerosas muestras en un solo gráfico. Tanto las proyecciones de las muestras del túnel como la del arroyo Turbio se caracterizan como aguas sulfatadas cálcicas (Figura 4-1).

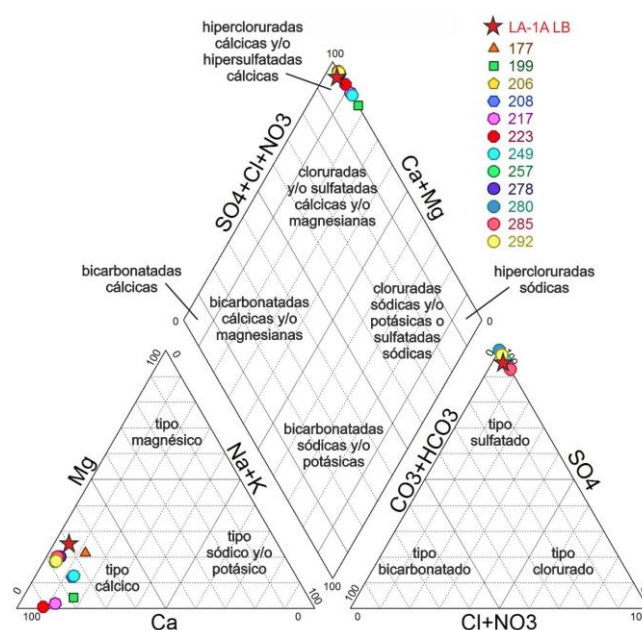


Figura 4-1. Diagrama de Piper para aguas analizadas como sulfatadas a hipersulfatadas cálcicas. La muestra LA-1A LB (actualizada a 2012) corresponde al A° Turbio.

El Diagrama de Stiff consiste en tomar segmentos proporcionales a la concentración de cada ion y unir los extremos formando un polígono, dando como resultado una figura que permite visualizar fácilmente las proporciones en las concentraciones de los constituyentes mayoritarios. A pesar de observarse grandes variaciones en las proporciones, todas las muestras (Túnel + Arroyo Turbio) se clasifican como sulfatadas cálcicas (Figura 4-2).

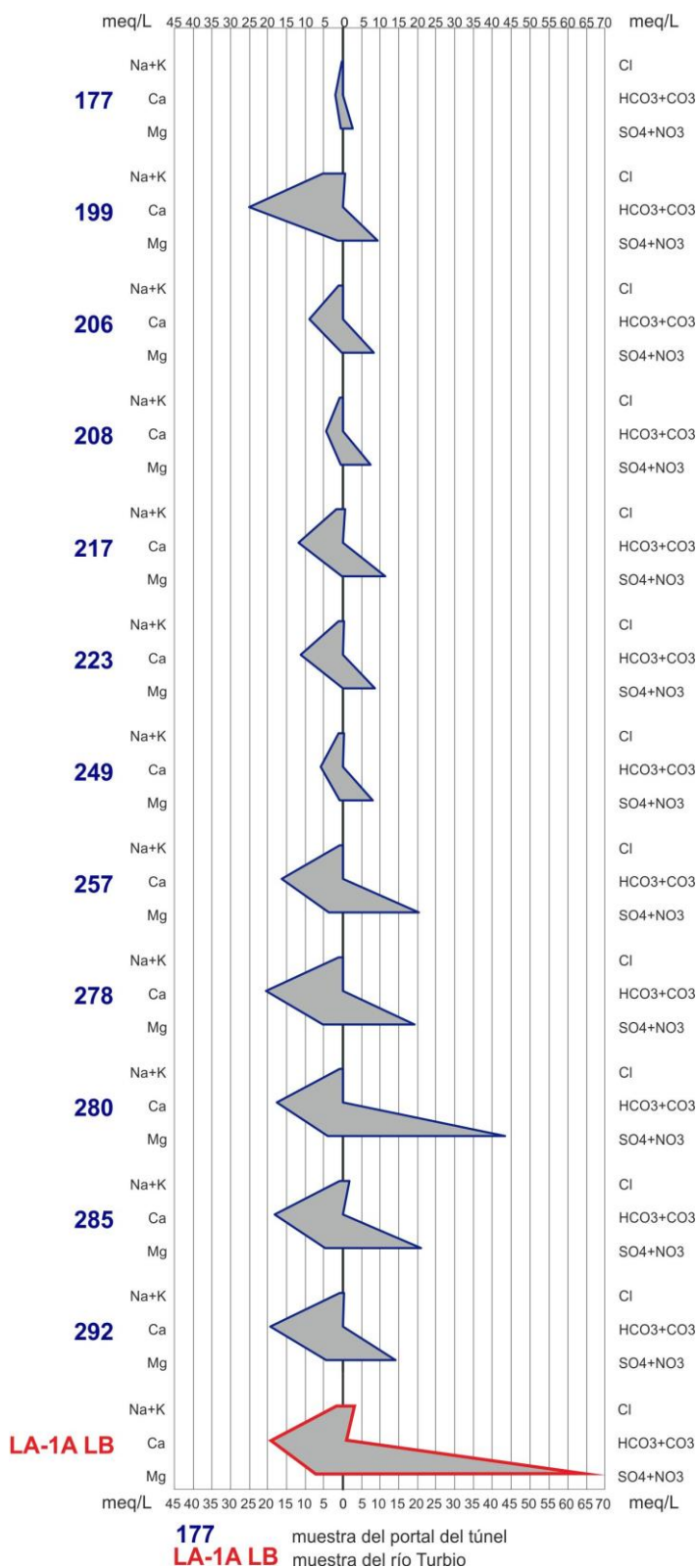


Figura 4-2. Diagramas de Stiff de las muestras del túnel y la muestra del arroyo Turbio. A pesar de las diferentes proporciones de constituyentes mayoritarios, se visualiza fácilmente que todas las aguas proyectadas con sulfatadas cálcicas.

5 Hidrogeología del Túnel Marcelo

5.1 Infiltraciones y nivel freático en el interior del túnel

Las zonas de falla y lineamientos estructurales en superficie controlan fuertemente la orientación de los cursos de agua por encima del túnel. Esto implica que los arroyos escurren por encima de zonas de alta conductividad hidráulica y alta velocidad de infiltración y, por lo tanto, controlan la recarga del agua subterránea que se infiltra al túnel. Como puede observarse en la Figura 5-1, las principales recargas al acuífero provienen del arroyo Turbio y de un arroyo con sentido de escurrimiento noroeste-sudeste, ambos tramos con cotas más elevadas que las cotas del túnel, siendo el arroyo Turbio la fuente más importante de recarga subterránea.

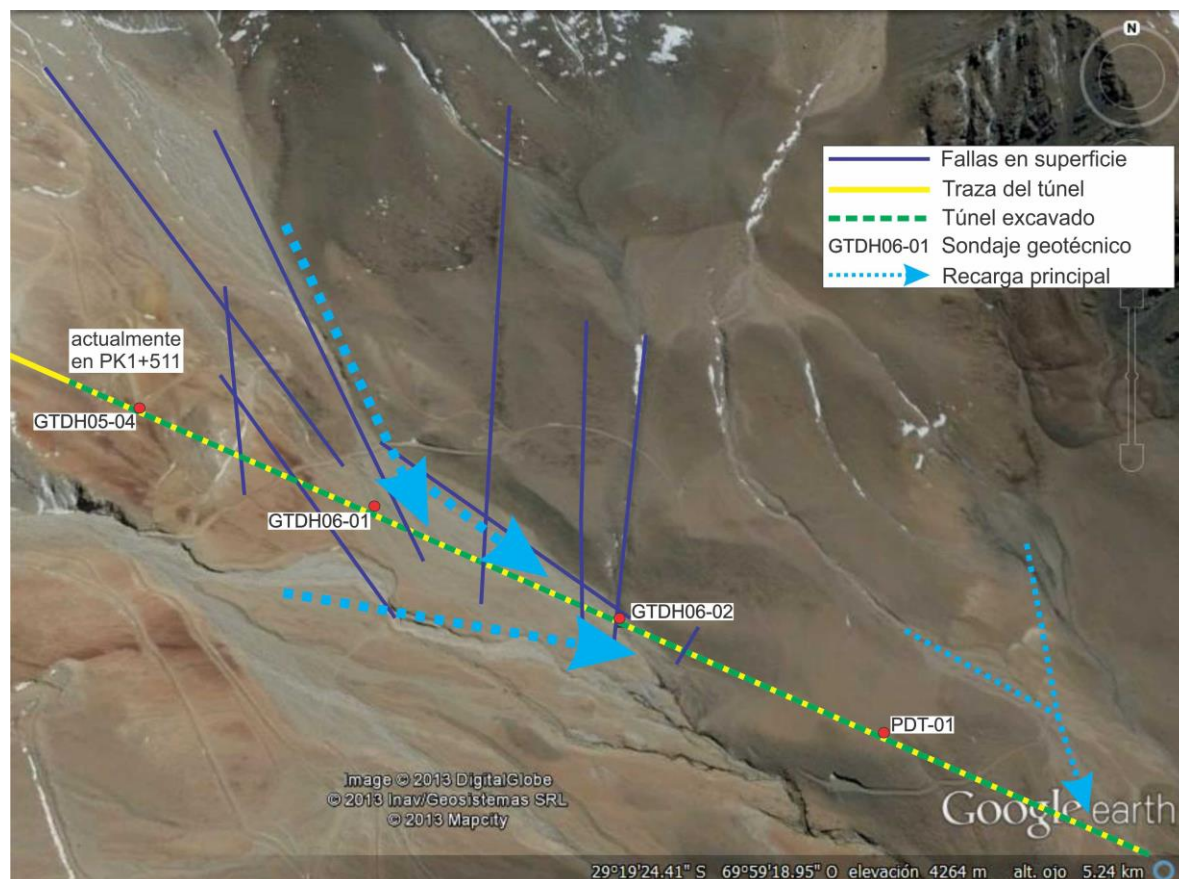


Figura 5-1. Geología de superficie del área de la traza del túnel, con indicación de fallas geológicas y sentido de las principales recargas al acuífero del macizo rocoso.

El arroyo Turbio tiene un largo recorrido NNO – SSE, con un caudal máximo registrado por BEASA Medio Ambiente de 300 l/s y nulo en invierno. El arroyo NO – SE colecta agua de numerosos cursos menores en el área cumbre del cordón montañoso. Se ha observado que este curso transporta un caudal superficial de aproximadamente 10 l/s que se infiltra totalmente en la zona proximal del cono aluvial, es decir justo por encima del túnel.

En la zona de confluencia de ambos cursos se ensancha la llanura de inundación del arroyo Turbio y se forma un cono aluvial de desembocadura del arroyo noroeste-sudeste, dando lugar a una amplia área con sedimentos superficiales altamente permeables y caudales subterráneos relativamente elevados. Esta importante confluencia de caudales de recarga afecta fuertemente la zona pendiente abajo de la proyección en profundidad del pozo GTDH06-02 y sería la responsable especialmente de los altos caudales de infiltración entre el PK 0+780m y el PK 0+670m y zonas de alta infiltración ladera abajo.

Hacia finales del año 2013, el túnel se hallaba por debajo del nivel freático entre PK 1+200m y PK 0+410m, totalizando aproximadamente 790 m de túnel "saturado" (Figura 5-2). En base a estimación visual de caudales de infiltración, dentro de dicho tramo saturado del túnel se diferenciaron zonas de infiltración alta, media y baja.

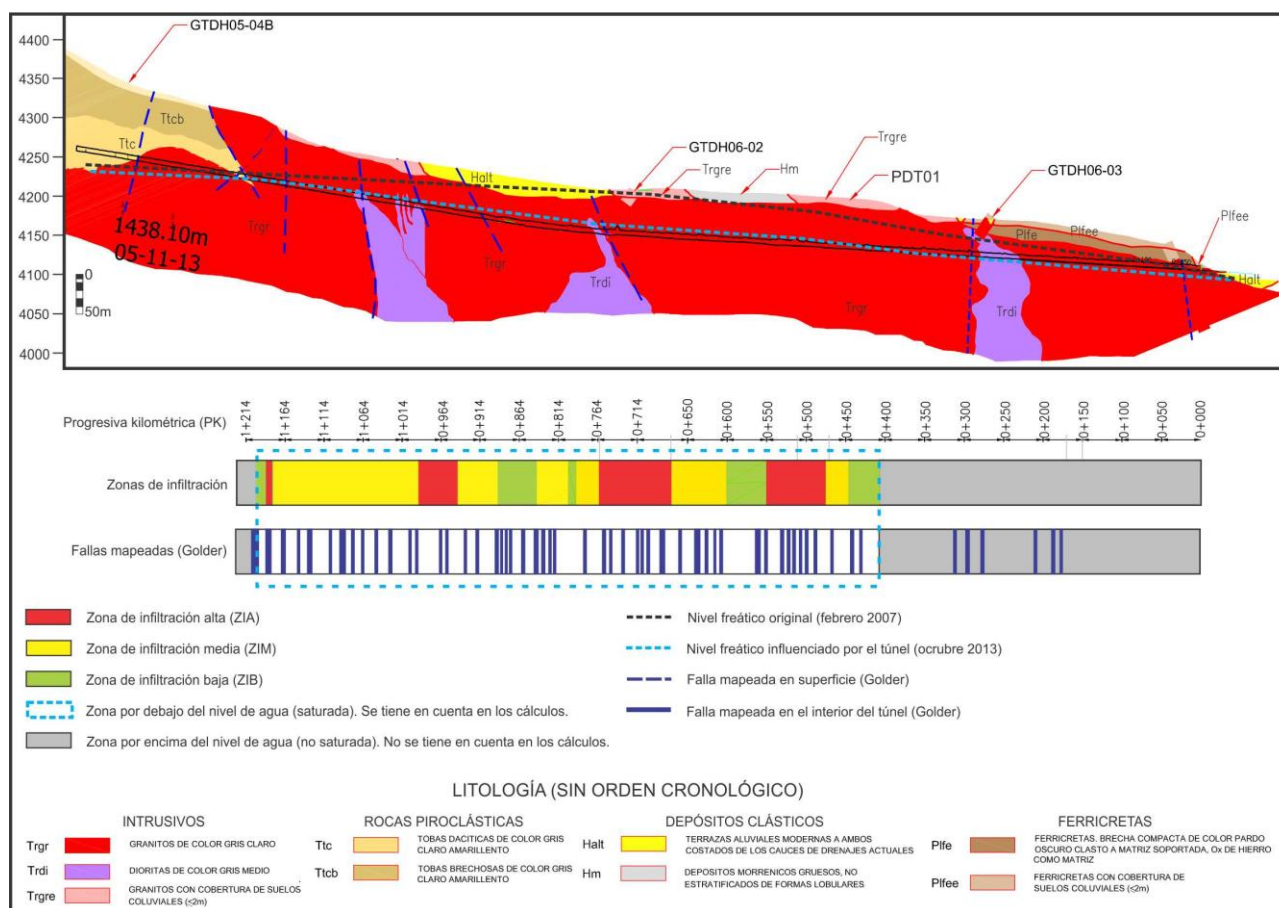


Figura 5-2. Perfil geológico simplificado (modificado de Golder 069-2074-G-IT-001) con indicación de zonas de infiltración y fallas mapeadas en el interior del túnel.

5.1.1 Zonas de infiltración alta

El largo total era de 210 metros. Goteo disperso en la bóveda y presencia de filtraciones en toda la altura de los hastiales. Goteo intenso y chorros ocasionales desde discontinuidades así como de pernos y barbacanas. Se estimó que a través del ancho total de estas zonas se infiltra el 70 % del caudal total de infiltración (aprox. 0.30 l/s/m).

- De PK 1+190 a PK 1+180
- De PK 0+990 a PK 0+950
- De PK 0+760 a PK 0+670
- De PK 0+550 a PK 0+480

5.1.2 Zonas de infiltración media

El largo total se estimó en 430 metros. Ingreso de agua desde la mayoría de los pernos de los hastiales puntos localizados en discontinuidades en forma de goteo. En las zonas con concreto se manifiesta en forma de humedad y goteo ocasional. Se estimó que a través de estas zonas ingresaba el 20 % del caudal total de infiltración (aprox. 0.05 l/s/m).

- De PK 1+180 a PK 0+990
- De PK 0+950 a PK 0+890
- De PK 0+790 a PK 0+760
- De PK 0+670 a PK 0+600
- De PK 0+480 a PK 0+450

5.1.3 Zonas de infiltración baja

El largo total era de 150 metros. Ingreso de agua generalmente en forma de humedad en discontinuidades y concreto, ocasionalmente goteo muy leve. Se estimó que a través de estas zonas ingresaba el 10 % restante del caudal total (aprox. 0.03 l/s/m).

- De PK 1+200 a PK 1+190
- De PK 0+890 a PK 0+850

- De PK 0+800 a PK 0+790
- De PK 0+600 a PK 0+550
- De PK 0+450 a PK 0+410

5.2 Caudales de egreso del túnel

Desde agosto de 2012 hasta enero de 2014, SRK ha llevado a cabo la medición periódica de los caudales de infiltración, los cuales se infiltran al túnel por zonas de alta permeabilidad, escurren a lo largo de cunetas en la solera, se almacenan en estocadas y se bombean parcialmente al portal Lama, donde son medidos en aforadores. Luego de enero de 2014, y hasta junio de 2014 se continuó con la medición de los caudales de egreso del túnel aunque ya no a cargo de SRK.

La Figura 5-3 muestra los caudales registrados desde agosto de 2012 hasta junio de 2015. En el gráfico se observa una tendencia general de aumento del caudal de infiltración desde 32 l/s en agosto de 2012 hasta valores en el orden de 120 l/s en junio/julio de 2013 – período de construcción bajo napa freática. Luego, la tendencia se revierte y los caudales medidos decrecen hasta valores del orden de los 35 l/s medidos en el último mes (junio 2015), valor muy similar a los medidos inicialmente.

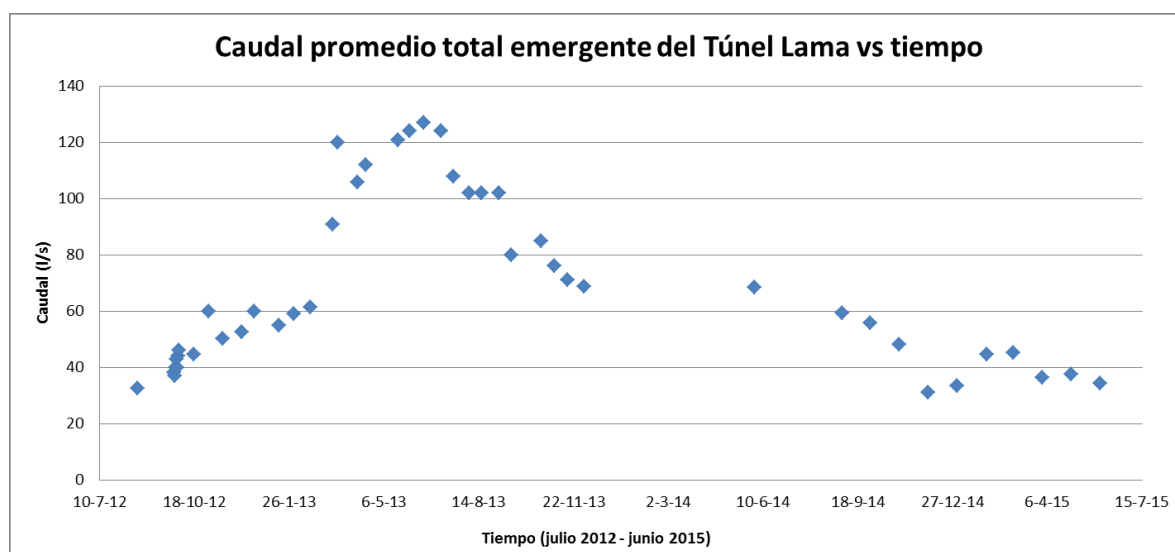


Figura 5-3. Evolución de caudales desde agosto de 2012 a junio de 2015 medidos por la estación de aforo en el portal del túnel.

Pueden apreciarse además picos de menor importancia dentro de ambas tendencias, los cuales corresponden a caudales de alumbramiento en momentos en que la excavación atravesó zonas de falla. El periodo de quiebre en la tendencia desde creciente a decreciente coincide con el momento en que la excavación del túnel estaba atravesando el nivel freático para pasar a excavar “en seco”, es decir que el macizo estaba descargando su almacenamiento al túnel mientras éste se excavaba por debajo del nivel saturado. Dado que desde julio/agosto de 2013 el túnel se está excavando por encima del nivel saturado, los niveles piezométricos se van estabilizando en su nivel mínimo y van disminuyendo los caudales de infiltración a sus valores residuales.

5.3 Evolución del nivel freático durante la ejecución del túnel

Los primeros registros piezométricos del área fueron reportados en mayo de 2007, evidenciando la presencia de un nivel saturado en las discontinuidades del macizo rocoso desde antes de la construcción del túnel. Desde los inicios de su ejecución, el túnel actuó como un dren, evacuando parcial y localmente el agua del macizo rocoso y registrando, por ende, un descenso del nivel saturado a lo largo de la traza de la excavación por concentración del flujo subterráneo. La situación de equilibrio hidrogeológico final se ve reflejada en un caudal residual estable considerablemente más bajo que el inicial, y una superficie freática acorde con los nuevos potenciales hidráulicos a lo largo de la traza del túnel. Una vez finalizada la obra y recuperado un régimen estacionario, el caudal de ingreso al sistema es nuevamente igual al caudal de egreso. La siguiente figura muestra la evolución del nivel freático entre 2007 (condiciones iniciales estacionarias) y 2013 (condición estacionaria final) para el área ubicada por encima del túnel.

Entre las primeras mediciones del nivel de agua subterránea, y evidencia de la existencia de un nivel saturado de agua en el macizo rocoso del túnel, se encuentran las realizadas por Golder y

reportadas en un informe del mes de mayo de 2007. Teniendo en cuenta que la construcción del túnel comenzó en marzo de 2011, estas mediciones son de gran importancia para caracterizar las condiciones del entorno previamente al túnel. Las mediciones realizadas en el año 2007 permitieron proyectar un nivel freático de agua en el macizo rocoso, por debajo del cual se encontrarían los primeros 1.200 m a 1.300 m de la traza del túnel. Los niveles de agua medidos en los pozos se resumen en la Tabla 5-1.

Tabla 5-1. Niveles de agua medidos en pozos en el año 2007 por Golder.

Sondaje	Altitud [msnm]	Profundidad [mdbp]	N.F.2007 [mdbp]	Altitud N.F. [msnm]
GTDH06-01	4.243,63	90	25,48	4.218,15
GTDH06-02	4.206,53	85	0,11	4.206,42
GTDH06-03	4.174,22	160	25,33	4.148,89
GTDH06-04A	4.140,73	120	42,99	4.097,74
GTDH05-04B	4.343,53	120,15	105,83	4.237,70

msnm: metros sobre el nivel del mar. mdbp: metros desde la boca del pozo. N.F.: nivel freático

En el momento en que se expusieron fallas geológicas importantes con la excavación del túnel, el caudal de ingreso fue al principio grande, lo cual se denomina “caudal de alumbramiento”. Luego, el caudal de ingreso al túnel (egreso del macizo) fue disminuyendo mientras se equilibraban los potenciales hidráulicos. Al, hasta que el egreso de agua del macizo se equilibró con el caudal de recarga y se estableció lo que se denomina “caudal residual”.

El avance de la construcción del túnel produjo un marcado “efecto dren” debido a la baja conductividad hidráulica y recarga limitada del acuífero rocoso. La consecuencia de este efecto fue un descenso local del nivel freático, esquematizado en la Figura 5-4. El ingreso de agua al túnel comenzaba aproximadamente en PK 1+190m y se intensificaba en las zonas de falla.

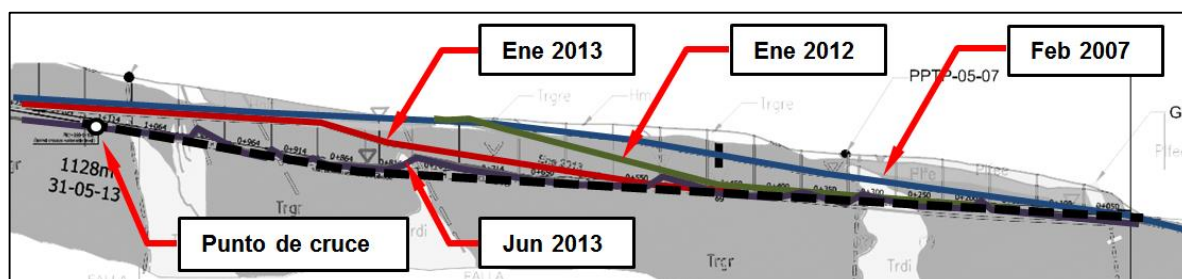


Figura 5-4. Evolución del nivel freático durante la excavación del túnel.

Las proyecciones del nivel freático por parte de Golder y SRK habían predicho el túnel pasaría a estar por encima de la superficie freática aproximadamente entre el PK 1+100m y PK 1+200m, lo cual se cumplió al observar las últimas infiltraciones en los hastiales y solera del túnel entre el PK 1+120m y PK 1+180m hacia fines del año 2013.

El caudal ingresante en las zonas de falla fue disminuyendo sensiblemente con la disminución de la carga hidráulica a través del tiempo, dicho en otras palabras, el caudal de alumbramiento se estableció con el tiempo en un caudal residual. Esto se debió, sobre todo, al drenado del acuífero y, estacionalmente, a la disminución del aporte superficial durante los meses de invierno.

La situación de equilibrio hidrogeológico final se ve reflejada en un caudal estable considerablemente más bajo que el inicial, y una superficie freática acorde con los nuevos potenciales hidráulicos a lo largo de la traza del túnel. Este caudal estable es el denominado “caudal residual”.

Una vez finalizada la obra y recuperado un régimen estacionario, el caudal de ingreso al sistema es nuevamente igual al caudal de egreso. La diferencia de altura en el nivel freático entre el momento anterior a la ejecución del túnel y la actual representa la pérdida de almacenamiento en el recurso hídrico que fue transferido hacia el Arroyo Turbio, y por su intermedio, al acuífero primario aluvial del valle principal del Arroyo Turbio y, aguas abajo, del Río Las Taguas.

5.4 Estimación de caudal residual

5.4.1 Determinación de la conductividad hidráulica

Los primeros esfuerzos por obtener valores de conductividad hidráulica del macizo rocoso fueron llevados a cabo por Golder (mayo de 2007), quienes supervisaron ensayos de tipo Lugeon (*packer tests*) en cuatro de los pozos por encima de la traza del túnel. Luego de experimentar inconvenientes operacionales, se obtuvieron valores de conductividad hidráulica solamente en algunos tramos de tres de los pozos. El valor máximo de conductividad hidráulica estuvo en el orden de E-06 m/s mientras que el mínimo en E-12 m/s.

SRK y Golder escogieron 14 puntos de medición de abertura de fracturas (mediante fisurómetro) y espaciado de las discontinuidades principales. Los puntos de medición correspondieron a zonas muy fracturadas, con varios sets de discontinuidades (hasta 5) y espaciamientos regulares, con muy poca diferencia entre los sets. Se tomó la precaución de escoger zonas bien compactas del macizo, es decir evitando bloques sueltos que tengan una abertura exagerada de las discontinuidades. No se consideró el relleno de fracturas en los cálculos debido a que éste es poco frecuente y se lava fácilmente con el flujo natural al poco tiempo de la excavación.

Se utilizó la solución analítica de Carlsson & Olsson, 1992 (modificada de Louis, 1974) y se calculó para cada punto de medición una conductividad hidráulica mínima y una conductividad hidráulica máxima. Para simplificar los cálculos, se obtuvo un valor promedio de conductividad hidráulica mínima de las zonas de falla de 1.10 E-05 m/s y un máximo promedio de 1.41 E-05 m/s.

Las conductividades hidráulicas para el resto del macizo fueron estimadas en el orden de 1.0 E-09 m/s y 1.0 E-10 m/s. No se efectuaron cálculos analíticos para los sectores fuera de las zonas de falla, sino que se asumió un 20% del caudal total para estas zonas, en base a estimación visual y mapeo de infiltraciones dentro del túnel.

5.4.2 Prueba de concepto entre soluciones analíticas y modelo 2D

Estas pruebas consistieron en llevar a cabo cálculos analíticos con las soluciones de Goodman et al (1965) y Lei (1999) y, paralelamente, realizar modelos numéricos con el objetivo de evaluar la compatibilidad entre soluciones. Para simplificar el problema, se utilizaron secciones 2D modeladas con el software FeFlow y se compararon los resultados con los de las soluciones analíticas. Debido a que constituyó solamente una prueba de concepto y sus resultados no constituyeron una estimación de caudal, se asumió una conductividad hidráulica de 1.0m/d y se asumió una altura piezométrica de 10 m para todo el túnel.

El caudal estimado por el método analítico de Goodman (Q_G) (Goodman *et al.*, 1995) fue de $Q_G = 30.2 \text{ m}^3/\text{d/m}$ y tiene en cuenta un flujo estacionario, flujo subterráneo radial hacia el túnel y la columna de agua fue mucho más grande que el radio del túnel.

La solución analítica de Lei (1999) fue la más adecuada considerada para túneles de radio grande comparado con la profundidad y la altura piezométrica, tal es el caso del túnel Marcelo. Esta solución asume flujo estacionario en un acuífero totalmente saturado, homogéneo, isótropo y semi-infinito, con un nivel de agua por encima de la superficie del terreno. Los parámetros asumidos para obtener el caudal por el método de Lei (Q_L) fueron los mismos que para la solución de Goodman, dando $Q_L = 30.4 \text{ m}^3/\text{d/m}$.

5.4.3 Modelo simplificado 2D

Se reprodujeron las mismas condiciones en una sección numérica 2D, utilizando el software FeFlow (Figura 5-5). El resultado obtenido ($29.3 \text{ m}^3/\text{d/m}$) tuvo una buena coincidencia con el de la solución analítica de Lei ($30.5 \text{ m}^3/\text{d/m}$), con un error de aproximadamente 3.9 %. Esta coincidencia es favorable dado que la solución de Lei es la que más se adapta conceptualmente al caso del Túnel Marcelo, y por lo tanto es la empleada en los análisis que siguen en este documento.

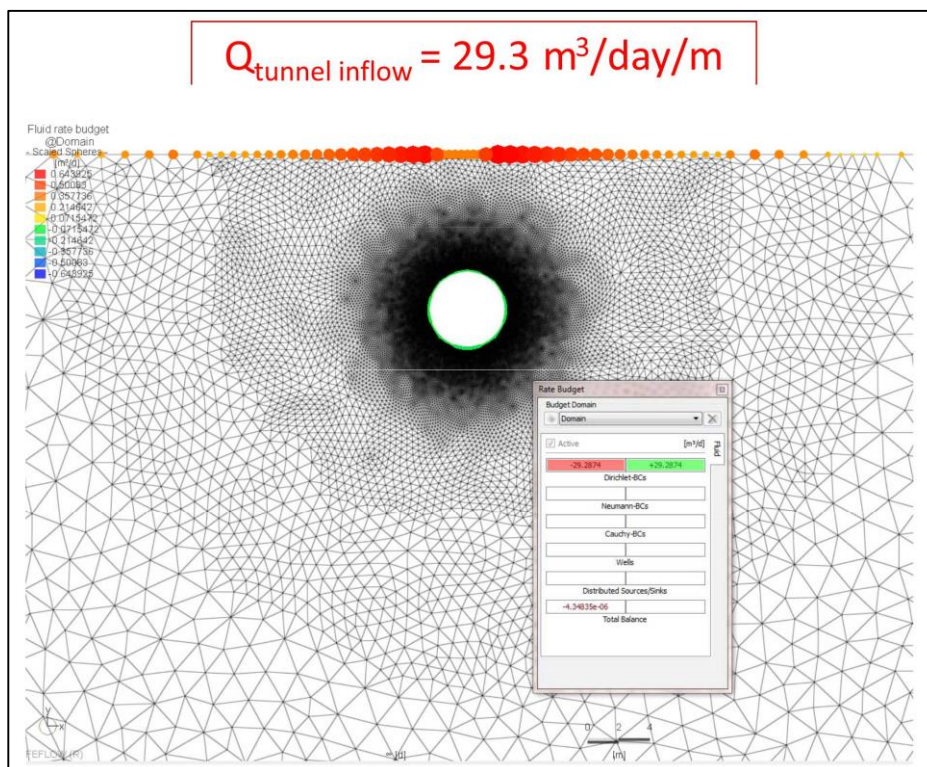


Figura 5-5. Resultados en estado estacionario: caudal específico de ingreso al túnel.

5.4.4 Escenarios conceptuales y estimaciones analíticas

Para las estimaciones analíticas se aplicó la fórmula de Lei (1999). En base a las conductividades hidráulicas estimadas anteriormente para las zonas de falla, se utilizó un valor promedio mínimo de $1.10 \text{ E-}05 \text{ m/s}$ (0.95 m/d) y un máximo promedio de $1.41 \text{ E-}05 \text{ m/s}$ (1.22 m/d). Las conductividades hidráulicas para el resto del macizo fueron asumidas en el orden de $1.0 \text{ E-}09 \text{ m/s}$ y $1.0 \text{ E-}10 \text{ m/s}$, en base a ensayos Lugeon. Se asumió un radio medio de 3.0 m y una altura piezométrica residual promedio de 2.0 m para todo el túnel saturado, en base a los niveles de agua en los sondajes.

En base a la geología e hidrogeología descriptas se plantearon los siguientes escenarios para las estimaciones de caudal:

Escenario 1: túnel dividido en zonas de infiltración. La zona de infiltración alta tiene un ancho total de 210 m . Se utilizaron en los cálculos las conductividades hidráulicas promedio mínima y máxima mencionadas y se asumió que por estas zonas infiltra el 70% del caudal total. La zona de infiltración media tiene 430 m de ancho total, no se realizaron cálculos analíticos para estas zonas aunque se asume que a través de ellas se infiltra el 20% del caudal total. Las zonas de infiltración baja tiene 140 m de ancho total, tampoco se realizaron cálculos analíticos aunque se asume que a través de estas zonas infiltra el 10% del caudal.

Escenario 2: agua infiltrada mayormente por zonas de falla. Las fallas mapeadas e inventariadas entre Golder y SRK suman un ancho total de 247 m y se usaron las mismas conductividades hidráulicas promedio mínima y máxima que para la zona de alta infiltración del Escenario 1. Se asumió que por las fallas se infiltra el 80% del caudal, mientras que el 20% lo hace a través de la roca sin fallas.

Los resultados de las estimaciones analíticas se resumen en la

Tabla 5-2.

5.4.5 Incertidumbre

La incertidumbre de la conductividad hidráulica de cada punto (26 valores) origina una incertidumbre de base a los cálculos. De acuerdo con los resultados de la cuarta y quinta columna de la

Tabla 5-2, se estimaron los siguientes márgenes de error.

Tabla 5-2. Estimaciones analíticas de caudales de infiltración.

Parámetros Túnel						
R (m)	H (m)	H/R	Ancho T fallas (m)	Ancho T ZIA (m)	Kmin (m/d)	Kmax (m/d)
3	5	1.67	247	210	0.95	1.22

Caudales Mínimos										
Qmin (m ³ /d/m)	Qmin (l/s/m)	QminT fallas (l/s)	QminT S/fallas (l/s)	QminT F S/G (l/s)	QminT F C/G (l/s)	QminT ZIA (l/s)	QminT ZIM (l/s)	QminT ZIB (l/s)	QminT ZI S/G (l/s)	Qmin ZI C/G (l/s)
27.15	0.31	77.62	19.41	97.03	72.77	66.00	18.86	4.62	89.47	67.10

Caudales Máximos										
Qmax (m ³ /d/m)	Qmax (l/s/m)	QmaxT fallas (l/s)	QmaxT S/fallas (l/s)	QmaxT F S/G (l/s)	QmaxT F C/G (l/s)	QmaxT ZIA (l/s)	QmaxT ZIM (l/s)	QmaxT ZIB (l/s)	QmaxT ZI S/G (l/s)	Qmax ZI C/G (l/s)
34.87	0.40	99.68	24.92	124.61	93.45	84.75	24.21	5.93	114.90	86.17

Referencias:

ZIA: zona de infiltración alta (70% del caudal total de infiltración)

ZIM: zona de infiltración media (20% del caudal total de infiltración)

ZIB: zona de infiltración baja (10% del caudal de infiltración)

S/G: túnel sin

shotcrete

C/G: túnel con *shotcrete* (50% del perímetro)

R: radio del túnel

H: altura piezométrica

ancho T fallas: ancho total sumando todos los anchos de las zonas de falla (inventario de Golder)

ancho T ZIA: ancho total sumando todos los tramos de ZIA.

Kmin: conductividad hidráulica mínima

Kmax: conductividad hidráulica máxima

Qmin/max: caudal específico mínimo/máximo, calculado en base a conductividad hidráulica mínima/máxima

Qmin/maxT fallas: caudal total mínimo/máximo para todo el ancho de las zonas de falla, se asume 80% del caudal total (Qmin x ancho T fallas)

Qmin/maxT S/fallas: caudal mínimo/máximo para rocas sin falla (se asume el 20% del caudal total)

Qmin/maxT F S/G: caudal mínimo/máximo en túnel sin *shotcrete*, en base al modelo de roca con falla - roca sin falla (Qmin/maxT fallas + Qmin/maxT S/fallas)

Qmin/maxT F C/G: ídem anterior para túnel con *shotcrete*, se asume un 25% menos de infiltración

Qmin/maxT ZIA: caudal mínimo/máximo para el ancho total de ZIA, se asume el 70% del caudal total (Qmin x ancho T ZIA)

Qmin/maxT ZIM: caudal mínimo/máximo para ZIM, se asume el 20% del caudal total

Qmin/maxT ZIB: caudal mínimo/máximo para ZIB, se asume el 10% del caudal total

Qmin/maxT ZI S/G: caudal mínimo/máximo en base al modelo de zonas de infiltración, para túnel sin *shotcrete* (Qmin/maxT ZIA + Qmin/max ZIM + Qmin/max ZIB)

Qmin/maxT ZI C/G: ídem anterior para túnel con *shotcrete*, se asume un 25% menos de infiltración

Conductividad hidráulica máxima

La conductividad hidráulica máxima se calculó en base a un coeficiente de rugosidad de 3.2, resultando en valores dispersos entre 1.03 E-07 m/s y 8.10 E-05 m/s. Como estimador estadístico se utilizó el coeficiente “t” de Student, dado que la cantidad de mediciones es menor de 30 ($n = 26$), y un intervalo de confianza del 90%. En resumen, se tomaron los siguientes parámetros para el cálculo del margen de error.

- Cantidad de mediciones (n): 26
- Conductividad hidráulica promedio (media aritmética): 1.41 E-05 m/s
- Intervalo de confianza: 90 %
- Coeficiente t: 1.7081 (para un nivel de significancia de 0.1 y $n-1 = 25$)
- Desviación estándar (s): 2.00 E-05
- Margen de error calculado¹: 0.67 E-05 m/s (47% de la media)

Por lo tanto, la conductividad hidráulica máxima junto a su incertidumbre queda:

$$k_{\max} = (1.41 \pm 0.67) \text{ E-05 m/s}$$

Conductividad hidráulica mínima

La conductividad hidráulica mínima se calculó en base a un coeficiente de rugosidad de 4.1, resultando en valores dispersos entre 8.03 E-08 m/s y 6.32 E-05 m/s. Se utilizó el coeficiente “t” de Student y un intervalo de confianza del 90%. Se tomaron los siguientes parámetros para el cálculo del margen de error.

- Cantidad de mediciones (n): 26
- Conductividad hidráulica promedio (media aritmética): 1.10 E-05 m/s
- Intervalo de confianza: 90%
- Coeficiente t: 1.7081 (para un nivel de significancia de 0.1 y $n-1 = 25$)
- Desviación estándar (s): 1.60 E-05
- Margen de error calculado: 0.54 E-05 m/s (49 % de la media)

Por lo tanto, el valor de la conductividad hidráulica máxima junto a su incertidumbre queda:

$$k_{\max} = (1.10 \pm 0.54) \text{ E-05 m/s}$$

Incetidumbre en los caudales estimados

Teniendo en cuenta los supuestos del cálculo, la única variable de la fórmula modificada de la solución de Lei (1999)² es la conductividad hidráulica k , ya que todos los demás términos de la ecuación se consideran constantes. Como el error absoluto del producto de una constante es simplemente el producto de dicha constante por el error absoluto de la variable, puede propagarse el error porcentual de la variable (k) a los resultados finales de las estimaciones analíticas. Los valores de caudales con la estimación de su incertidumbre mínima quedan como sigue:

- Caudal mínimo:
 - En base a zonas de infiltración: 89.47 ± 43.84 l/s
 - En base a zonas de falla: 97.03 ± 47.54 l/s
- Caudal máximo:
 - En base a zonas de infiltración: 114.90 ± 54.00 l/s
 - En base a zonas de falla: 124.61 ± 58.57 l/s

Los errores propagados desde los cálculos de conductividad hidráulica (47 – 49 %) generan amplios intervalos de incertidumbre en el orden de 60-100 l/s en las estimaciones analíticas de caudal. Estos amplios márgenes de error provienen principalmente de una alta desviación estándar en las conductividades hidráulicas respecto a la cantidad de mediciones. Por esta razón, las estimaciones analíticas de caudal no constituyen una base firme para diseños civiles de detalle, aunque sí constituyen valores orientativos de la máxima variación a la que pueden llegar los caudales de infiltración residual del túnel. En la siguiente sección se presentan los resultados de un modelado numérico 3D, el cual consta de un número considerablemente mayor de variables que las soluciones analíticas y por ende brinda una mayor confiabilidad en los resultados.

¹ Margen de error = $t(s/n^{1/2})$

² $Q = 2\pi KH / \ln\{H/r + [(H/r)^2 - 1]^{1/2}\}$

5.5 Modelo numérico 3D de flujo de agua subterránea

5.5.1 Diseño del modelo

Se construyó un modelo numérico de flujo tridimensional que recrea las condiciones hidrogeológicas basadas en el modelo conceptual y permite estimar flujos, analizar diferentes condiciones hidráulicas del sistema y realizar predicciones futuras para el dimensionamiento, cálculo y diseño de estructuras.

El modelo numérico ha sido calibrado en su condición estacionaria mediante los datos de niveles de agua subterránea medidos en 6 piezómetros en enero del año 2007. La condición transitoria ha sido calibrada con los datos de niveles medidos para el período Diciembre 2012 - Marzo 2013 y las mediciones quincenales de caudales realizadas desde Agosto de 2012.

Se ha utilizado el código de diferencias finitas Modflow, a través de la interfaz de usuario Visual Modflow (Versión 4.6.0). El modelo construido corresponde a una simplificación tridimensional del modelo conceptual definido previamente. Para la construcción, calibración y definición de escenarios predictivos se han considerado los siguientes supuestos:

- El dominio del modelo ha sido girado de modo tal que las filas de la grilla cuadrática resulten paralelas a la dirección de la traza del túnel.
- La topografía del área es el límite superior del modelo.
- Se ha incorporado la elevación del túnel en cada punto de su traza que ha sido proyectada en dirección perpendicular al túnel de modo de formar una superficie para el techo y base del túnel.

5.5.2 Hipótesis hidráulicas

Las zonas de infiltración diferenciadas en el túnel se incorporaron como unidades con diferentes parámetros hidráulicos. Estas zonas fueron proyectadas en la dirección perpendicular al túnel.

- Se ha asumido un acuífero isotrópico $k_h = k_v$.
- La recarga ocurre solo a través del río Turbio y sus afluentes principales. Para el modelo transitorio se asume que en el período de invierno todos los cursos se encuentran congelados y por lo tanto no representan recarga al acuífero.
- La excavación del túnel ha sido representada utilizando la condición de borde de tipo DRAIN. El avance de la excavación ha sido simplificado y discretizado a nivel mensual, de modo que se asume que el avance de cada mes ocurre de manera instantánea al inicio del mes correspondiente.
- La calibración en estado estacionario, previo a la construcción del túnel se realizó utilizando los niveles freáticos medidos por Golder en 2007.
- Para la calibración transitoria se han considerado los niveles medidos para el período diciembre 2012 marzo 2013 en 3 piezómetros aún habilitados. No existe información de niveles para el período intermedio.
- El modelo predictivo considera el período comprendido entre julio 2012 y diciembre 2033.
- Para el período de predicción se replicaron las condiciones calibradas, con recarga desde los cursos superficiales sólo para el período estival.
- Se han simulado 3 escenarios predictivos que consideran lo siguiente:
 - Escenario 0: Caso Base: Implica solo la proyección en el tiempo de las condiciones actuales de operación
 - Escenario 1: Incluye el efecto del *shotcrete* aplicado en la mitad superior del túnel
 - Escenario 2: Agrega el efecto de un año de precipitaciones más abundante, considerando una recarga adicional para el período estival del año 2022.

La Figura 5-6 (A y B) muestra la distribución de zonas de conductividad como vista en planta y en perfil longitudinal al túnel y los valores de permeabilidad calibrados.

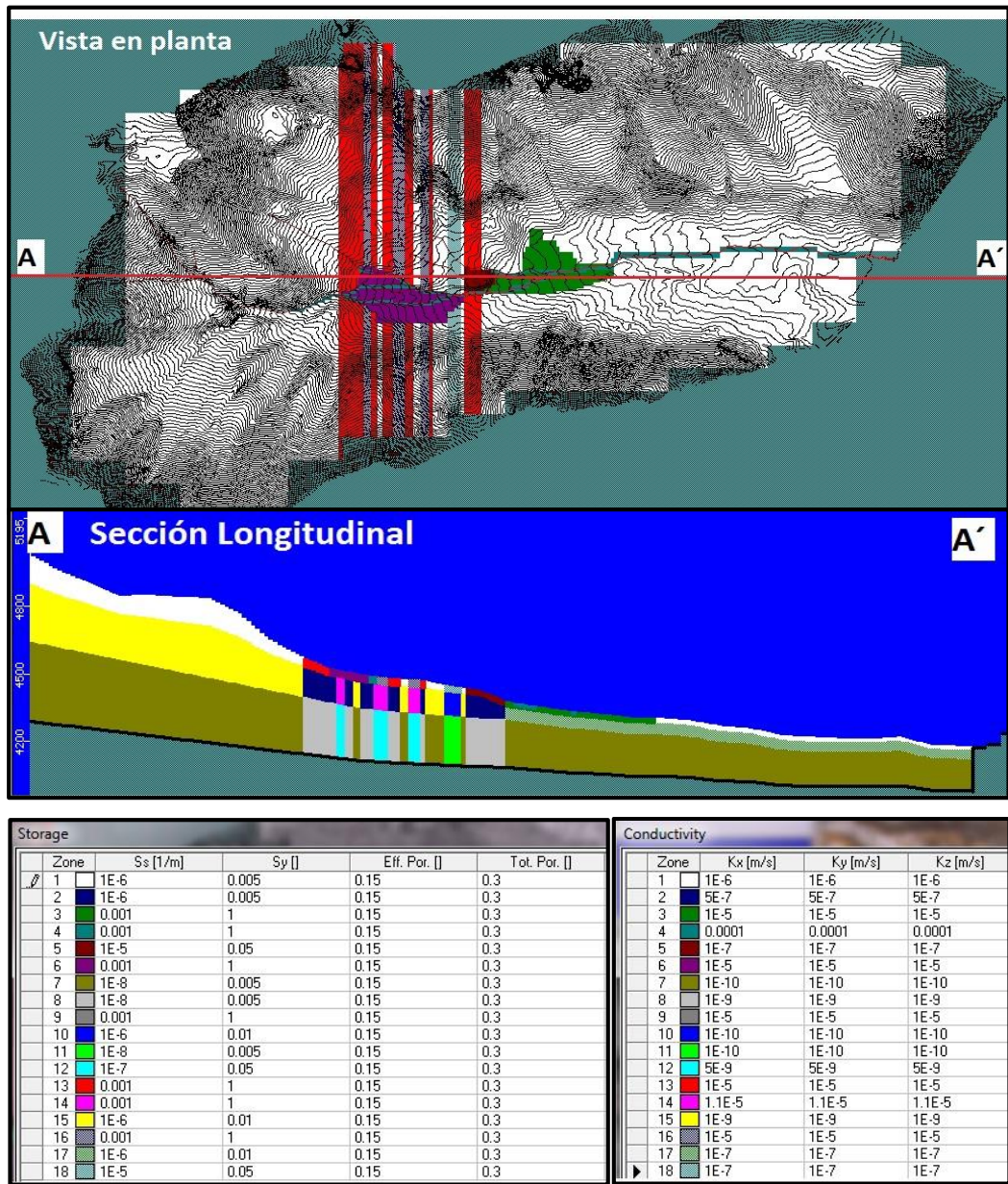


Figura 5-6. Distribución de zonas de conductividad en planta y perfil. Las zonas 3, 4, 5 y 6 corresponden a zonas de relleno sedimentario.

5.5.3 Calibración estacionaria

El resultado de la calibración estacionaria se muestra en la Figura 5-7. Se puede apreciar que se ha representado en forma adecuada el gradiente hidráulico para el período de calibración. Se obtuvo un error cuadrático medio (RMSE, su sigla en inglés) de 5.0 m y un error cuadrático medio normalizado (NMRS, su sigla en inglés) de 4.1%, lo que es considerado un buen ajuste.

El balance de aguas representa la interacción río acuífero para el período estival con valores de aporte desde el río al acuífero de 55 l/s, y desde el acuífero al río de 55 l/s. Se ha obtenido un error del balance de 1.07% también considerado un buen ajuste.

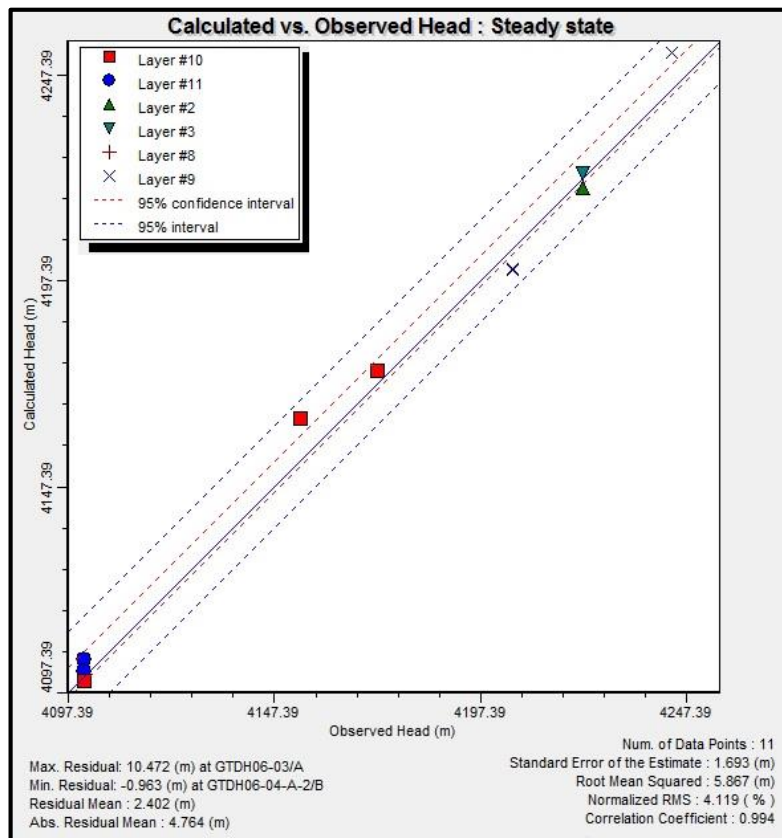


Figura 5-7. Niveles simulados versus medidos para calibración estacionaria.

5.5.4 Calibración transitoria

Los niveles calibrados en estado transitorio se pueden apreciar en la Figura 5-8.

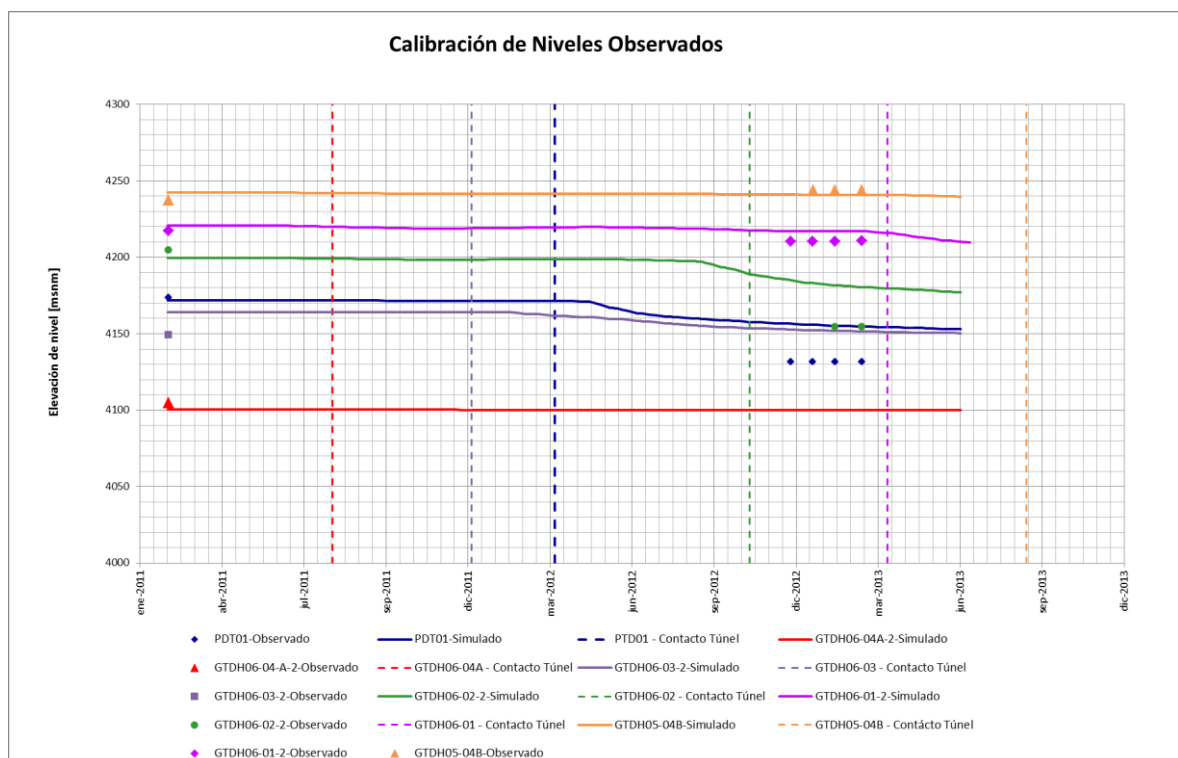


Figura 5-8. Niveles simulados versus medidos para calibración transiente.

En esta figura se ha incorporado, para cada piezómetro, el tiempo en que el túnel alcanza su coordenada "X" de modo de tener una referencia del avance de la excavación del túnel y el comportamiento de los pozos.

Se puede apreciar que las pocas medidas de niveles han sido bien representadas. Si bien el ajuste no es exacto para los descensos ocurridos luego de diciembre de 2012, se puede apreciar que las tendencias de descensos han sido representadas. Se desconoce la magnitud del efecto que pudiera tener sobre los niveles la potencial recarga al acuífero durante el período de deshielo. Esto deberá ser estudiado durante el tiempo mediante la observación de los niveles piezométricos y los caudales medidos.

El flujo simulado para el túnel versus el caudal medido en el mismo se muestra en la Figura 5-9. Se puede observar que en la curva del flujo simulado para el túnel se superponen dos efectos. Primero el efecto de aumento de caudal en la medida que va avanzando el túnel hasta alcanzar un valor máximo a principio de mayo 2013 y luego comenzar a descender nuevamente. Segundo, se superpone el efecto de vaciado instantáneo de volumen dado que las celdas tipo dren comienzan y asumen tramos de excavación instantánea. Este último efecto se ve representado en el gráfico de la figura por máximos de corta duración.

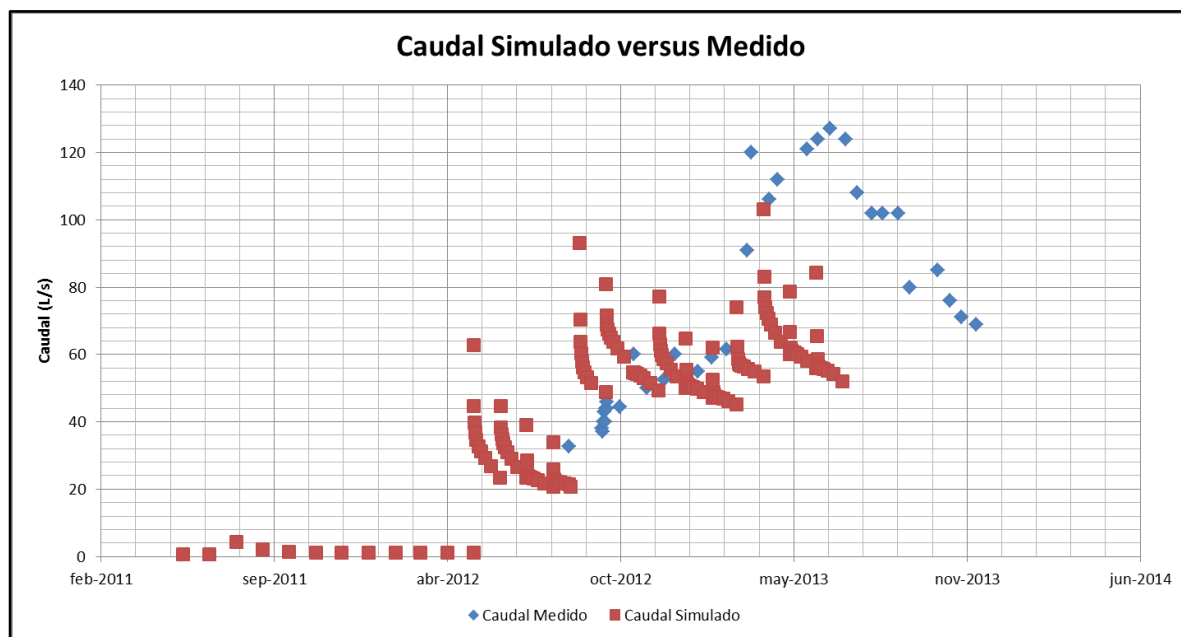


Figura 5-9. Flujo en túnel simulado versus medido para calibración transiente.

5.5.5 Escenario predictivo, caso base

En el gráfico de la Figura 5-10 se muestra el caudal de base simulado para las infiltraciones en el túnel y su evolución en el tiempo. Se puede apreciar en la gráfica la relación del caudal que infiltra hacia el túnel versus la variación en el almacenamiento y versus la variación o impacto sobre los ríos.

El caudal de infiltración al túnel simulado para el período junio 2013 - diciembre 2033 muestra el efecto directo de la estacionalidad de la recarga. Así durante el período invernal muestra un caudal base mínimo de 22 l/s, proveniente desde el almacenamiento, para alcanzar del orden de 41 l/s en época de deshielo. Esto representa un aumento del orden de un 90% del caudal para el período de mayor recarga.

5.5.6 Efecto de año húmedo, con mayor recarga

En el gráfico de la Figura 5-11 se muestra el caudal de base simulado para las infiltraciones en el túnel y su evolución en el tiempo considerando un año húmedo excepcional, aumentando la recarga para el período estival del año 2022. La precipitación en el área ocurre predominantemente en forma de nieve considerando un promedio de nieve acumulada anual de 270 cm, para el período de análisis se considera el año 2022 como evento Niño, con una precipitación anual de 546 cm.

Se puede apreciar en la gráfica la relación del caudal que infiltra hacia el túnel versus la variación en el almacenamiento y versus la variación o impacto sobre los ríos, y el efecto directo que tiene sobre éstos el aumento de la recarga en un año húmedo excepcional.

El flujo simulado para el túnel en el escenario Caso Base versus el caudal simulado considerando el efecto de un año de precipitaciones más abundante se muestra en la Figura 5-12.

Al comparar el caudal de infiltración al túnel durante el período estival del año 2022, considerándolo como año normal y como año húmedo, se observa una diferencia de alrededor de 43 % en el caudal ingresante. Es decir, que se espera un caudal máximo de infiltración al túnel de 29 l/s para un año considerado normal, mientras que para el mismo año, pero considerado excepcionalmente húmedo se espera un ingreso de 41 l/s.

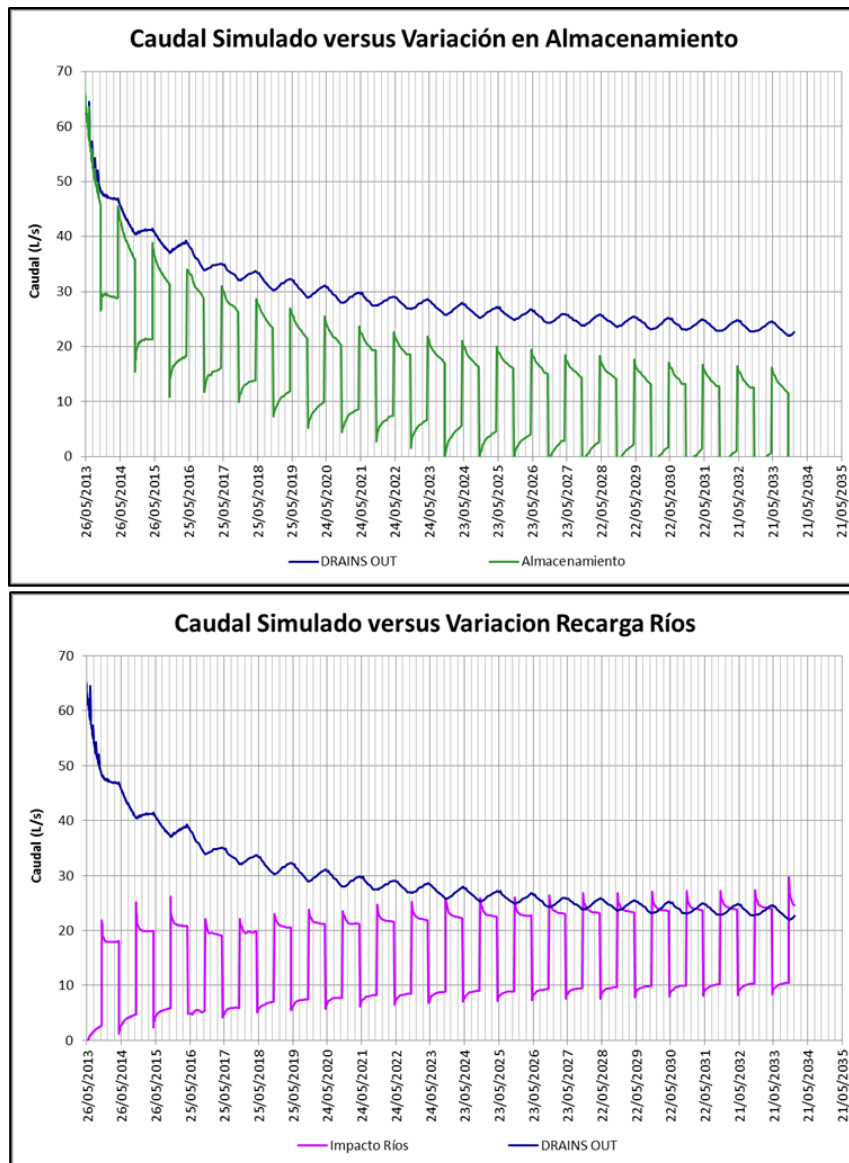


Figura 5-10. Caudal de base simulado para Túnel Marcelo.

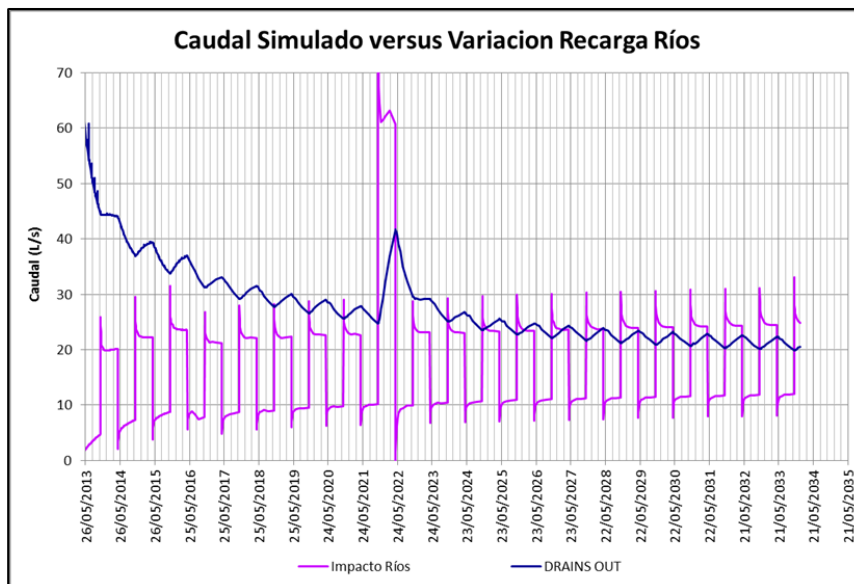
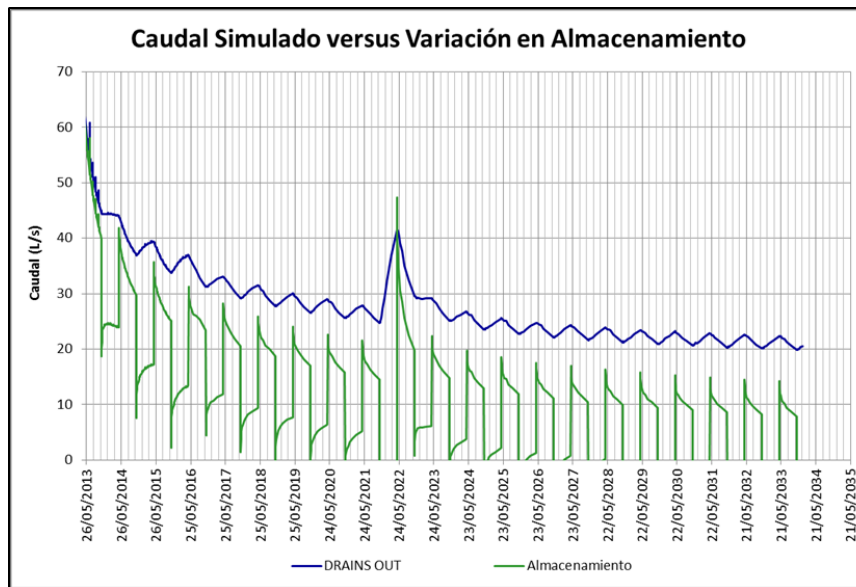


Figura 5-11. Caudal de base simulado para Túnel Marcelo, considerando una recarga adicional para el período estival 2022.

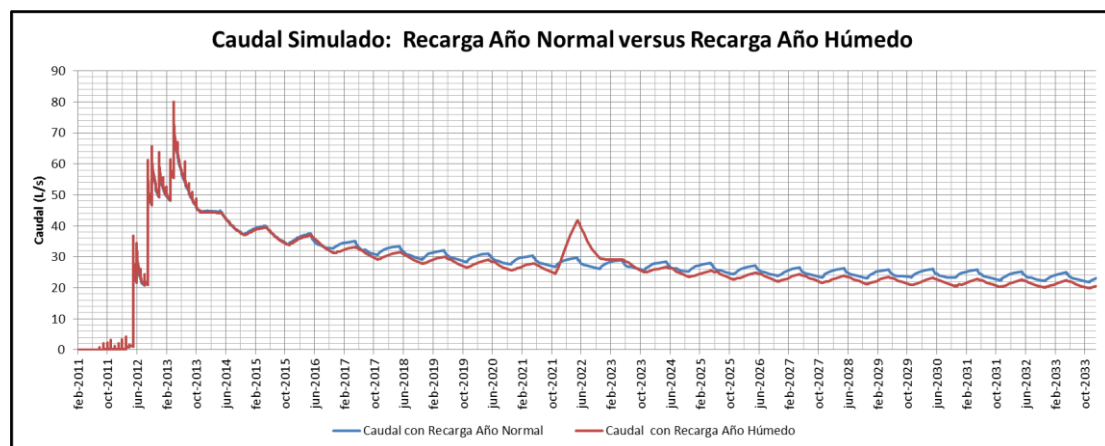


Figura 5-12. Flujo en túnel simulado considerando año normal versus flujo considerando año húmedo.

6 Sobre el ambiente glacial y periglacial

Este capítulo resume un trabajo realizado en forma conjunta entre BGC Engineering Ltda. (BGC), a cargo de lo referido al ambiente glacial y periglacial, y SRK desarrollando la relacionado con la hidrogeología (SRK 51-2040-18-02: Evaluación del ambiente hidrogeocriológico en relación al Túnel Marcelo. Abril 2015).

Partes de la cuenca del Río Turbio Superior son subyacidas por permafrost de profundidad variable, y cuentan con la presencia de varios tipos de crioformas tanto glaciales como periglaciales (glaciares, glaciares de escombros y *protalus ramparts*).

6.1 Distribución del permafrost

Se realizó un análisis probabilístico de la distribución espacial del permafrost en combinación con los registros de temperatura de suelos, sugiriendo que es muy poco probable que exista permafrost por debajo de los 4.300 msnm. A mayor altitud, mayor espesor de permafrost y menor grosor de la capa activa. Basado en la información de temperaturas de suelo recolectada, se ha esbozado la distribución espacial de permafrost en función de la profundidad, a lo largo del eje del túnel. A mayores elevaciones, el permafrost es más profundo y con mayores probabilidades de ocurrencia espacial. Sin embargo, a menores altitudes, la probabilidad de encontrar permafrost disminuye, y solo se encuentran islas individuales locales de permafrost ya que la mayoría del terreno no está cubierto de permafrost. El túnel está ubicado a una profundidad por debajo de la base del permafrost y por lo tanto no hay una interacción directa entre el túnel y el permafrost o el ambiente periglacial.

6.2 Proximidad a glaciares y glaciares de escombros

En la región de Lama, los principales glaciares descubiertos son Los Amarillos y Guanaco. La distancia horizontal más corta entre el Glaciar Los Amarillos y el túnel es aproximadamente 1.8 km, mientras que la distancia entre el Glaciar Guanaco y el túnel es aproximadamente 2.8 km. Las distancias horizontales más cortas entre estas crioformas periglaciales mapeadas en el área y el túnel se presentan en la Tabla 6-1.

Tabla 6-1. Distancia de crioformas al túnel (BCG).

Crioforma	Distancia	Crioforma	Distancia
RG_T2 ⁽²⁾	180 m	RG_T14 ⁽²⁾	990 m
RG_T3 ⁽¹⁾	410 m	RG_T1 ⁽¹⁾	1.160 m
RG_T9 ⁽²⁾	460 m	RG_T13 ⁽²⁾	1.190 m
RG_T10 ⁽²⁾	485 m	RG_T11 ⁽²⁾	1.360 m
RG_T4 ⁽¹⁾	490 m	RG_T12 ⁽²⁾	1.390 m

Nota: Información topográfica basada en ASTER GDEM v2 data. 1) Glaciar de escombros; 2) Protalus rampart.

6.3 Efectos geotérmicos del túnel en el permafrost

Se desarrolló un modelo numérico geotérmico, con el objeto de evaluar el efecto térmico de la presencia del túnel en el macizo rocoso. El túnel fue simulado a una distancia de 100 m por debajo de la base del permafrost, con un grosor de permafrost de 60 m. A la profundidad del eje del túnel, se estima que las temperaturas de la roca están entre +1 y +3 °C. Se modelaron tres escenarios que consideran temperaturas constantes dentro del túnel de +4, +7 y +10 °C. Para el primer caso (+4°C), luego de 25 años, la base del permafrost no tuvo cambio alguno. En el segundo caso (+7°C), la base del permafrost cambió en un 1 %, mientras que para el tercer caso (+10 °C), lo hizo en 1,7 %. Las temperaturas del aire promedio dentro del túnel son aún más frías que las consideradas en los tres escenarios modelados, es decir, que las temperaturas medidas en la roca son menores a la temperatura del aire dentro del túnel, por lo que la temperatura del permafrost no sufriría cambios inducidos por la presencia del túnel.

6.4 Efectos hidrológicos de los glaciares y glaciares de escombros sobre el túnel

La escorrentía proveniente de los glaciares de escombros es insignificante (Arenson et al., 2013). Al contrario del caso de los glaciares descubiertos, los glaciares de escombros y protalus rampart no presentan una escorrentía anual medible ya que no hay un intercambio del hielo entrampado (Barsch, 1996; Berthling, 2011). Tal como lo demuestra Arenson et al. (2013), la escorrentía de los glaciares de escombros o protalus rampart solo ocurre en el caso que haya una degradación del

permafrost y un descongelamiento de su hielo de suelo. En este caso, para la cuenca del Río Turbio, se calculó, considerando algunos supuestos teóricos, que la contribución hídrica anual de la degradación de todo el permafrost presente en la cuenca superior varía entre el 0.6% y 0.8% de la escorrentía promedio anual del Río Turbio, y por lo tanto está dentro del rango de la variabilidad hídrica natural de la cuenca. Se estimó que la producción hídrica de un glaciar de escombros o protalus rampart puede estar entre 0.1 l/s y 0.3 l/s durante los meses de verano. Esto equivale a entre 0.03% y 0.05% de la escorrentía total anual de la cuenca del Río Turbio. Es así que los autores concluyeron que la escorrentía atribuible a la degradación del permafrost en los glaciares de escombros y protalus rampart es insignificante (~0.5 % de la escorrentía glacial). En resumen, la principal fuente de agua en el túnel Marcelo es probablemente la fusión de nieve durante el verano.

Los glaciares Guanaco y Los Amarillos son de base fría (en inglés “cold-based”), es decir están congelados al material tillítico subglaciar, la roca de base y el permafrost subyacente. Es por eso que no producen escorrentía subglacial o percolación subterránea profunda por debajo del cuerpo de hielo. Cabe mencionar sí, que puede existir cierta percolación de escurrimiento supraglacial hacia dentro de la capa activa en zonas externas al glaciar fuera de sus contornos. En todo caso, este escurrimiento fluiría por dentro de la capa activa, por sobre el tope del permafrost, sin infiltrar más profundamente.

Además, la parte del escurrimiento que el Glaciar Guanaco descarga hacia Argentina, lo hace en el valle Arroyo Canito, que entra en el valle del Río Turbio y aguas abajo del portal del túnel. La mayor parte de la escorrentía del Glaciar Los Amarillos fluye hacia el valle del Arroyo de Los Amarillos. Sola una pequeña parte fluye hacia el valle del Río Turbio Superior (Figura 6-1).

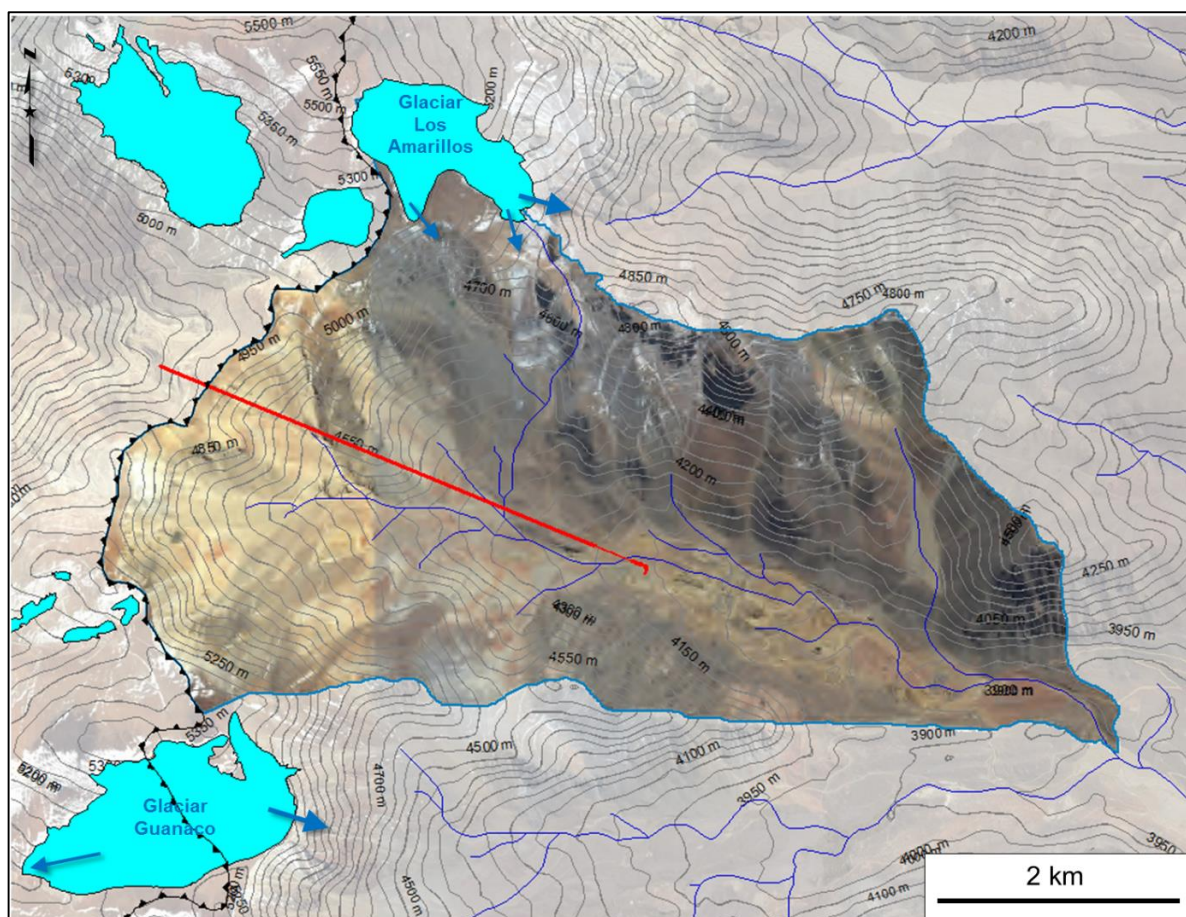


Figura 6-1. Dirección de la escorrentía glacial (flechas azules) de los glaciares Los Amarillos y Guanaco en relación al túnel en la cuenca superior del Río Turbio Superior.

Es teóricamente posible que cuando las escorrentías superficiales entran en la zona de baja probabilidad de permafrost, éstas se infiltran en suelo no criótico y cierta parte de ellas puedan llegar al túnel. Si esto fuera así, entonces el porcentaje de la escorrentía total que llega al túnel sería pequeña y controlada por la permeabilidad hidráulica de la roca de basamento presente.

Por otra parte, el hielo de suelo en los glaciares de escombros y *protalus ramparts*, es parte del permafrost, y por lo tanto, por estar permanentemente congelado, no puede contribuir a la

escorrentía. La única fuente de escorrentía es la fusión estacional del hielo de suelo que posiblemente esté albergado en la capa activa. La fusión de este hielo de suelo estacional es similar a la fusión del hielo de suelo en cualquier parte en donde haya permafrost y no es específico ni relativo a la existencia de glaciares de escombros o de *protales ramparts*.

La hidrogeología de la cuenca del Río Turbio Superior juega un rol mucho más importante en el escurrimiento de agua en el túnel que cualquier degradación posible del permafrost en respuesta al cambio climático o cualquier actividad antropogénica en el área. La permeabilidad hidráulica general de la roca está controlada por su macro estructura, es decir, la presencia y características de sus fisuras.

7 Conclusiones

El contexto hidrogeológico del Túnel Marcelo está caracterizado por la presencia dominante de un acuífero secundario, donde el agua se aloja en las discontinuidades del macizo rocoso dentro del cual está ejecutada la excavación. Algunos bolsones sedimentarios ubicados sobre la traza del túnel alojan acuíferos primarios chicos que alimentan al acuífero secundario.

La principal recarga de los dos sistemas acuíferos, directa o indirectamente, es la nieve de la temporada invernal. Más localmente, la recarga quizás más efectiva y evidente del acuífero aluvial es la infiltración directa del Arroyo Turbio y sus tributarios.

La zona de descarga más importante del acuífero primario son las vegas que se hallan dentro del valle aluvial del Arroyo Turbio.

Los caudales medidos en el portal Lama, a través de una estación de aforo, desde agosto de 2012 hasta junio de 2015 evidencian el mismo comportamiento descrito en los párrafos anteriores de manera cualitativa. Al comienzo de la ejecución de la obra, a medida que la construcción avanzaba, los caudales que egresaban del túnel eran cada vez mayores, con picos en las horas posteriores a cada una de las tronaduras por el aporte del agua de alumbramiento. Luego, el nivel dinámico comenzó a descender lentamente y a estabilizarse en lo que se denominaría caudal residual, entre 35 y 40 l/s en junio de 2015. Esta situación se caracteriza por el equilibrio hidrogeológico, es decir, la equivalencia de los caudales de ingreso al sistema (aporte al acuífero desde arroyos, bolsones aluviales y base de los glaciares) y el caudal de egreso (infiltraciones del túnel y el flujo hacia acuífero primario del valle principal del Arroyo Turbio).

En cuanto a la interferencia del túnel con el sistema hidrogeológico de la zona no hay evidencia de una alteración o modificación en el ámbito de la química de las aguas. La interacción más evidente quizás no esté sobre la calidad de las aguas sino sobre la cantidad almacenada en el ámbito subterráneo. Habiéndose evidenciado desde los inicios de la construcción del túnel la presencia de un nivel saturado en las discontinuidades del macizo rocoso, el efecto dren fue sin duda el proceso más influente sobre el recurso hídrico subterráneo. Este proceso actuó evacuando parcial y localmente el agua del macizo rocoso y registrando, por ende, un descenso del nivel saturado a lo largo de la traza de la excavación por concentración del flujo subterráneo. Los conos de depresión provocados por el efecto drenante no son amplios dadas las bajas permeabilidades que posee el macizo.

La situación de equilibrio hidrogeológico final se ve reflejada en un caudal residual estable y una superficie freática acorde con los nuevos potenciales hidráulicos. Una vez finalizada la obra y recuperado un régimen estacionario, el caudal de ingreso al sistema es nuevamente igual al caudal de egreso, aunque el almacenamiento, o volumen de agua erogado por el túnel fue transferido al sistema hídrico superficial y, por medio de él, al sistema acuífero sedimentario localizado el material depositado en la planicie aluvial del Arroyo Turbio y, aguas abajo, del Río Las Taguas.

Se efectuaron cálculos analíticos y numéricos que prueban que el rango de caudal captado por el túnel es de 22 l/s en invierno y 41 l/s (un 90 % mayor) para los periodos estivales, influenciados directamente por la recarga desde los ríos. Considerando una recarga adicional para el período estival del año 2022, la simulación de caudal de infiltración hacia el túnel muestra un máximo de 41 l/s en un año húmedo, mientras que para el mismo período considerado como año normal el caudal máximo simulado es de 29 l/s (43 % menor).

8 Bibliografía / Referencias

- BEASA & Knight Piésold, Documento SA202-00027/3-4, Julio 2006.
- Bläckblom, G., 2002. Experience on grouting to limit inflow to tunnels: Research and development and case studies from Sweden. Working Report 2002-18. Posiva, Abril de 2002.

- Carlsson, A., Olsson, T., 1992. The analysis of fractures, stress and water flow for rock engineering projects. Comprehensive rock engineering, vol 2. Pergamon Press, Oxford.
- Golder Associates 069-2074-G-IT-001: Mapeos geológicos-geotécnicos y prospecciones adicionales de los túneles de acceso del chancador primario y de trazado del túnel Correa, Apoyo Ingeniería de Detalle Proyecto Pascua Lama, 102 páginas.
- Goodman, R., Moye, D., Schalkwyk, A., Javandel, I., 1965. Ground-water inflow during tunnel driving. Engineering Geology Bulletin IAEG 2(1): 39-56.
- Informe quincenal de caudales de SRK desde agosto de 2012 a enero de 2014.
- Lei, S., 1999. An analytical solution for steady flow into a tunnel. Ground Water 37(1): 23-26.
- Louis, C., 1974. Introduction a l'hydraulique des roches. Bull BRGM, sect III, 4: 283-356.
- SRK 52-2040-06-35: Estimación y proyección en posición del nivel freático, túnel Marcelo. Febrero 2013.
- SRK 52-2040-06-71: Estimación preliminar de infiltración residual. Julio de 2013.
- SRK 52-2040-06-94: Estimación de flujos residuales. Diciembre de 2013.
- SRK 51-2040-18-02: Evaluación del ambiente hidrogeocriológico en relación al Túnel Marcelo. Abril 2015.

Registro de Distribución SRK

Nº Informe

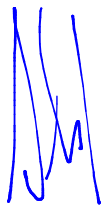
BEASA12210-2211-C-RP-0003

Nº Revisión

A

Nombre/Título	Empresa	Copia	Fecha	Autorizado por
Marcelo Cabral	BEASA	1	01/07/2015	Alejo O. Sfriso
Elizabeth Vizcaíno	BEASA	2	01/07/2015	Alejo O. Sfriso
Archivo	SRK AR	3	30/06/15	Alejo O. Sfriso

Firma de aprobación:


1/7/2015

Este reporte está protegido por derechos de autor de SRK Consulting. No puede ser reproducido ni transmitido en ninguna forma ni por ningún medio a ninguna persona sin el consentimiento escrito del propietario del derecho de autor, SRK.