

Estimación de caudales de infiltración en el Túnel Lama en el corto, mediano y largo plazo

Informe preparado para

Barrick Exploraciones Argentinas S.A.



Informe preparado por



SRK Consulting (Argentina) SA
52-2040-06-94-B
Diciembre 2013

Estimación de caudales de infiltración en el Túnel Lama en el corto, mediano y largo plazo

Barrick Exploraciones Argentinas S.A.

Proyecto Pascua - Lama

SRK Consulting (Argentina) S.A.

Rivadavia 926 Suite 901 (C1002AAU) Buenos Aires
Emilio Civit 404 (M5502GVR) Mendoza

e-mail: info@srk.com.ar

website: www.srk.com.ar

Tel: +54 (11) 4342 8887 (BUE) - (261) 425 6616 (MDZ)

Fax: +54 (11) 5291 5119 (BUE) - (261) 425 6604 (MDZ)

Número de Documento SRK 52-2040-06-94-B

Diciembre 2013

Revisado por:

Dr. Alejo O. Sfriso

Director de Obra

Email: asfriso@srk.com.ar

Lic. Beatriz Labarca

Jefe Área Hidrogeología

SRK-Chile

Autores:

Camilo de los Hoyos, Alfredo Urzúa, Ana Vinuesa, Claudia Martínez,
Juan Martín Sitjá y Balbastro

Resumen Ejecutivo

El proyecto binacional Pascua-Lama está ubicado en la Cordillera de Los Andes, en la zona de frontera entre Chile (Pascua) y Argentina (Lama), y sus instalaciones están ubicadas a altitudes aproximadas entre 3800 y 5200 msnm. En Chile, el proyecto está ubicado en la Provincia de Huasco de la Región de Atacama (III), mientras que del lado argentino se ubica en el Departamento Iglesia, al noroeste de la Provincia de San Juan, a 363km de la ciudad capital.

Barrick Exploraciones Argentina S.A. (BEASA) solicitó a SRK la estimación de los caudales de infiltración residual de agua ácida que saldrán del túnel Lama durante las etapas de construcción y operación. Este requerimiento debe asegurar una estimación con una precisión tal que permita el dimensionamiento de los sistemas de manejo y tratamiento de agua dentro del área del túnel.

El macizo rocoso dentro del cual se construyó el túnel está formado principalmente por rocas de tipo granitoide (granitos y granodioritas) acompañadas por proporciones menores de intrusiones dioríticas, ferricretas en el área del portal y tobas silicificadas aproximadamente a los 1400m de excavación desde el portal Lama. La abundancia de pirita en todas estas rocas es la responsable del tenor ácido de las aguas del acuífero. La estructura geológica del túnel está caracterizada por un intenso fracturamiento concentrado en zonas de falla y sectores de alta densidad de discontinuidades de rumbo generalmente NO-SE. El túnel está orientado prácticamente O-E y atraviesa del orden de 40 de ellas en sus 1200m de longitud por debajo del nivel saturado, generándose importantes caudales de infiltración que deben conducirse y tratarse. Estas zonas actúan como canales de alta conductividad hidráulica, es decir, zonas de alta permeabilidad y velocidad de flujo.

SRK revisó toda la información geológica, geomecánica y estructural generada por la consultora Golder Associates (Golder) y trabajó en conjunto con la misma para generar nueva información relevante para complementar la información previa y generar nuevos datos para la estimación de caudales mediante simulaciones numéricas y estimaciones analíticas.

SRK utilizó la abertura y espaciamiento de discontinuidades para obtener nuevos y más precisos valores de la conductividad hidráulica, válidos para zonas de falla y de alta infiltración en el tramo del túnel por debajo del nivel saturado. Se obtuvo una conductividad hidráulica promedio mínima de 1,10E-05m/s y una conductividad hidráulica promedio máxima de 1,41E-05m/s, para las cuales se estimaron errores porcentuales mínimos de 49% y 47% respectivamente.

Se llevaron a cabo pruebas de concepto con el fin de evaluar la compatibilidad entre simulaciones numéricas 2D y soluciones analíticas, con resultados satisfactorios. SRK escogió la solución analítica de Lei (1999) para estimar caudales de infiltración residual, ya que ésta es la que mejor se adapta a la geometría del túnel Lama respecto al macizo rocoso, caracterizada básicamente por un túnel de radio grande respecto a la altura piezométrica del acuífero freático.

Con el fin de evaluar el efecto del *shotcrete* de la mitad superior (bóveda y parte superior de los hastiales), se llevó a cabo una simulación numérica 2D en la cual se impermeabilizó el 50% superior del túnel. La simulación numérica conceptual demostró que el caudal de infiltración residual en régimen estacionario se reduce un 25% respecto al túnel sin cementar. Esta reducción del caudal fue aplicada en las estimaciones analíticas mediante la solución de Lei (1999).

El registro de caudales en el portal del túnel mostró una clara tendencia general de aumento del caudal de infiltración desde 32l/s en agosto de 2012 hasta valores en el orden de 120l/s en junio/julio de 2013. Luego de ese punto máximo, la tendencia se revierte y comienza a decrecer hasta valores del orden de 60l/s medidos recientemente. El promedio de las últimas 3 quincenas fue de 65l/s (informes SRK 52-2040-06-95/96/97).

Los caudales de infiltración residual estimados mediante la solución de Lei (1999) tuvieron una coincidencia aceptable con los caudales medidos en el portal del túnel en los últimos meses. Los valores obtenidos mediante soluciones analíticas fueron:

- Caudal mínimo sin *shotcrete*: 89,47 – 97,03 l/s
- Caudal mínimo con *shotcrete* (50% del perímetro): 67,10 – 72,77 l/s
- Caudal máximo sin *shotcrete*: 114,90 – 124,61 l/s
- Caudal máximo con *shotcrete* (50% del perímetro): 86,17 – 93,45 l/s
- Rango total sin *shotcrete*: 89,47 – 124,61 l/s
- Rango total con *shotcrete* (50% del perímetro): 67,10 – 93,45 l/s

Los errores porcentuales estimados para las conductividades hidráulicas (47-49%) deben propagarse a las estimaciones analíticas de caudal de infiltración residual, resultando en amplios márgenes de error de 60 – 100 l/s para los resultados obtenidos. SRK considera que las estimaciones analíticas de caudal del presente informe 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. El modelo numérico 3D se llevó cabo con el fin de poder ser utilizado como una herramienta predictiva de mayor alcance y, para ello, ha sido calibrado en su condición estacionaria o de equilibrio contra los datos de niveles de agua subterránea medidos en 6 piezómetros en enero del año 2007.

La condición transitoria se ha logrado calibrar mostrando un buen ajuste con los niveles medidos para el periodo diciembre 2012 a marzo 2013, y las mediciones de caudales emergentes del túnel que se realizan quincenalmente desde julio de 2012.

Para el caso de la situación previa a la construcción del túnel se han utilizado como instrumentos de calibración el gradiente hidráulico original y los niveles freáticos medidos por Golder en el año 2007. Se obtuvo un error cuadrático medio (conocido como RMSE por sus siglas en inglés) de 6 m y un error cuadrático medio normalizado (NMRS) de 4,2%. Estos números acusan un buen ajuste del modelo a los parámetros que se han utilizado para su calibración, por lo que la incertidumbre en la estimación de los caudales que se predicen sea reducida, aunque no puede estimarse cuantitativamente.

Los escenarios predictivos simulados han considerado el período comprendido entre julio de 2012 y diciembre de 2033, indicando que para el Caso Base (sin considerar la impermeabilización de las paredes del túnel) el flujo de infiltración fluctúa entre 22 para los períodos de inviernos y 41 l/s (un 90% mayor) para los períodos estivales. La simulación predictiva considerando el efecto del *shotcrete* en la mitad superior del túnel, indica que el flujo de infiltración fluctúa entre 22 para los períodos de inviernos y 38 l/s para el verano. En este caso se evidencia una reducción de aproximadamente 25%, respecto de los flujos simulados para un túnel sin revestir. Por último, los flujos de infiltración, al agregar el efecto de un año de precipitaciones excepcionales, muestra un máximo de 41 l/s para el año húmedo, mientras que para el mismo período considerado como año normal el caudal máximo simulado es de 29 l/s (43% menor).

SRK considera que durante la operación del túnel (estimada en alrededor de 30 años) los caudales de infiltración residual estarán dentro de los rangos estimados, tanto en estaciones secas como en estaciones de deshielos y contemplando también años húmedos y secos.

Estos rangos conservadores de caudales de infiltración están aún muy por debajo de la capacidad de tratamiento del Sistema Integral de Tratamiento de Agua (SITA) en el área del portal del túnel, el cual está diseñado para tratar un caudal promedio de 250l/s y flujos repentinos de hasta 300l/s.

Al implementar un modelo hidrogeológico de flujo subterráneo se cuenta con una importante herramienta de toma de decisiones sobre el proyecto al interactuar con el sistema hídrico, permitiendo predecir los efectos de los caudales aportantes y flujos subterráneos sobre determinadas obras y evaluar distintas alternativas de manejo sobre potenciales impactos.

Tabla de Contenidos

1 Introducción	1
1.1 Definición del Proyecto y Servicio.....	1
1.2 Objetivos	2
1.3 Alcance	2
1.4 Equipo Involucrado.....	2
2 Geología e Hidrogeología.....	3
2.1 Geología local	3
2.2 Hidrogeología	3
2.2.1 Zonas de infiltración alta	5
2.2.2 Zonas de infiltración media	5
2.2.3 Zonas de infiltración baja	6
3 Resultados.....	6
3.1 Conductividad hidráulica	6
3.2 Prueba de concepto entre soluciones analíticas y modelos 2D	8
3.2.1 Solución de Goodman et al. (1965)	8
3.2.2 Solución de Lei (1999)	9
3.2.3 Modelo simplificado 2D	9
3.3 Efecto del <i>shotcrete</i> en los caudales de infiltración	12
3.4 Estimaciones analíticas de caudal.....	15
3.4.1 Caudales medidos en el túnel.....	15
3.4.2 Escenarios conceptuales y estimaciones analíticas	16
3.4.3 Estimación de la incertidumbre	17
3.5 Modelo Numérico 3D de Flujo de Agua Subterránea.....	19
3.5.1 Supuestos y Consideraciones de la Simulación	19
3.5.2 Resultados	23
4 Conclusiones y Recomendaciones	31
4.1 Conclusiones	31
4.2 Recomendaciones: Plan de monitoreo e instrumentación	32
4.2.1 Agua superficial.....	32
4.2.2 Agua subterránea	33
5 Referencias.....	36

Listado de Figuras y Tablas

Figura 2-1. Perfil geológico esquemático de la situación estructural interpretada recientemente por Golder	3
Figura 2-2. 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	4
Figura 2-3. Evolución del nivel freático durante la excavación del túnel. Extraída del Documento SRK 52-2040-06-69	4
Figura 2-4. 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
Tabla 3-3. Valores de conductividad hidráulica obtenidos a partir de ensayos de permeabilidad in situ (packer tests) llevados a cabo en el año 2007 (modificada de Golder 069-2074-G-IT-001).	6
Tabla 3-2. Valores de conductividad hidráulica obtenidos para zonas de falla y alta densidad de discontinuidades, a partir de abertura y densidad de fracturas.....	8
Figura 3-1. Dimensiones del dominio del modelo numérico y malla de elementos finitos	10
Figura 3-2. Condiciones de borde y propiedades de los materiales.....	10
Figura 3-3. Resultados en régimen estacionario: superficies equipotenciales.....	11
Figura 3-4. Resultados en régimen estacionario: Líneas de flujo.....	11
Figura 3-5. Resultados en estado estacionario: caudal específico de ingreso al túnel	12
Figura 3-6. Dimensiones del dominio del modelo numérico y malla de elementos finitos	13
Figura 3-7. Condiciones de borde y propiedades de los materiales.....	13
Figura 3-8. Resultados en régimen estacionario: flexión de las superficies equipotenciales al impermeabilizar la mitad superior del perímetro del túnel.....	14
Figura 3-9. Resultados en régimen estacionario: distribución de las líneas de flujo al impermeabilizar la mitad superior del perímetro del túnel	14
Figura 3-10. Resultados en régimen estacionario: caudal específico de ingreso a túnel grouteado. 15	15
Figura 3-11. Caudales totales medidos en el portal del túnel entre agosto de 2012 y noviembre de 2013.	16
Tabla 3-3. Cálculos analíticos de caudales aplicando la fórmula de Lei (1999) para el túnel Lama..	17
Figura 3-12. Distribución de zonas de conductividad en planta y perfil. Las zonas 3, 4, 5 y 6 corresponden a zonas de relleno sedimentario.....	20
Figura 3-13. Representación de la recarga desde los cursos de agua superficiales mediante celdas de tipo RIVER.	21
Figura 3-14. Representación de Excavación del Túnel con Celdas tipo DRAIN.	21
Tabla 3-4. Niveles medidos para el período 2007-2013.	22
Figura 3-15. Niveles Simulados versus Medidos para Calibración Estacionaria.....	23
Figura 3-16. Niveles Simulados versus Medidos para Calibración Transiente.	24
Figura 3-17. Flujo en Túnel simulado versus nedido para calibración transiente.....	25
Figura 3-18. Caudal de base simulado para Túnel Lama.....	26
Figura 3-19. Caudal de base simulado para Túnel Lama con Efecto <i>Shotcrete</i>	27
Figura 3-20. Flujo en Túnel sin <i>shotcrete</i> versis flujo en Túnel con <i>Shotcrete</i> en la mitad superior de su perímetro.....	28
Figura 3-21. Caudal de base simulado para Túnel Lama, considerando una recarga adicional para el período estival 2022.....	29

Figura 3-22. Flujo en Túnel simulado considerando Año Normal versus flujo considerando Año Húmedo	30
Figura 3-23. Flujo en Túnel simulado para tres escenarios: Caso Base, Efecto <i>Shotcrete</i> , Efecto Año mayor recarga.....	30
Tabla 4-1. Resumen del estado actual de los sondajes de monitoreo en la superficie por encima del túnel.	33
Figura 4-1. Esquema de configuración de un sensor en un sondaje y obtención de la cota del nivel de agua.	34
Figura 4-2. Esquema de funcionamiento de un aforador con un sensor de ultrasonido para registrar los niveles de agua	34

Limitación de Responsabilidad

Las opiniones expresadas en este Informe se han basado en la información suministrada a SRK Consulting Argentina S.A. (SRK) por Barrick Exploraciones Argentinas S.A. (BEASA). Las opiniones en este Informe se proporcionan en respuesta a una solicitud específica de BEASA al respecto. SRK ha tenido todo el debido cuidado en la revisión de la información suministrada. Aunque SRK ha comparado la información clave con los valores esperables, la exactitud de los resultados y conclusiones de esta revisión dependen enteramente de la exactitud y completitud de la información suministrada. SRK no acepta responsabilidad por ningún error u omisión en la información suministrada y no acepta responsabilidades consecuentes que surjan de decisiones comerciales o acciones que resulten de éstas. Las opiniones presentadas en este Informe se aplican a las condiciones particulares y características del sitio tal como existían al momento de las investigaciones de SRK, y aquellas otras razonablemente pronosticables. Estas opiniones no necesariamente se aplican a las condiciones y características que puedan surgir luego de la fecha de este Informe, acerca de las cuales SRK no haya tenido conocimiento previo u oportunidad de evaluar.

The opinions expressed in this Report have been based on the information supplied to SRK Consulting Argentina S.A. (SRK) by Barrick Exploraciones Argentinas S.A. (BEASA). The opinions in this Report are provided in response to a specific request from BEASA to do so. SRK has exercised all due care in reviewing the supplied information. Whilst SRK has compared key supplied data with expected values, the accuracy of the results and conclusions from the review are entirely reliant on the accuracy and completeness of the supplied data. SRK does not accept responsibility for any errors or omissions in the supplied information and does not accept any consequential liability arising from commercial decisions or actions resulting from them. Opinions presented in this report apply to the site conditions and features as they existed at the time of SRK's investigations, and those reasonably foreseeable. These opinions do not necessarily apply to conditions and features that may arise after the date of this Report, about which SRK had no prior knowledge nor had the opportunity to evaluate.

1 Introducción

El presente documento responde a la solicitud de BEASA a SRK de una continua mejora en la estimación de los caudales de agua ácida que saldrán del túnel Lama durante las etapas de construcción y operación, es decir, para al menos los próximos 30 años. Este requerimiento debe asegurar una estimación con una precisión tal que permita el dimensionamiento de los sistemas de manejo y tratamiento de agua dentro del área del túnel.

Este documento incluye estimaciones mediante soluciones analíticas, pruebas de concepto para evaluación de compatibilidad entre soluciones analíticas y modelos 2D en Feflow y Modflow, y modelado numérico 3D en Modflow.

1.1 Definición del Proyecto y Servicio

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 363km de la ciudad capital.

BEASA es la propietaria del Proyecto Binacional Pascua-Lama y desde el año 2011, por medio de la constructora Redpath Argentina Construcciones (RAC), está construyendo el túnel Pascua Lama que conectará los portales chileno (Pascua) y argentino (Lama) y permitirá la instalación de una cinta transportadora que llevará mineral desde el chancador primario hasta la planta de procesos. El túnel tendrá aproximadamente 4km de longitud.

El túnel Pascua Lama se está excavando con el método de perforación-voladura tanto desde el portal de Pascua como desde el portal Lama. Gran parte del túnel Lama se está excavando dentro de un acuífero alojado en las estructuras del macizo rocoso, por lo que se ha estado produciendo un ingreso importante de agua al túnel, el cual tuvo episodios máximos durante el alumbramiento de zonas muy fracturadas (por ejemplo, fallas) y se fue estabilizando a valores residuales. El agua que ingresa al túnel es ácida y de tipo sulfatada cálcica.

El conocimiento de la cantidad de agua ácida que ingresa al túnel Lama tiene serias implicancias en tres aspectos fundamentales:

- Replanteos de diseño y mejora continua de la capacidad hidráulica del sistema integral de tratamiento de agua (SITA);
- Evaluación de la agresividad del agua ácida hacia las fortificaciones del túnel y anclajes de la cinta transportadora;
- Posible utilización del agua de infiltración del túnel en la planta de procesos para tratamiento del mineral;
- Diseño del entubado y conducción de las aguas de los arroyos Turbio y Canito, así como aguas tratadas del SITA (túnel Lama) y otros sistemas presentes en el proyecto.

Hasta el día de la fecha, con aproximadamente 1515m excavados desde el portal Lama, el caudal promedio de infiltración residual del túnel está alrededor de 60-65 l/s. Más detalles sobre este aspecto pueden encontrarse en el informe SRK 52-2040-06-97.

BEASA solicitó a SRK una evaluación de los caudales que ingresarán al túnel a largo plazo. Como ésta es una evaluación de alta responsabilidad, SRK propuso efectuarla en tres etapas:

- Una primera etapa en la que se emplean métodos analíticos convencionales, basados en la solución de la teoría de flujo estacionario en un medio uniforme;
- Una segunda etapa en la cual se evalúa la validez de las soluciones analíticas mediante modelos numéricos sencillos 2D; y
- Una tercera etapa que incluye la construcción y calibración continua de un modelo numérico 3D de flujo subterráneo.

La razón por la que se plantea esta estrategia de solución es que la construcción y calibración del modelo numérico requiere información detallada del macizo rocoso y de la posición del nivel freático en puntos ubicados fuera del túnel, información que no está disponible al momento de la emisión de este documento. La construcción de un modelo numérico, además de aumentar continuamente la confiabilidad (y reducir el rango de variabilidad) de las predicciones de flujos durante la calibración, permitirá contar con una herramienta de calibrado continuo para la predicción de otros fenómenos de índole operativa (por ejemplo, elevación del nivel freático luego de las impermeabilizaciones

dentro del túnel) y ambiental (por ejemplo, respuesta de las vertientes naturales a los cambios del nivel freático debidos a la presencia del túnel) durante toda la vida del proyecto.

1.2 Objetivos

Efectuar una predicción a corto, mediano y largo plazo (30 años) del caudal estacionario de ingreso al túnel Lama, luego del encuentro de ambos frentes mediante:

- técnicas analíticas, empleando la información geológica, geotécnica, hidrogeológica e hidráulica disponible;
- Modelos numéricos 2D simplificados combinados con técnicas analíticas; y
- Modelo numérico 3D de flujo subterráneo

1.3 Alcance

A falta de ensayos específicos, la conductividad hidráulica del macizo rocoso se estima en base a parámetros geológico-geotécnicos. A falta de suficientes pozos de monitoreo, el caudal de ingreso se calcula con fórmulas que asumen un flujo 2D en un medio isótropo y homogéneo; esta limitación se compensa parcialmente mediante el empleo de distintos métodos analíticos y numéricos. De este modo, la predicción realizada es perfectible y sujeta a actualización a medida que surgen nuevos datos a lo largo del proyecto.

- De acuerdo con la solicitud formal de BEASA, el documento debe incluir:
- Revisión de la información, caracterización y metodologías utilizadas para la estimación de flujos/caudales de agua que salen del túnel para el corto, mediano y largo plazo;
- Recomendaciones de criterios que permitan mejorar la confiabilidad en la estimación de los resultados conforme a lo ya ejecutado a la fecha;
- Metodologías para presentación de resultados obtenidos de una manera que incluya la incertidumbre para el uso de la información; y
- Plan de instrumentación y monitoreo de aguas en el tiempo que permita que los modelos usados puedan ser calibrados periódicamente.

1.4 Equipo Involucrado

Consultor	Título/Disciplina
Camilo de los Hoyos	Consultor Senior. Geología e Hidrogeología. Jefe de proyecto.
Alfredo Urzúa	Consultor Principal Asociado. Ingeniería Civil.
Claudia Martínez	Consultor Senior. Hidrogeología, SRK-Chile.
Ana Vinuesa	Consultor Staff. Geología e Hidrogeología.
Juan Martín Sitjà y Balbastro	Consultor. Geología e Hidrogeología.
Alejo Sfriso	Consultor Principal. Ingeniería Civil/Geotécnica. Revisor
Beatriz Labarca	Consultor Principal. Hidrogeología, SRK-Chile. Revisor

2 Geología e Hidrogeología

2.1 Geología local

De acuerdo con el plano 069-2074-G-001 (Anexo A) y el mapeo as-built llevado a cabo por Golder (2011-2013) el sector del portal del túnel Lama 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 próximos 1000m de túnel predominan ampliamente los granitos y granodioritas, con dioritas muy compactas aproximadamente a los 700m excavados (denominación PK0+700) y en PK1+000 (1000m excavados). Aproximadamente entre PK1+250 y 1+500, el túnel debería atravesar un tramo de tobas dacíticas silicificadas, siguiendo luego con granitos-granodioritas hasta PK1+650.

En el tramo descripto, el túnel Lama 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 Lama (Figura 2-1), basados en (1) la secuencia de tobas y tobas brechosas dacíticas de la zona cumbral 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.

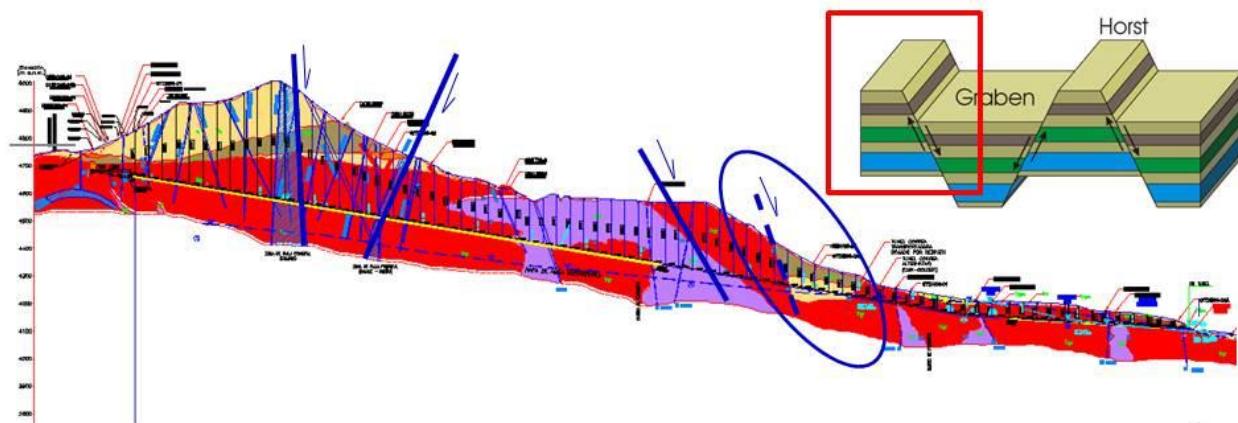


Figura 2-1. Perfil geológico esquemático de la situación estructural interpretada recientemente por Golder.

Las zonas de falla interceptadas por el tramo excavado del túnel Lama presentan una alta densidad de discontinuidades y son de dos tipos:

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

Ambos tipos de falla generan inconvenientes en la construcción del túnel debido a que ingresa un alto caudal de infiltración y, además, se precisa intensificar las fortificaciones debido a riesgo geotécnico.

En el interior del túnel, entre 2011 y 2013 Golder mapeó alrededor de 60 zonas de falla solamente en la zona saturada del túnel, cuyos espesores en general son de 3,5 a 4m y constituyen normalmente fracturas abiertas. Dichas zonas de falla constituyen sectores muy fracturados, con al menos 5 familias de discontinuidades y espacio pequeño (menos de 30cm). El detalle del mapeo estructural de Golder puede encontrarse en el detalle del mapeo del índice Q que Golder emite mensualmente a BEASA.

2.2 Hidrogeología

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 2-2, 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. El arroyo Turbio tiene un largo recorrido NNO-SSE, con un caudal máximo registrado por BEASA Medio Ambiente de 300l/s nulo en invierno. El arroyo noroeste-sudeste colecta agua de numerosos cursos menores en el área cumbral del cordón montañoso. Se ha observado que este curso transporta un caudal superficial de aproximadamente 10l/s que se infiltra totalmente en la zona proximal del cono aluvial, es decir justo por encima del túnel.

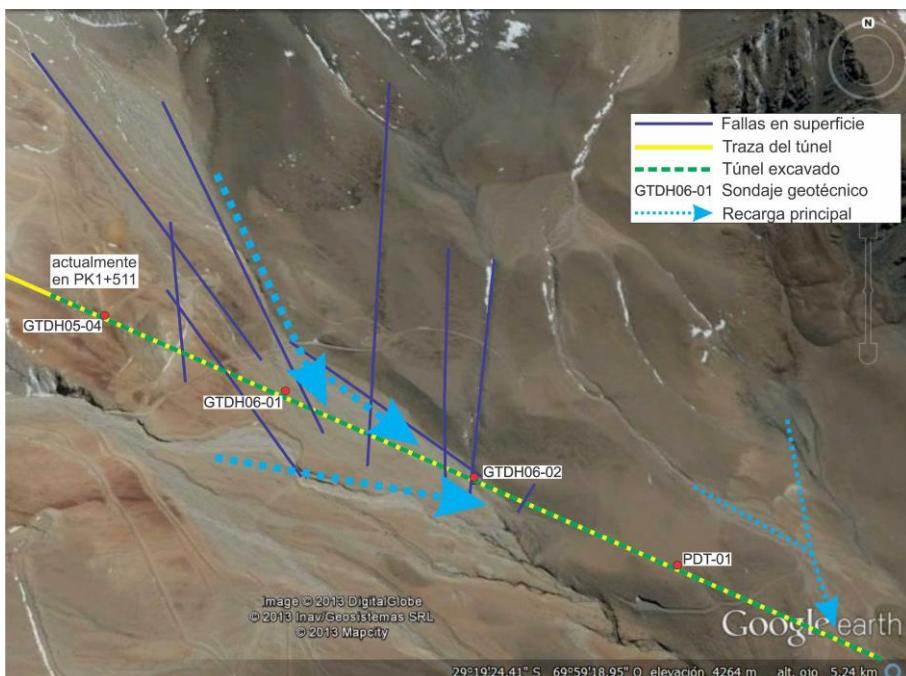


Figura 2-2. Geología de superficie del área de la traza del túnel, con indicación de fallas geológicas y sentido de las principales recargas al acuífero del macizo rocoso.

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 PK0+780 y el PK0+670 y zonas de alta infiltración pendiente abajo de la misma.

El avance del túnel produjo un marcado “efecto dren” debido a la baja conductividad hidráulica y recarga limitada del acuífero rocoso. La consecuencia del efecto dren fue un descenso local del nivel freático, esquematizado en la Figura 2-3. El ingreso de agua al túnel comienza aproximadamente en PK1+190 y se intensifica en las zonas de falla.

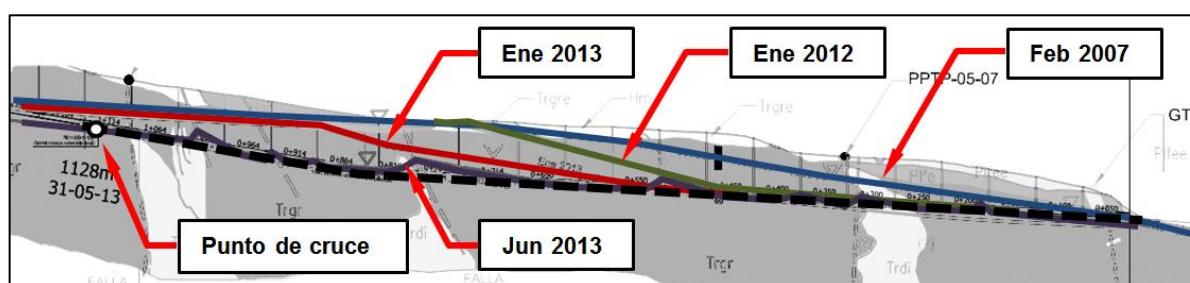


Figura 2-3. Evolución del nivel freático durante la excavación del túnel. Extraída del Documento SRK 52-2040-06-69.

Las proyecciones del nivel freático por parte de Golder y SRK (SRK 52-2040-06-35 y SRK 52-2040-06-71) indicaron que, en las condiciones actuales, el túnel impactaría la superficie freática

aproximadamente en PK1+100-PK1+200, lo cual se cumple actualmente en el interior del túnel ya que las infiltraciones al túnel finalizan en PK1+180-PK1+200.

El caudal ingresante en las zonas de falla disminuyó 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 debe tanto al drenado del acuífero como a la disminución estacional del aporte superficial en invierno.

A la fecha del presente informe, el túnel se encuentra debajo del nivel freático entre PK1+200 y PK0+410, totalizando aproximadamente 790m de túnel "saturado" (Figura 2-4). 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.

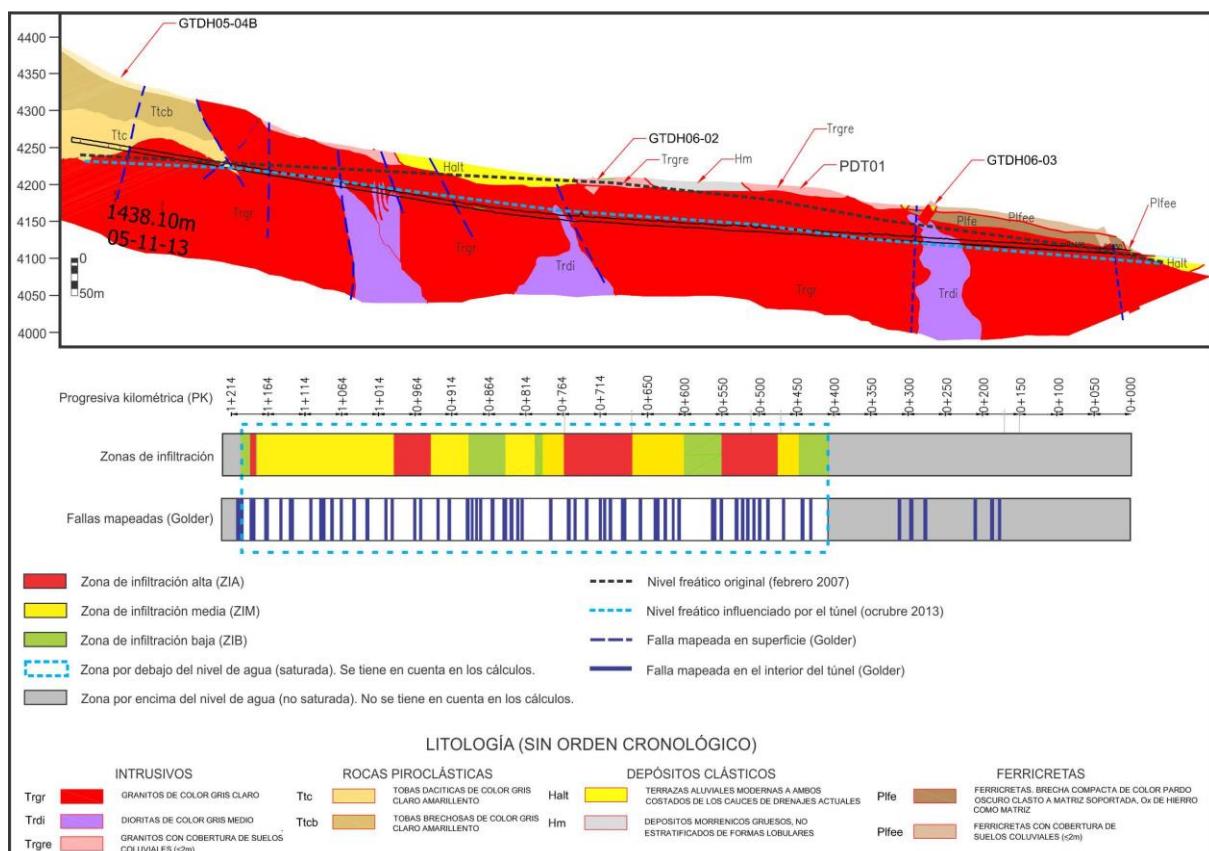


Figura 2-4. Perfil geológico simplificado (modificado de Golder 069-2074-G-IT-001) con indicación de zonas de infiltración y fallas mapeadas en el interior del túnel.

2.2.1 Zonas de infiltración alta

El ancho total es de 210m. 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 estima que a través del ancho total de estas zonas se infiltra el 70% del caudal total de infiltración (aprox. 0,30l/s/m).

- De PK1+190 a PK1+180
- De PK0+990 a PK0+950
- De PK0+760 a PK0+670
- De PK0+550 a PK0+480

2.2.2 Zonas de infiltración media

El ancho total es de 430m. 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 estima que a través de estas zonas ingresa el 20% del caudal total de infiltración (aprox. 0,05l/s/m).

- De PK1+180 a PK0+990
- De PK0+950 a PK0+890

- De PK0+790 a PK0+760
- De PK0+670 a PK0+600
- De PK0+480 a PK0+450

2.2.3 Zonas de infiltración baja

El ancho total es de 150m. Ingreso de agua generalmente en forma de humedad en discontinuidades y concreto, ocasionalmente goteo muy leve. Se estima que a través de estas zonas ingresa el 10% del caudal total (aprox. 0,03l/s/m).

- De PK1+200 a PK1+190
- De PK0+890 a PK0+850
- De PK0+800 a PK0+790
- De PK0+600 a PK0+550
- De PK0+450 a PK0+410

3 Resultados

3.1 Conductividad hidráulica

Los primeros esfuerzos por obtener valores de conductividad hidráulica del macizo rocoso fueron llevados a cabo por Golder (documento 069-2074-G-IT-001, 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 10^{-6} m/s mientras que el mínimo en 10^{-12} m/s (Tabla 3-1).

Sondajes	Este	Norte	Inclin.	Azimut	Cota (m.s.n.m.)	90	Largo de Cámara		K (cm/s)
							Desde (m)	Hasta (m)	
GTDH06-01	404.1	6.756.065	(-)55°	294°	4245	85	75	80	1.00E-04
							85	90	4.00E-04
GTDH06-02	404.37	6.755.050	(-)55°	294°	4295	85	75	80	1.00E-10
							80	85	Sin Admisión
GTDH06-03	404.79	6.755.780	(-)55°	294°	4170	160	32.2	55.15	Sin Admisión
							38.2	55.15	Sin Admisión
							150	155	Sin Admisión
							155.2	160	Sin Admisión
GTDH06-04-A	404.991	6.755.693	(-)65°	114°	4085	120	110	115	6.20E-10
							115	120	Sin Admisión

Tabla 3-3. Valores de conductividad hidráulica obtenidos a partir de ensayos de permeabilidad in situ (packer tests) llevados a cabo en el año 2007 (modificada de Golder 069-2074-G-IT-001).

SRK consideró que para una mejor caracterización de todo el volumen del macizo atravesado por el túnel, debían explorarse métodos analíticos para obtener estimaciones adicionales de conductividad hidráulica.

SRK coordinó con Golder acerca de las zonas de falla más relevantes dentro del túnel, para llevar a cabo mediciones estructurales específicas. Se escogieron 14 puntos de medición de abertura de fracturas (mediante fisurómetro) y espaciado de las discontinuidades principales.

Los puntos de medición corresponden a zonas muy fracturadas, con varios sets de discontinuidades (hasta 5) y espaciamientos regulares, con muy poca diferencia entre los sets. Por esta razón no se tuvo en cuenta la orientación de cada set respecto a la traza del túnel. 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):

$$K(m/s) = ge^3 / (12vCS)$$

g: aceleración de la gravedad ($9,8m/s^2$)

e: abertura de la discontinuidad (m)

v: viscosidad cinemática del agua ($1E-06m^2/s$)

C: coeficiente de rugosidad de la discontinuidad (adimensional)

S: espaciamiento (m)

El cálculo del coeficiente de rugosidad de la discontinuidad se realizó como sigue:

$$C = 1 + 8,8T^{1,5}$$

T: rugosidad relativa de la discontinuidad, en la mayor parte de los macizos está entre 0,4 y 0,5. Teniendo en cuenta los valores mencionados para T, los valores de C para la mayoría de los macizos están entre 3,2 y 4,1.

Por lo tanto, se calculó para cada punto de medición una conductividad hidráulica mínima con $C=4,1$ y una conductividad hidráulica máxima con $C=3,2$. Los valores calculados están en la Tabla 3-2. Para simplificar los cálculos, **se obtuvo un valor promedio de conductividad hidráulica mínima de las zonas de falla de $1,10E-05m/s$ y un máximo promedio de $1,41E-05m/s$.**

Las conductividades hidráulicas para el resto del macizo fueron asumidas en el orden de $10E-09m/s$ y $10E-10m/s$. Sin embargo, no se llevaron a cabo cálculos analíticos para las 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. Las estimaciones analíticas de caudal están en la sección 3.4.

Tramo PK	Espaciamiento Promedio (m)	Abertura promedio (m)	Conductividad Hidráulica máxima	Conductividad Hidráulica mínima	Observaciones
1205-1215	0.076	0.00016	1.38E-05	1.07E-05	Se midieron más de 5 sets
1200	0.31	0.00005	1.03E-07	8.03E-08	
1180-1190	0.18	0.00022	1.51E-05	1.18E-05	Se midieron 2 sets
	0.066	0.00015	1.31E-05	1.02E-05	
1012	0.098	0.00016	1.07E-05	8.33E-06	Se midieron más de 5 sets
975	0.064	0.00022	4.25E-05	3.31E-05	Se midieron más de 5 sets
950	0.14	0.00017	8.96E-06	6.99E-06	Se midieron 2 sets
	0.12	0.00021	1.97E-05	1.54E-05	
740-750	0.062	0.00027	8.10E-05	6.32E-05	Se midieron 2 sets
	0.062	0.00024	5.69E-05	4.44E-05	
670-760	0.22	0.00005	1.45E-07	1.13E-07	Se midieron 3 sets
	0.26	0.00005	1.23E-07	9.58E-08	
	0.24	0.00006	2.30E-07	1.79E-07	
690-710	0.16	0.00015	5.38E-06	4.20E-06	
660	0.21	0.00016	4.98E-06	3.89E-06	Se midieron 3 sets.
	0.23	0.00017	5.45E-06	4.25E-06	
	0.35	0.0001	7.29E-07	5.69E-07	
510-520	0.3	0.00037	4.31E-05	3.36E-05	Se midieron 3 sets
	0.087	0.00017	1.44E-05	1.12E-05	
	0.11	0.00013	5.10E-06	3.98E-06	
495-500	0.28	0.00015	3.08E-06	2.40E-06	Se midieron 2 sets
	0.14	0.00014	5.00E-06	3.90E-06	
490-495	0.24	0.00012	1.84E-06	1.43E-06	Se midieron 2 sets
	0.16	0.00017	7.84E-06	6.12E-06	
457-460	0.21	0.00014	3.33E-06	2.60E-06	Se midieron 2 sets
	0.28	0.00018	5.32E-06	4.15E-06	

Tabla 3-2. Valores de conductividad hidráulica obtenidos para zonas de falla y alta densidad de discontinuidades, a partir de abertura y densidad de fracturas.

3.2 Prueba de concepto entre soluciones analíticas y modelos 2D

Estas pruebas consistieron en llevar a cabo cálculos analíticos con las soluciones de Goodman et al. (1965) y Lei (1999) y, paralelamente, realizar el mismo cálculo con métodos numéricos, con el objetivo final de evaluar la compatibilidad entre soluciones analíticas y métodos numéricos. 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 constituye solamente una prueba de concepto y sus resultados no constituyen una estimación de caudal, se asumió una conductividad hidráulica de 1m/d y se asumió una altura piezométrica de 10m para todo el túnel.

3.2.1 Solución de Goodman et al. (1965)

Esta solución analítica tiene en cuenta un flujo estacionario, flujo subterráneo radial hacia el túnel y la columna de agua es mucho más grande que el radio del túnel.

La fórmula de Goodman se expresa de la siguiente forma:

$$Q = 2\pi K H / \ln(2H/r), \text{ donde:}$$

Q: caudal estacionario específico por unidad de longitud, en $\text{m}^3/\text{d/m}$

K: conductividad hidráulica, asumida en 1m/d para simplificación

H: altura piezométrica, asumida en 10m para simplificación

R: radio del túnel, asumido en 2,5m para simplificación ($H/r = 4$)

Con estos valores asumidos, el caudal estimado por el método analítico de Goodman (Q_G) fue:

$$Q_G = 30,2 \text{ m}^3/\text{d/m}$$

3.2.2 Solución de Lei (1999)

La solución analítica de Lei (1999) es la más adecuada para túneles cuyo radio es grande comparado con la profundidad y la altura piezométrica, tal es el caso del túnel Lama. Esta solución asume flujo estacionario en un acuífero totalmente saturado, homogéneo, isotrópico y semi-infinito, con un nivel de agua por encima de la superficie del terreno.

La solución general de Lei se expresa en la siguiente fórmula:

$$Q = 2\pi K(d+P-H)/\ln \{D/r + [(D/r)^2 - 1]^{0.5}\}, \text{ donde;}$$

Q: caudal estacionario específico por unidad de longitud

K: conductividad hidráulica

d: altura del agua por encima de la superficie del terreno

P: presión atmosférica

H: altura piezométrica en el perímetro del túnel

D: profundidad del túnel

r: radio del túnel

Para el ejemplo del túnel Lama, donde el nivel agua está por debajo del terreno, puede asumirse:

$d = 0$, y

$H = D$

Tampoco se tendrá en cuenta la presión atmosférica en el cálculo. En resumen, la solución de Lei queda simplificada a la siguiente fórmula:

$$Q = 2\pi KH/\ln \{H/r + [(H/r)^2 - 1]^{0.5}\}$$

Los parámetros asumidos para obtener el caudal por el método de Lei (Q_L) fueron los mismos que para la solución de Goodman, dando como resultado:

$$Q_L = 30,4 \text{ m}^3/\text{d/m}$$

3.2.3 Modelo simplificado 2D

Se reprodujeron exactamente las mismas condiciones en una sección numérica 2D, utilizando el software FEFLOW. Las figuras siguientes resumen los parámetros utilizados para la simulación numérica y sus resultados.

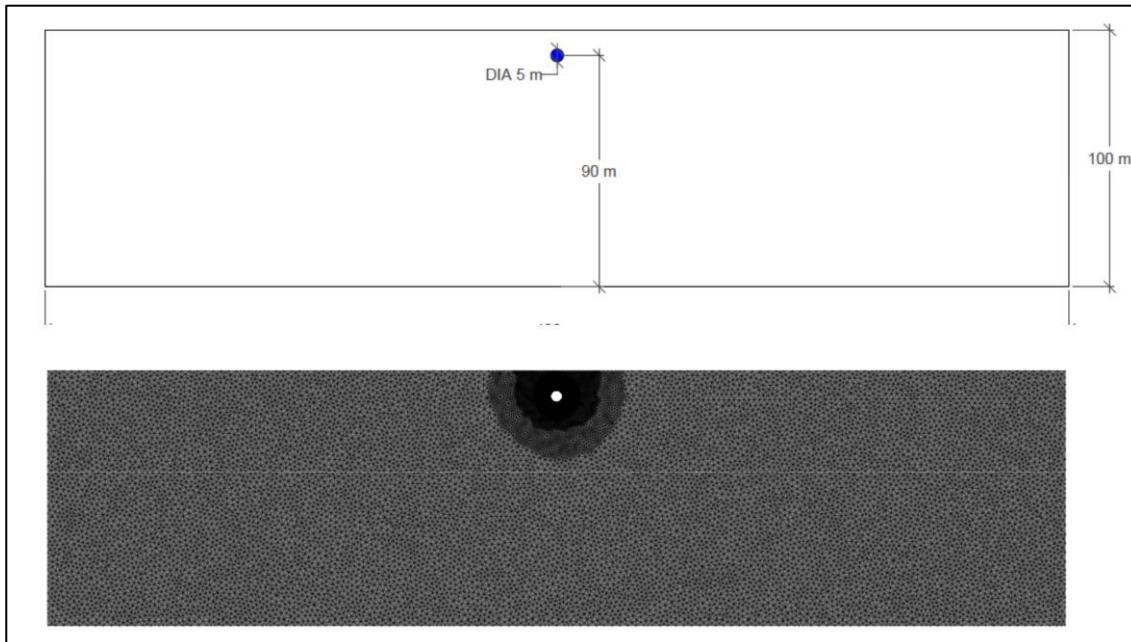


Figura 3-1. Dimensiones del dominio del modelo numérico y malla de elementos finitos

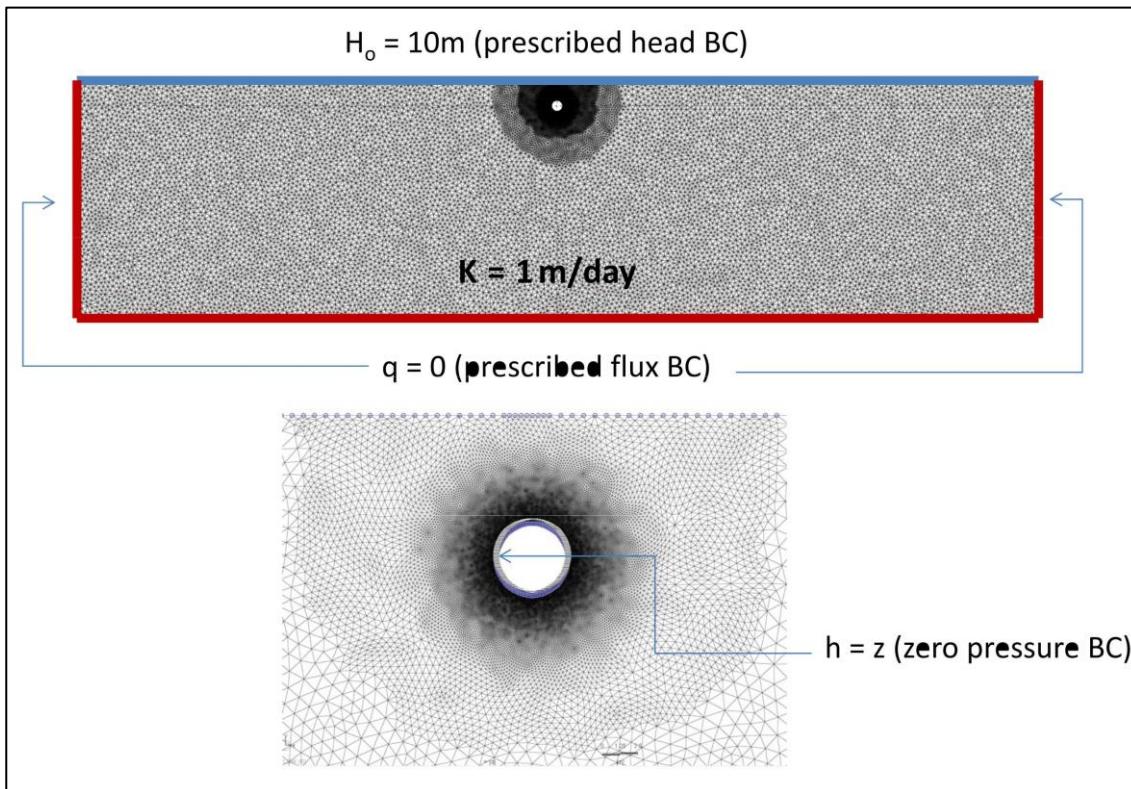


Figura 3-2. Condiciones de borde y propiedades de los materiales.

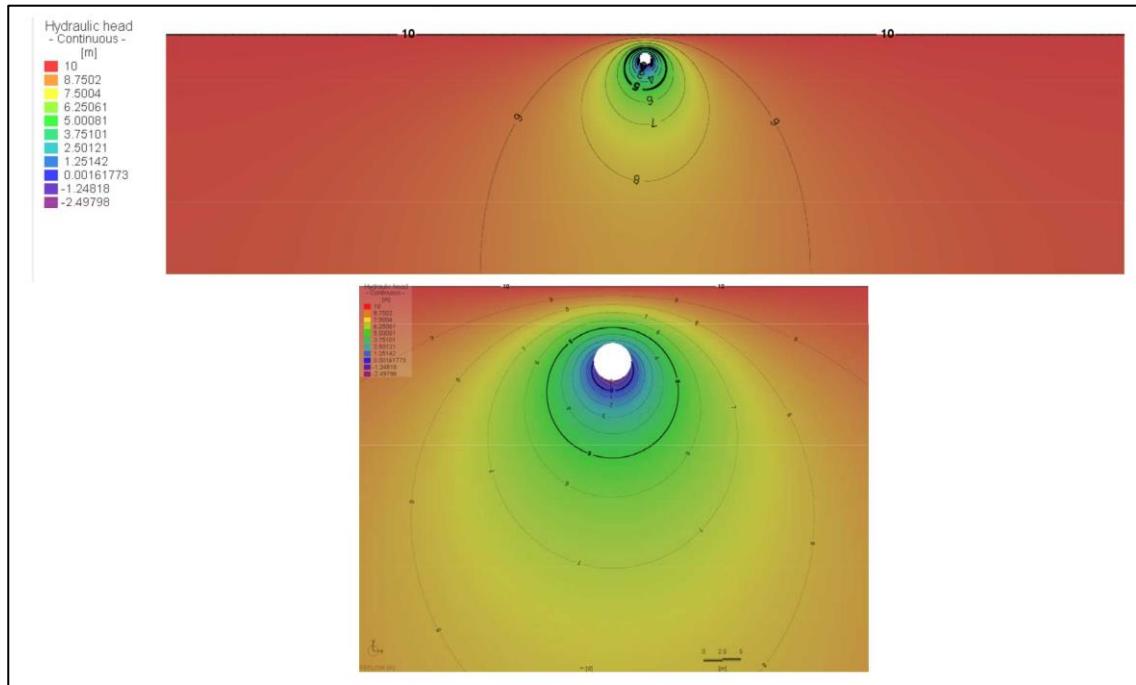


Figura 3-3. Resultados en régimen estacionario: superficies equipotenciales.

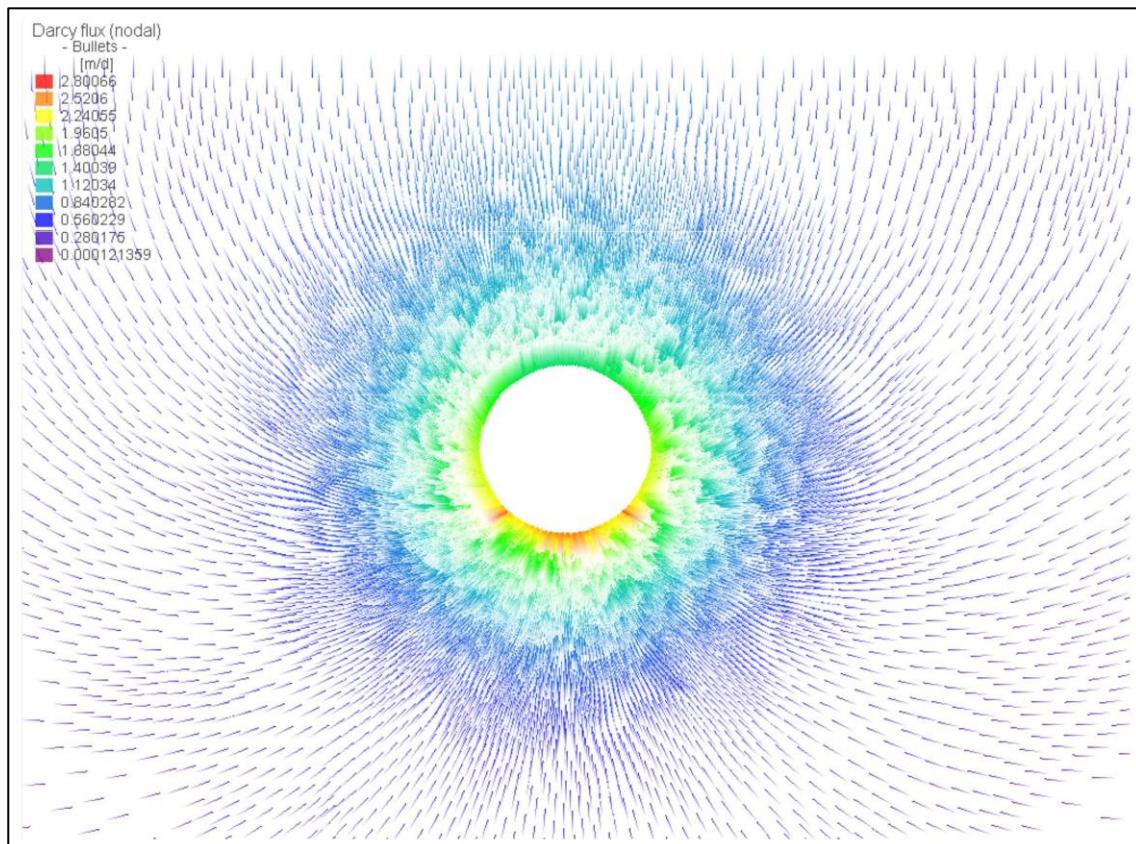


Figura 3-4. Resultados en régimen estacionario: Líneas de flujo.

$$Q_{\text{tunnel inflow}} = 29.3 \text{ m}^3/\text{day}/\text{m}$$

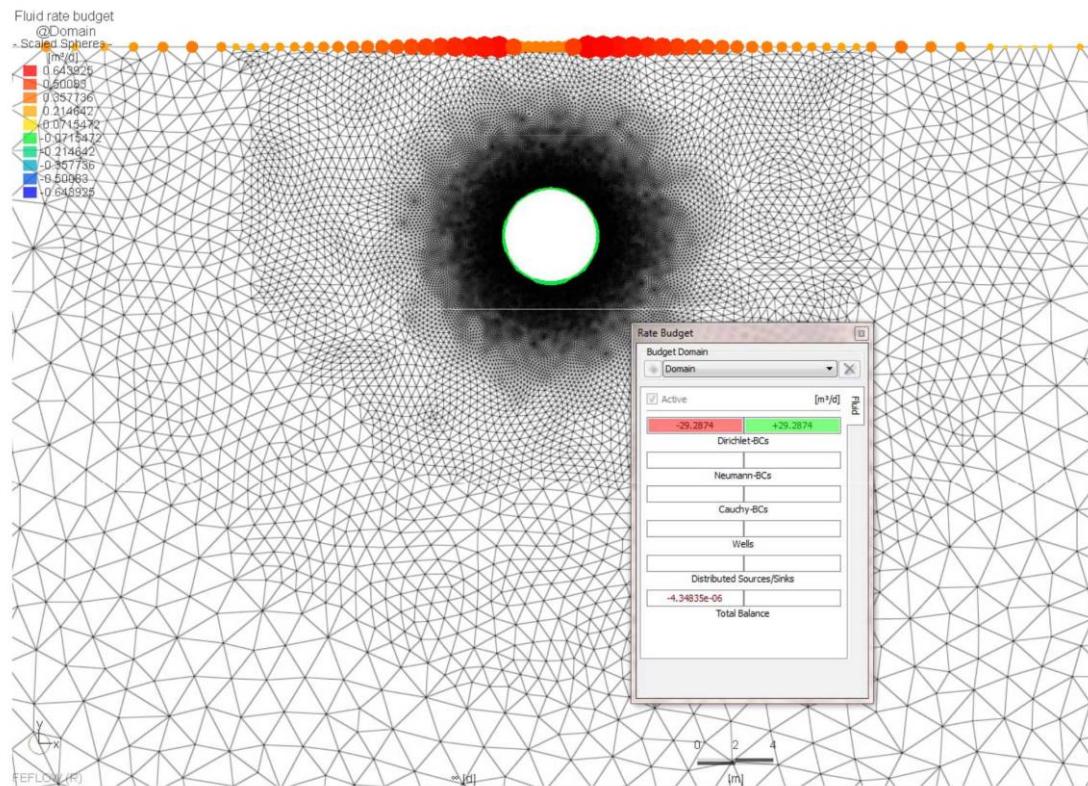


Figura 3-5. Resultados en estado estacionario: caudal específico de ingreso al túnel.

El resultado obtenido mediante métodos numéricos ($29.3 \text{ m}^3/\text{d}/\text{m}$) tiene buena coincidencia con el de la solución analítica de Lei ($30.5 \text{ m}^3/\text{d}/\text{m}$), 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 Lama. **Se aclara que lo expuesto es una prueba conceptual y por lo tanto los caudales obtenidos no son los que infiltran al túnel Lama. Los caudales estimados para el túnel Lama están en la sección 3.4.**

3.3 Efecto del shotcrete en los caudales de infiltración

Se ha reportado en diversos trabajos sobre tunelería en macizos rocosos (e.g. Bäckblom, 2002) que el cementado en túneles en zonas permeables ($10^{-4} - 10^{-5} \text{ m/s}$) puede reducir la conductividad hidráulica hasta valores en el orden de 10^{-9} m/s y los caudales específicos pueden disminuir hasta un 1% por mes. El túnel Lama presenta un revestido de hormigón proyectado (shotcrete) en al menos la mitad de su perímetro, el cual se aplica inmediatamente después del avance en la excavación. Por este motivo, se estima que puede haber una importante reducción del caudal de infiltración. Para cuantificar este efecto, se realizó una prueba conceptual que consiste en confeccionar un modelo numérico 2D (sección) muy simplificado en el cual se impermeabiliza (condición de borde con $Q = 0$) la mitad superior del perímetro del túnel. Las figuras siguientes resumen los parámetros utilizados para la simulación numérica y sus resultados.

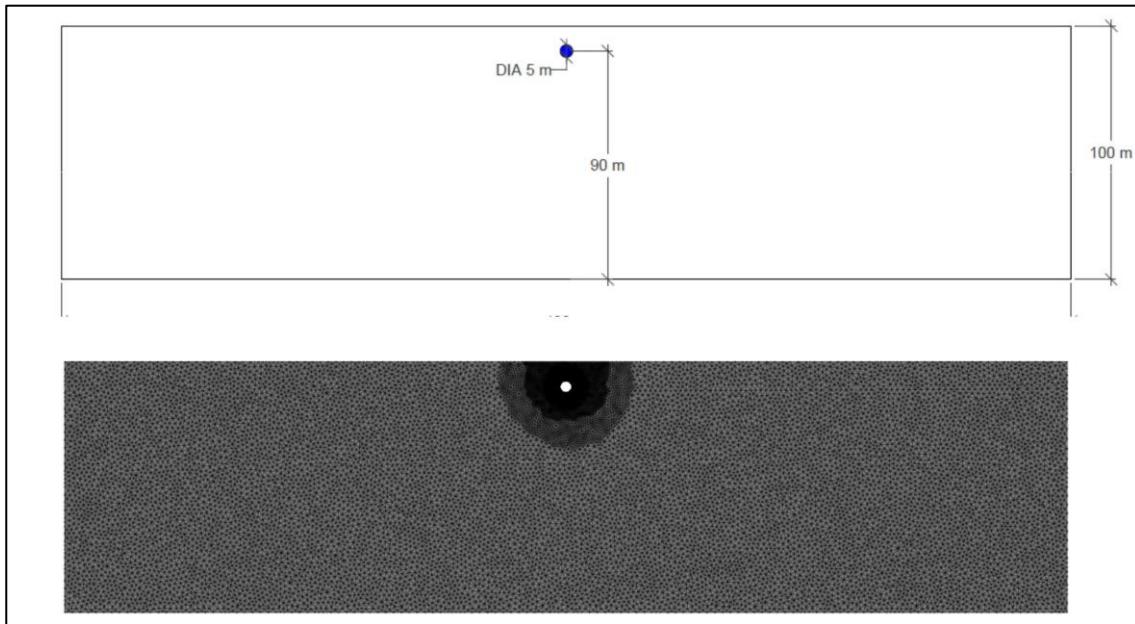


Figura 3-6. Dimensiones del dominio del modelo numérico y malla de elementos finitos.

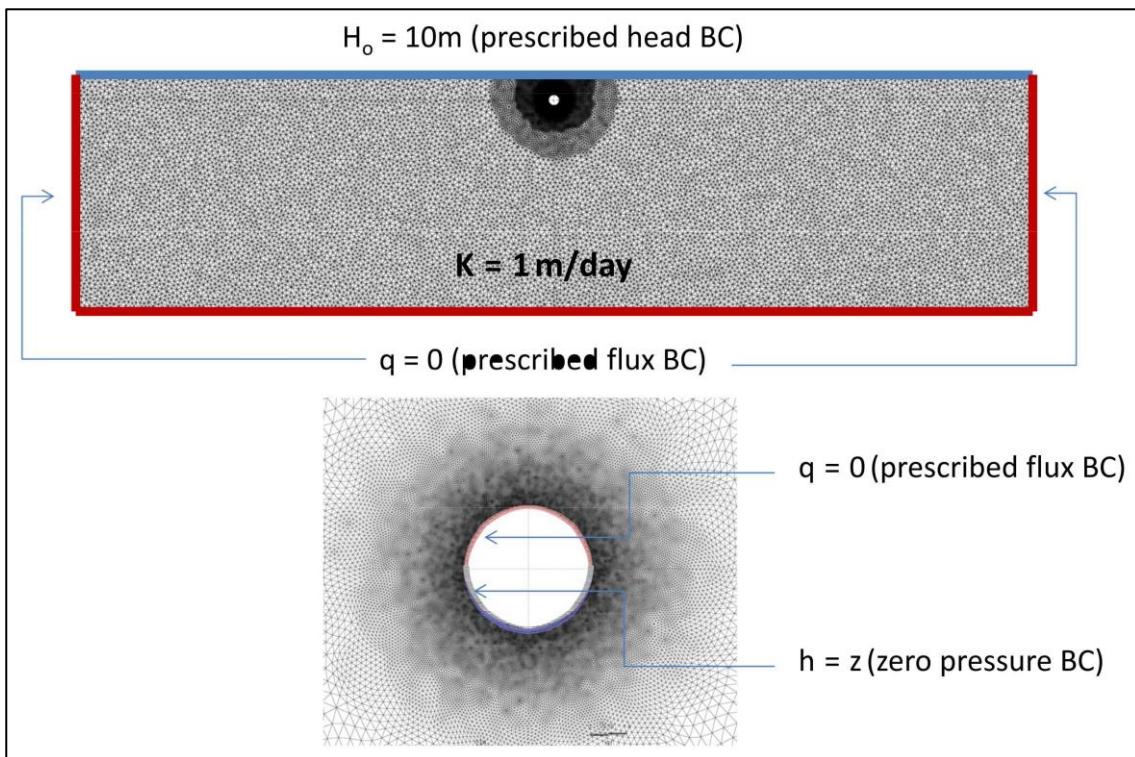


Figura 3-7. Condiciones de borde y propiedades de los materiales.

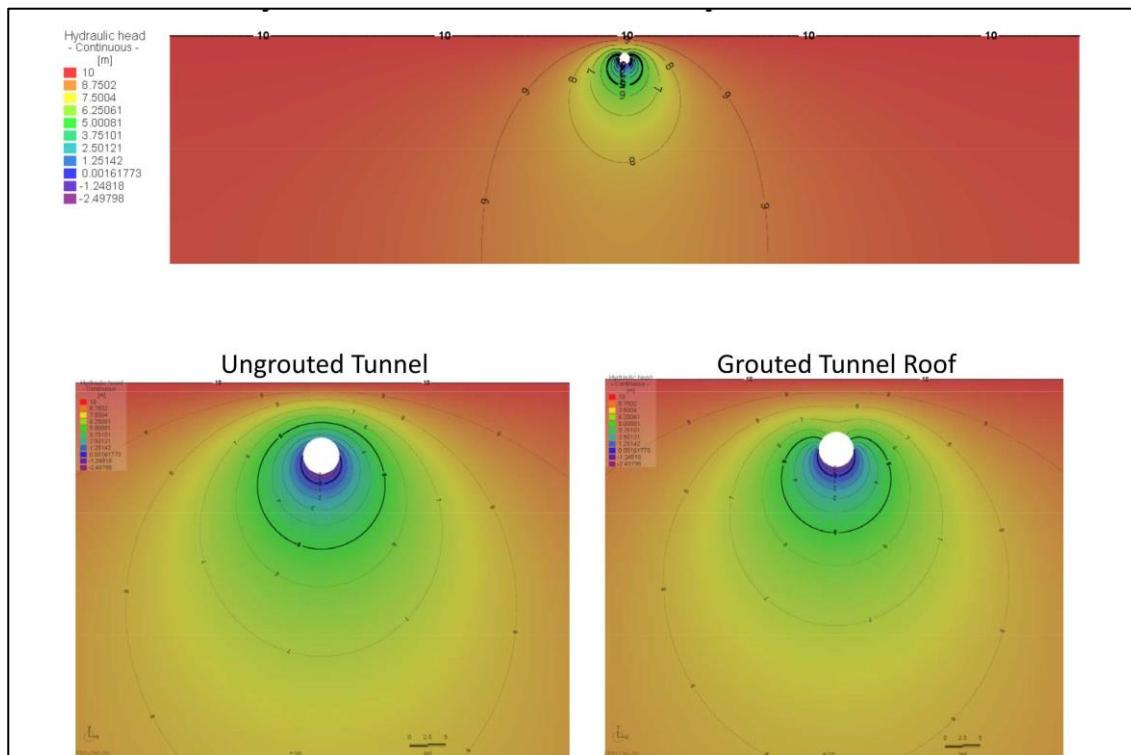


Figura 3-8. Resultados en régimen estacionario: flexión de las superficies equipotenciales al impermeabilizar la mitad superior del perímetro del túnel.

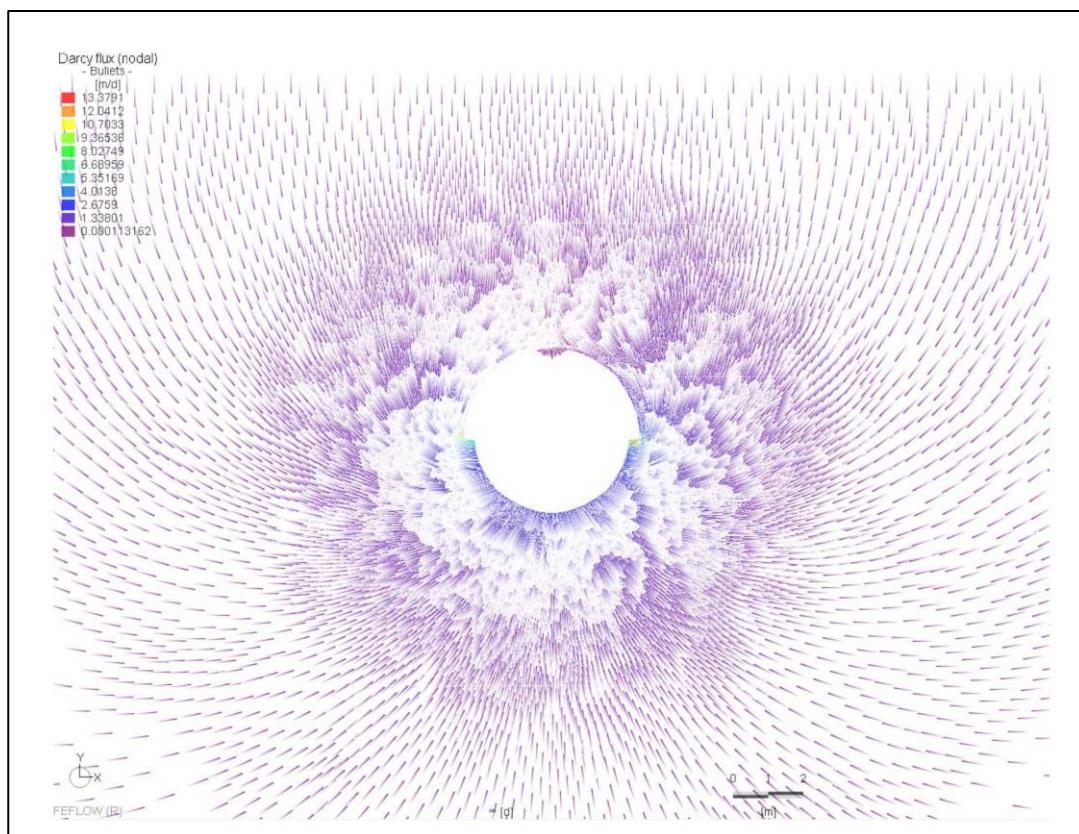


Figura 3-9. Resultados en régimen estacionario: distribución de las líneas de flujo al impermeabilizar la mitad superior del perímetro del túnel.

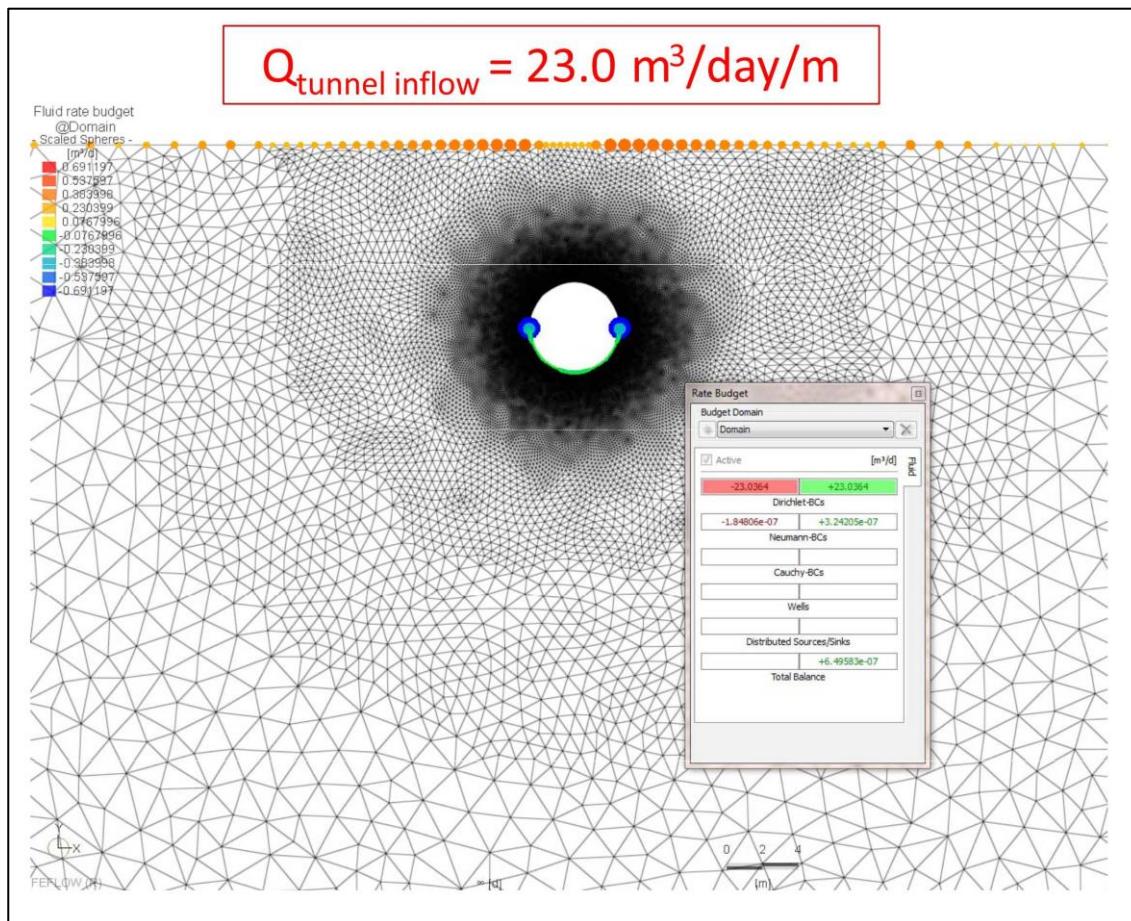


Figura 3-10. Resultados en régimen estacionario: caudal específico de ingreso a túnel grouteado.

Dado que las condiciones iniciales de la simulación son exactamente las mismas que en la sección 3.2.3, los resultados son totalmente comparables. La simulación simplificada 2D en FEFLOW muestra que efectivamente existe una importante flexión de las superficies equipotenciales, desviación de las líneas de flujo subterráneo y consecuente disminución del caudal de infiltración al túnel cuando se simula el “efecto shotcrete” al impermeabilizar la mitad superior del perímetro del túnel. Al comparar estos resultados con la simulación numérica y soluciones analíticas en túnel sin cementar, se observa una reducción del caudal específico de alrededor del 25%.

3.4 Estimaciones analíticas de caudal

En la presente sección se aplica la solución analítica de Lei (1999) para estimar caudales máximos y mínimos de infiltración.

3.4.1 Caudales medidos en el túnel

Desde el mes de agosto de 2012, SRK ha llevado a cabo la medición periódica de los caudales de infiltración, los cuales se infiltran al túnel por zonas de alta conductividad hidráulica, 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 sin cuello.

La Figura 3-11 muestra un gráfico de los caudales registrados desde agosto de 2012 hasta fines de noviembre de 2013. En el gráfico se observa claramente una tendencia general de aumento del caudal de infiltración desde 32l/s en agosto de 2012 hasta valores en el orden de 120l/s en junio/julio de 2013 y luego una tendencia decreciente hasta valores en el orden de 70l/s medidos recientemente. 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 excavarse “en seco”, es decir que el acuífero 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. Se estima que los aumentos del caudal de infiltración no serán de gran importancia, ya que éstos dependerán de la recarga del acuífero frente a la descarga del túnel. Como ya se mostró en la Figura 2-4, la estabilización de los caudales de infiltración fue acompañada con la estabilización del nivel saturado apenas por encima del túnel.

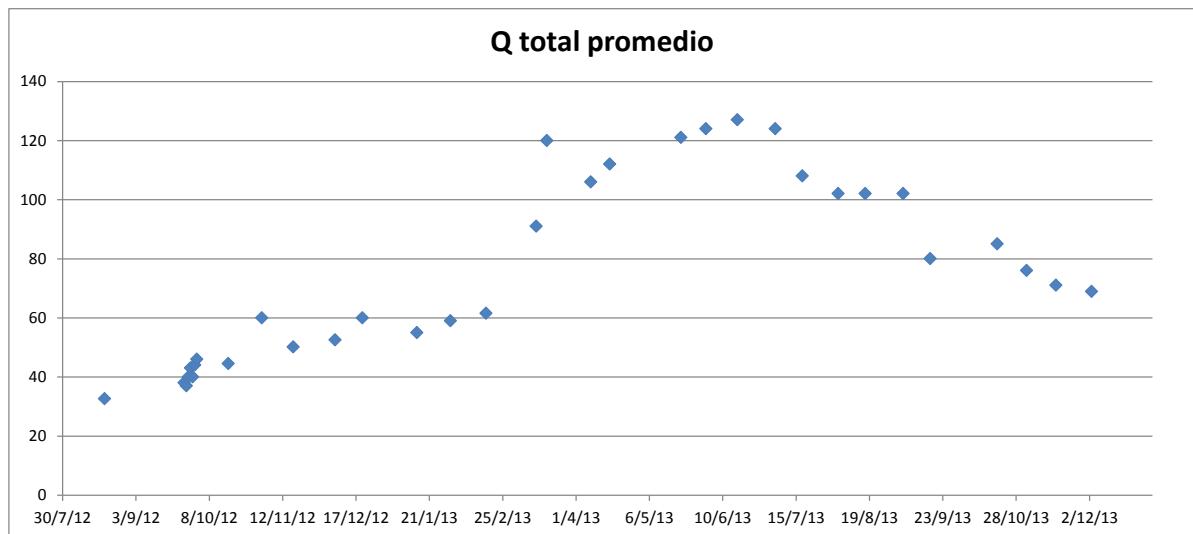


Figura 3-11. Caudales totales medidos en el portal del túnel entre agosto de 2012 y noviembre de 2013.

3.4.2 Escenarios conceptuales y estimaciones analíticas

Para las estimaciones analíticas se aplicó la fórmula de Lei (1999) simplificada, la cual fue definida en la sección 2.2:

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

En base a las conductividades hidráulicas estimadas en la sección 3.1 para las zonas de falla, se utilizó un valor promedio de conductividad hidráulica mínima de $1,10E-05\text{m/s}$ ($0,95\text{m/d}$) y un máximo promedio de $1,41E-05\text{m/s}$ ($1,22\text{m/d}$), y es solamente con estos valores con los que se llevaron a cabo estimaciones analíticas. Las conductividades hidráulicas para el resto del macizo fueron asumidas en el orden de $10E-09\text{m/s}$ y $10E-10\text{m/s}$, en base a ensayos Lugeon supervisados por Golder.

El radio fue de 3m y se tomó una altura piezométrica promedio de 2m para todo el túnel saturado, en base a los niveles de agua en los sondajes.

En base a la geología e hidrogeología del sector, ambas descriptas en las secciones 2.1 y 2.2, se plantearon los siguientes escenarios para las estimaciones de caudal:

Escenario 1; Túnel dividido en zonas de infiltración (ver Figura 2-4). La zona de infiltración alta tiene un ancho total de 210m. 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 430m 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. La zonas de infiltración baja tiene 140m 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 247m 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 3-3.

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

QminT/max 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

Tabla 3-3. Cálculos analíticos de caudales aplicando la fórmula de Lei (1999) para el túnel Lama.

3.4.3 Estimación de la incertidumbre

Previo a llevar a cabo una estimación de la incertidumbre de los resultados analíticos deben tenerse en cuenta los siguientes supuestos cuya incertidumbre no puede ser cuantificada:

- Se asume un nivel saturado promedio a 2m por encima del túnel en base a observaciones de terreno y proyección desde escasos piezómetros, sin contar con mediciones directas en los sectores de interés.
- Se asume un radio invariable del túnel de 3m para las zonas de falla y de alta infiltración, sin tener en cuenta sobreexcavaciones ni estocadas.

- No se consideraron errores de apreciación en las mediciones de abertura y espaciamiento de discontinuidades.
- Se calcula un valor de conductividad hidráulica para cada punto de medición, por lo cual no se considera la desviación estándar de todas las mediciones de abertura y espaciamiento de discontinuidades ni su sensibilidad en la fórmula de K.

Por lo expuesto, el margen de error que se estima a continuación solamente está basado en la desviación estándar de los valores de conductividad hidráulica obtenidos para cada punto (26 valores) y se considera que representa el mínimo posible. De acuerdo con los resultados de la cuarta y quinta columna de la Tabla 3-2, se estimaron los siguientes márgenes de error.

Conductividad hidráulica máxima.

En la sección 3.1, la conductividad hidráulica máxima se calculó en base a un coeficiente de rugosidad de 3,2, resultando en valores dispersos entre 1,03E-07m/s y 8,10E-05m/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): 1,41E-05m/s
- Intervalo de confianza: 90%
- Coeficiente t: 1,7081 (para un nivel de significancia de 0,1 y n-1=25)
- Desviación estándar (s): 2,00E-05
- Margen de error calculado¹: 0,67E-05m/s (47% de la media)

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

$$K_{\max} = (1,41 \pm 0,67) \text{E-05m/s}$$

Conductividad hidráulica mínima

En la sección 3.1, la conductividad hidráulica mínima se calculó en base a un coeficiente de rugosidad de 4,1, resultando en valores dispersos entre 8,03E-08m/s y 6,32E-05m/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): 1,10E-05m/s
- Intervalo de confianza: 90%
- Coeficiente t: 1,7081 (para un nivel de significancia de 0,1 y n-1=25)
- Desviación estándar (s): 1,60E-05
- Margen de error calculado: 0,54E-05m/s (49% de la media)

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

$$K_{\max} = (1,10 \pm 0,54) \text{E-05m/s}$$

Incertidumbre en los caudales estimados

Teniendo en cuenta los supuestos listados al principio de esta sección 3.4.3, 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. Por lo tanto, en base a la Tabla 3-3, los valores de caudales con la estimación de su incertidumbre mínima quedan como sigue:

- Caudal mínimo sin *shotcrete*:
 - En base a zonas de infiltración: $89,47 \pm 43,84 \text{ l/s}$
 - En base a zonas de falla: $97,03 \pm 47,54 \text{ l/s}$
- Caudal mínimo con *shotcrete* (50% del perímetro):
 - En base a zonas de infiltración: $67,10 \pm 32,88 \text{ l/s}$

¹ Margen de error = $t(s/n^{1/2})$

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

- En base a zonas de falla: $72,77 \pm 35,66$ l/s
- Caudal máximo sin *shotcrete*:
 - En base a zonas de infiltración: $114,90 \pm 54,00$ l/s
 - En base a zonas de falla: $124,61 \pm 58,57$ l/s
- Caudal máximo con *shotcrete* (50% del perímetro):
 - En base a zonas de infiltración: $86,17 \pm 40,50$ l/s
 - En base a zonas de falla: $93,45 \pm 43,92$ l/s

Es evidente que los errores propagados desde los cálculos de conductividad hidráulica (47-49%) generan amplios intervalos de incertidumbre en el orden de 60-100l/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.

3.5 Modelo Numérico 3D de Flujo de Agua Subterránea

Con el objetivo de contar con una herramienta adicional que permita estimar en forma gruesa el flujo de infiltración al túnel que alojará la correa de transporte de mineral durante su vida útil, se ha construido un modelo numérico de flujo tridimensional que recrea las condiciones hidrogeológicas basadas en el modelo conceptual confeccionado con anterioridad 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 o de equilibrio 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.

Considerando que la excavación del túnel se inició en agosto de 2011, la información de control de niveles existente es reducida y limita la interpretación del efecto de la recarga desde los cuerpos de agua superficiales hacia el túnel y su entorno. Si bien la carencia de información reducirá el nivel de certeza de las predicciones que se realicen con esta herramienta, resulta una herramienta válida dentro de un rango razonable de caudales de infiltración al túnel y el efecto en su entorno.

3.5.1 Supuestos y Consideraciones de la Simulación

Se ha utilizado para la modelación 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.
- Las zonas de infiltración diferenciadas en el túnel han sido incorporadas como unidades con diferentes parámetros hidráulicos. Estas zonas han sido proyectadas en la dirección perpendicular al túnel. La Figura 3-12 (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.

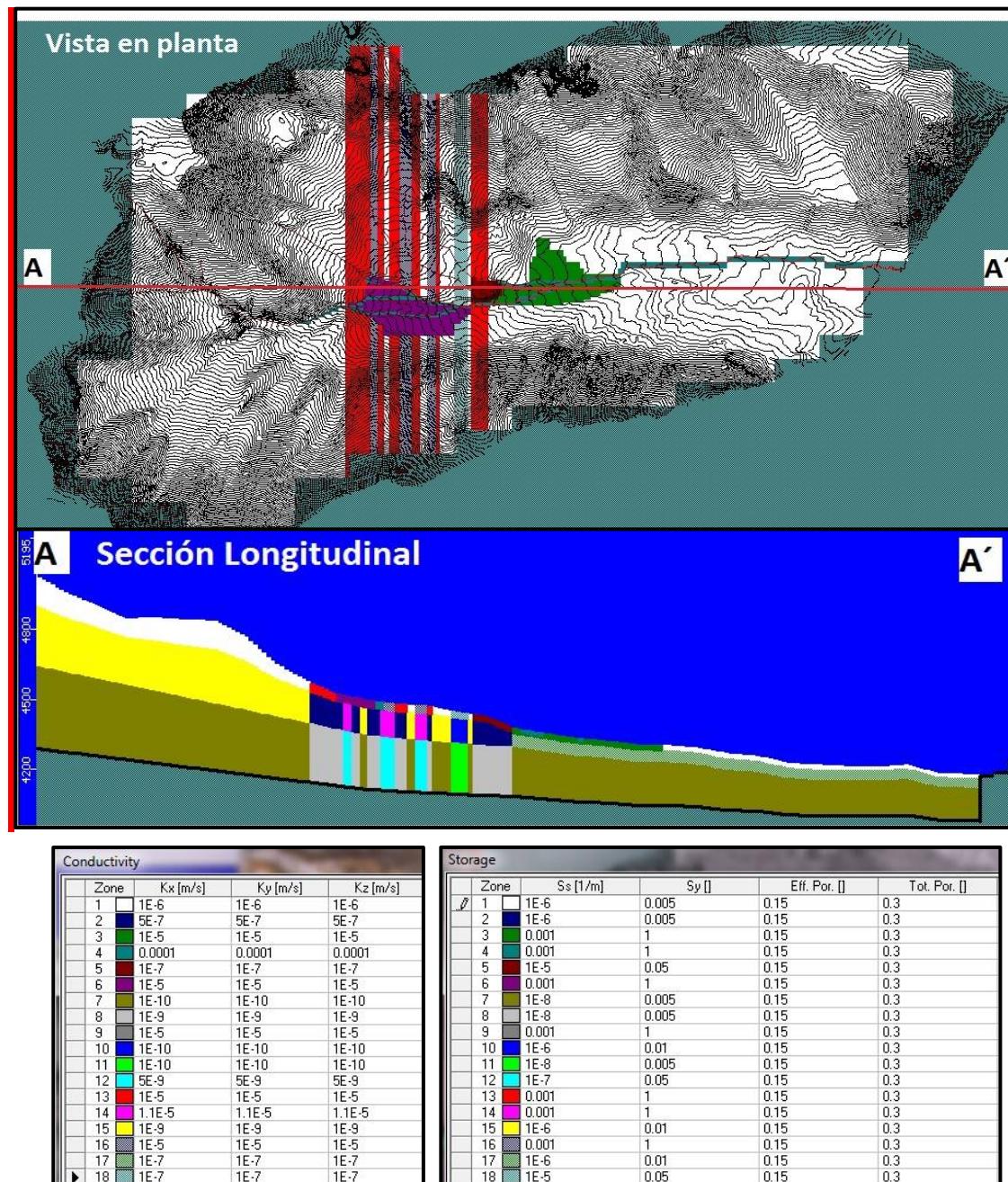


Figura 3-12. Distribución de zonas de conductividad en planta y perfil. Las zonas 3, 4, 5 y 6 corresponden a zonas de relleno sedimentario.

Se ha asumido un acuífero isotrópico $K_h=K_v$.

- La recarga ocurre solo a través del río Turbio y sus afluentes principales. La Figura 3-13 muestra la representación de estos cursos en el modelo. 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.

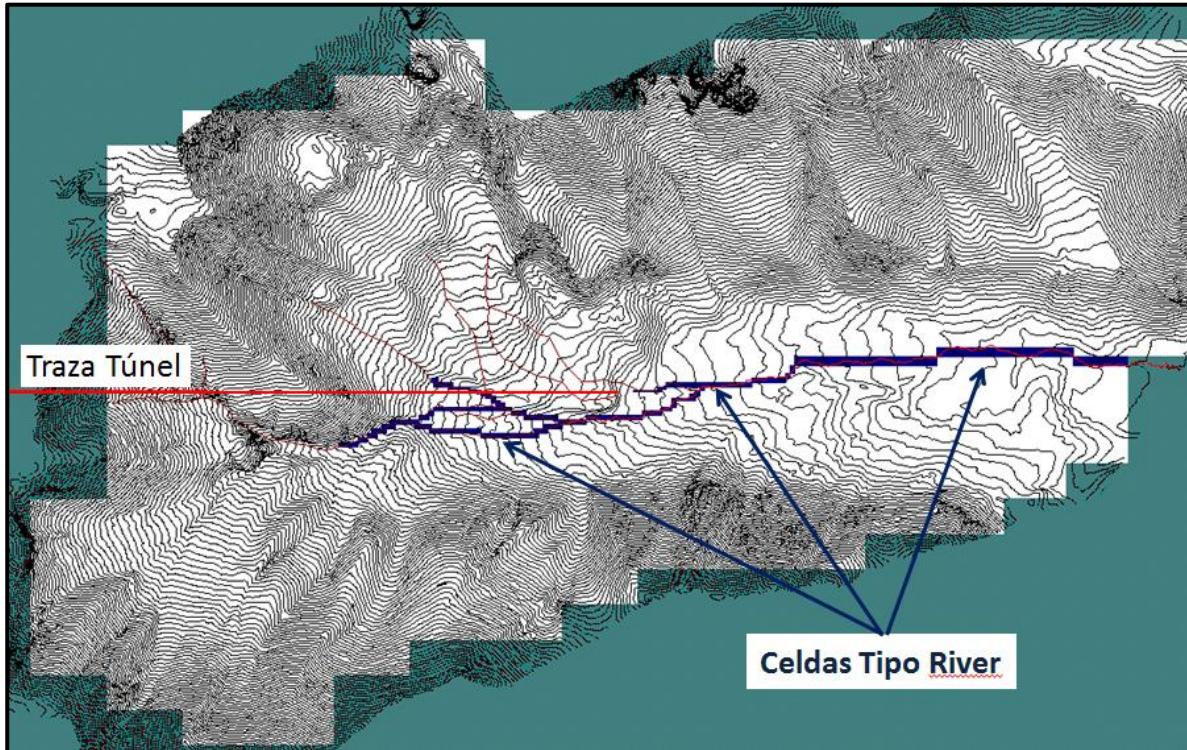


Figura 3-13. Representación de la recarga desde los cursos de agua superficiales mediante celdas de tipo RIVER.

- 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 distribución de las celdas de DRAIN se puede apreciar en la Figura 3-14.

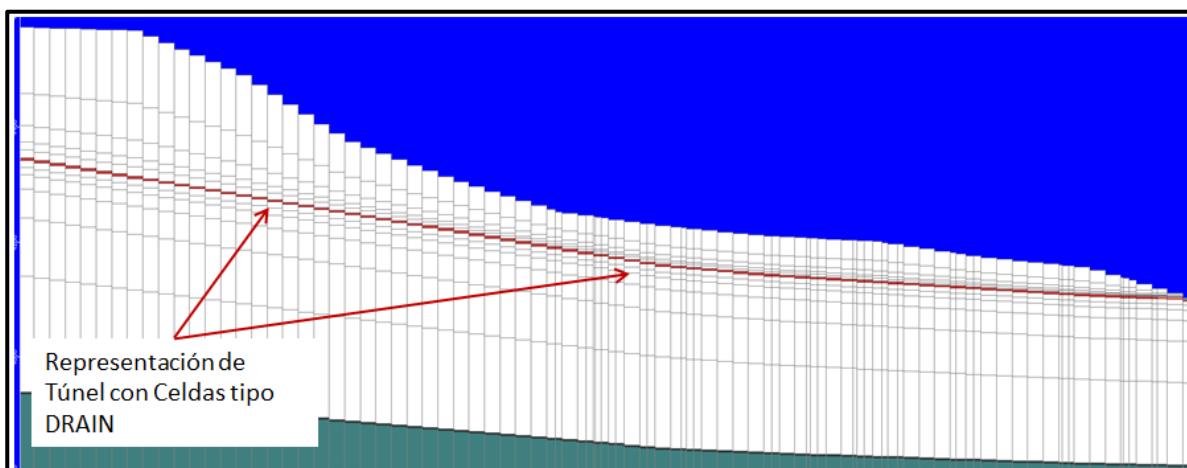


Figura 3-14. Representación de Excavación del Túnel con Celdas tipo DRAIN.

- La calibración en estado estacionario, previo a la construcción del túnel se realizó utilizando los niveles fráticos 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. Los niveles utilizados para la calibración se muestran en la Tabla 3-4.

	Cota y muerto	4343.53	0.96	Cota y muerto	4243.63	0.41	Cota y muerto	4206.53	Cota Terreno y muerto	4174.22	Cota y muerto	4140.73	Cota y muerto	4197.20	0.86			
	Inclinacion (*)	70	Mina	Inclinacion	55	mina	Inclinacion	55	Inclinacion	55	Inclinacion	65	Inclinacion	90	Mina			
	Este (UTM)	403774.37	30854.05	Este (UTM)	404099.48	31179.46	Este (UTM)	404369.72	Este (UTM)	404789.03	Este (UTM)	404990.70	Este (UTM)		30854.05			
	Norte (UTM)	6756196	79979	Norte (UTM)	6756065.17	79849	Norte (UTM)	6755950.18	Norte (UTM)	6755780.41	Norte (UTM)	6755693.44	Norte (UTM)		79979			
	GTDH05-04B (*)			GTDH06-01			GTDH06-02			GTDH06-03			GTDH06-04A					
Fecha	Nivel m b.n.t.	Nivel corregido	Cota nivel m.s.n.m	Nivel m b.n.t.	Nivel corregido	Cota nivel m.s.n.m	Nivel m b.n.t.	Nivel corregido	Cota nivel m.s.n.m	Nivel m b.n.t.	Nivel corregido	Cota nivel m.s.n.m	Nivel m b.n.t.	Nivel corregido	Cota nivel m.s.n.m			
04-01-2007				9.90	8.11	4235.52			29.25	23.96	4150.26			25.00	25.00	4172.20		
05-01-2007				28.30	23.18	4220.45			28.65	23.47	4150.75							
05-01-2007				27.90	22.85	4220.78												
06-01-2007				27.93	22.88	4220.75			28.10	23.02	4151.20							
06-01-2007				28.20	23.10	4220.53			28.00	22.94	4151.28							
07-01-2007				28.10	23.02	4220.61			27.55	22.57	4151.65							
07-01-2007	108.23	101.70	4241.83	28.21	23.11	4220.52	8.00	6.55	4199.98	27.32	22.38	4151.84						
12-01-2007				27.60	22.61	4221.02	3.11	2.55	4203.98	23.62	19.35	4154.87						
13-01-2007				27.59	22.60	4221.03	3.09	2.53	4204.00	23.67	19.39	4154.83						
14-01-2007	105.20	98.86	4244.67	27.58	22.59	4221.04	2.88	2.36	4204.17	23.59	19.32	4154.90						
15-01-2007				27.49	22.52	4221.11	2.87	2.35	4204.18	23.05	18.88	4155.34						
17-01-2007				27.03	22.14	4221.49	2.25	1.84	4204.69	22.56	18.48	4155.74						
18-01-2007	110.28	103.63	4239.90	27.38	22.43	4221.20	2.31	1.89	4204.64	23.19	19.00	4155.22						
19-01-2007	109.07	102.49	4241.04	27.26	22.33	4221.30	2.07	1.70	4204.83	23.24	19.04	4155.18						
20-01-2007	108.97	102.40	4241.13	27.15	22.24	4221.39	1.80	1.47	4205.06	23.47	19.23	4154.99						
21-01-2007	99.28	93.29	4250.24	26.74	21.90	4221.73	1.70	1.39	4205.14	23.90	19.58	4154.64						
22-01-2007																		
23-01-2007				26.40	21.63	4222.00	1.34	1.10	4205.43	24.24	19.86	4154.36	42.87	38.85	4101.88			
24-01-2007				26.40	21.63	4222.00	1.33	1.09	4205.44	24.27	19.88	4154.34	43.73	39.63	4101.10			
25-01-2007	105.50	99.14	4244.39	26.38	21.61	4222.02	1.22	1.00	4205.53	24.71	20.24	4153.98	43.26	39.21	4101.52			
26-01-2007	105.50	99.14	4244.39	26.10	21.38	4222.25				25.12	20.58	4153.64	43.05	39.02	4101.71			
27-01-2007																		
28-01-2007	105.50	99.14	4244.39							25.15	20.60	4153.62	46.03	41.72	4099.01			
29-01-2007																		
30-01-2007	105.46	99.10	4244.43	25.77	21.11	4222.52	0.29	0.24	4206.29	25.27	20.70	4153.52	43.05	39.02	4101.71			
31-01-2007	105.58	99.21	4244.32	25.71	21.06	4222.57	0.24	0.20	4206.33	25.29	20.72	4153.50	4.31	3.91	4136.82			
01-02-2007	105.63	99.26	4244.27	25.65	21.01	4222.62	0.17	0.14	4206.39	25.35	20.77	4153.45	43.15	39.11	4101.62			
02-02-2007	105.66	99.29	4244.24	25.59	20.96	4222.67	0.11	0.09	4206.44	25.34	20.76	4153.46	43.03	39.00	4101.73			
03-02-2007																		
04-02-2007	105.81	99.43	4244.10	25.48	20.87	4222.76	-0.05	-0.04	4206.57	25.35	20.77	4153.45	42.85	38.84	4101.89			
05-02-2007	105.83	99.45	4244.08	25.48	20.87	4222.76	-0.07	-0.06	4206.59	25.33	20.75	4153.47	42.99	38.96	4101.77			
16-12-2012				40.86	33.47	4210.16								67.00	67.00	4130.20		
09-01-2013	107.00	100.55	4242.98	41.25	33.79	4209.84								66.91	66.91	4130.29		
22-01-2013	107.00	100.55	4242.98	41.27	33.81	4209.82								66.93	66.93	4130.27		
03-02-2013	107.36	100.88	4242.65	40.82	33.44	4210.19	64.91	53.17	4153.36					66.89	66.89	4130.30		
04-03-2013				40.66	33.31	4210.32	64.91	53.17	4153.36					66.77	66.77	4130.42		
Promedio	106.27	99.86	4243.67	28.65	23.47	4220.16	7.83	6.42	4200.11	25.18	20.62	4153.60	39.85	36.11	4104.62	59.92	59.92	4137.28

Tabla 3-4. Niveles medidas para el período 2007-2013.

- 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 ha simulado 3 escenarios predictivos que consideran lo siguiente:
 - a) Escenario 0: Caso Base: Implica solo la proyección en el tiempo de las condiciones actuales de operación
 - b) Escenario 1: Incluye el efecto del *shotcrete* aplicado en la mitad superior del túnel
 - c) Escenario 2: Agrega el efecto de un año de precipitaciones más abundante, considerando una recarga adicional para el período estival del año 2022.

3.5.2 Resultados

Los resultados de las diferentes etapas del modelo se presentan a continuación.

Calibración Estacionaria

El resultado de la calibración estacionaria se muestra en la Figura 3-15.

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 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.

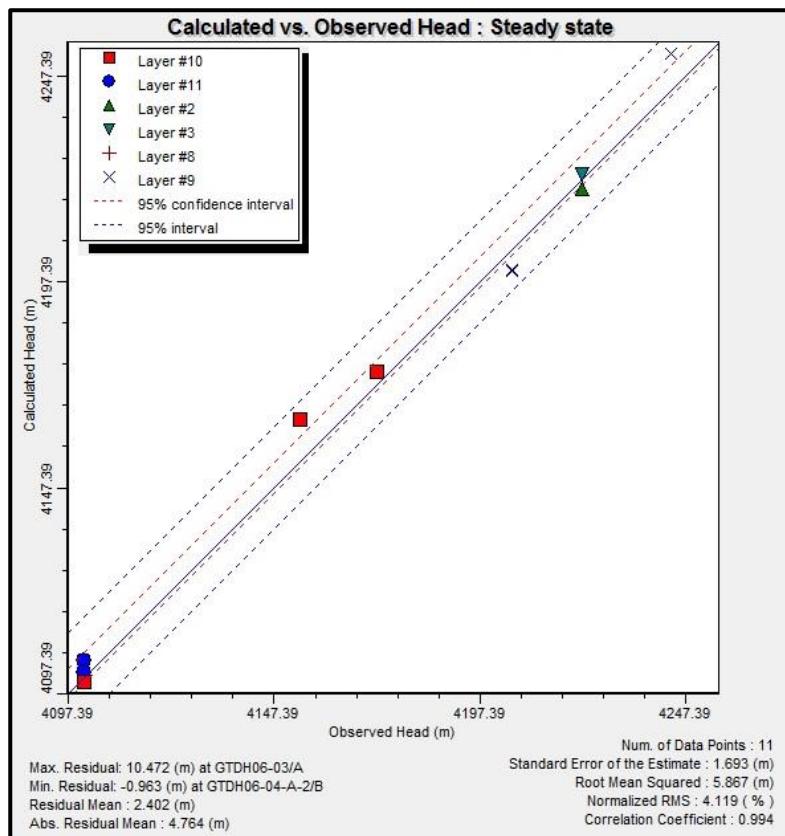


Figura 3-15. Niveles Simulados versus Medidos para Calibración Estacionaria.

Calibración Transitoria

Los niveles calibrados en estado transitorio se pueden apreciar en la Figura 3-16.

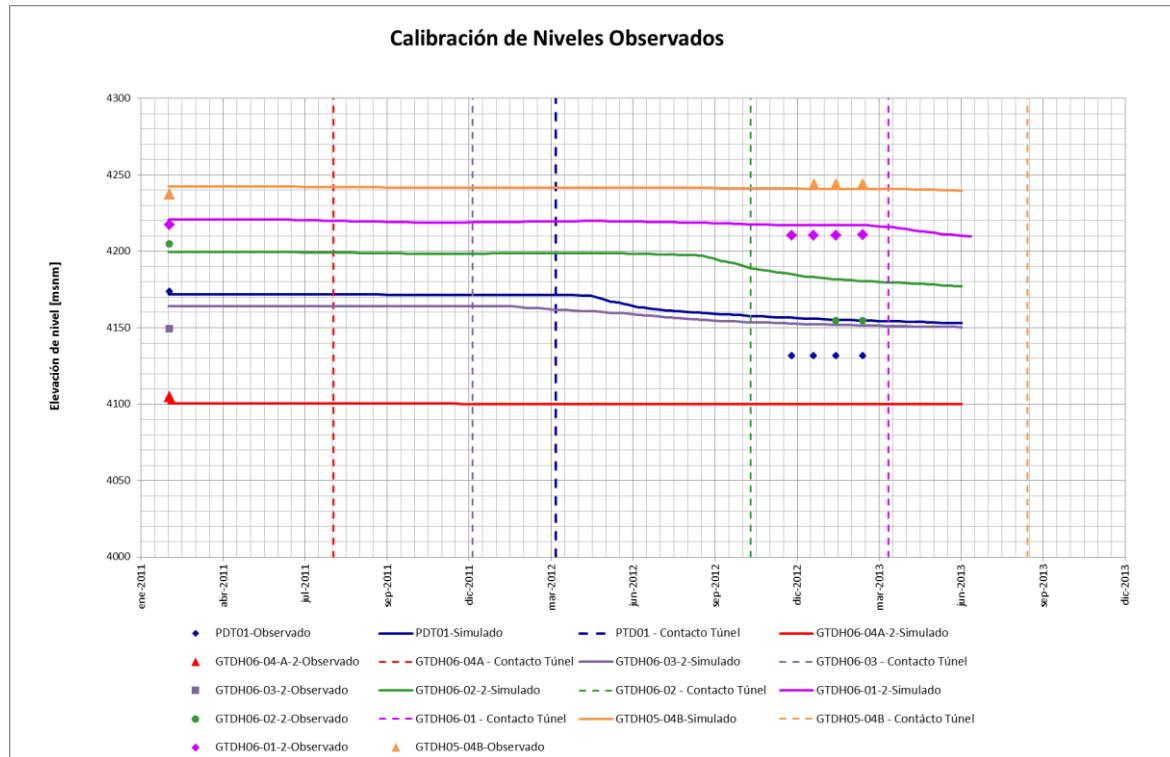


Figura 3-16. Niveles Simulados versus Medidos para Calibración Transiente.

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 3-17.

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.

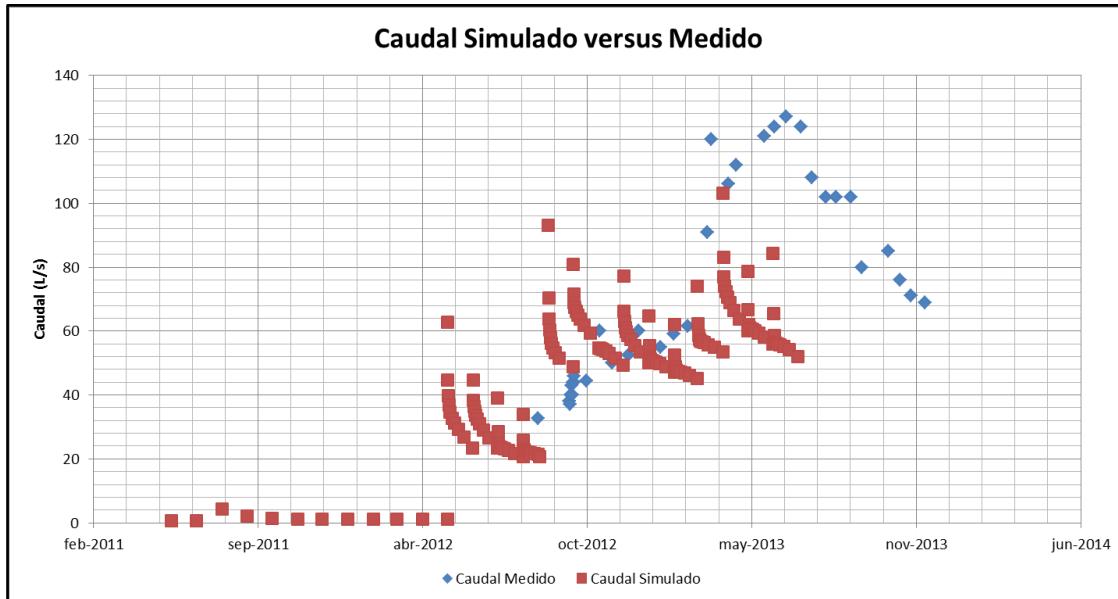


Figura 3-17. Flujo en Túnel simulado versus medido para calibración transiente.

Escenario Predictivo

Escenario Caso Base:

En el gráfico de la Figura 3-18 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.

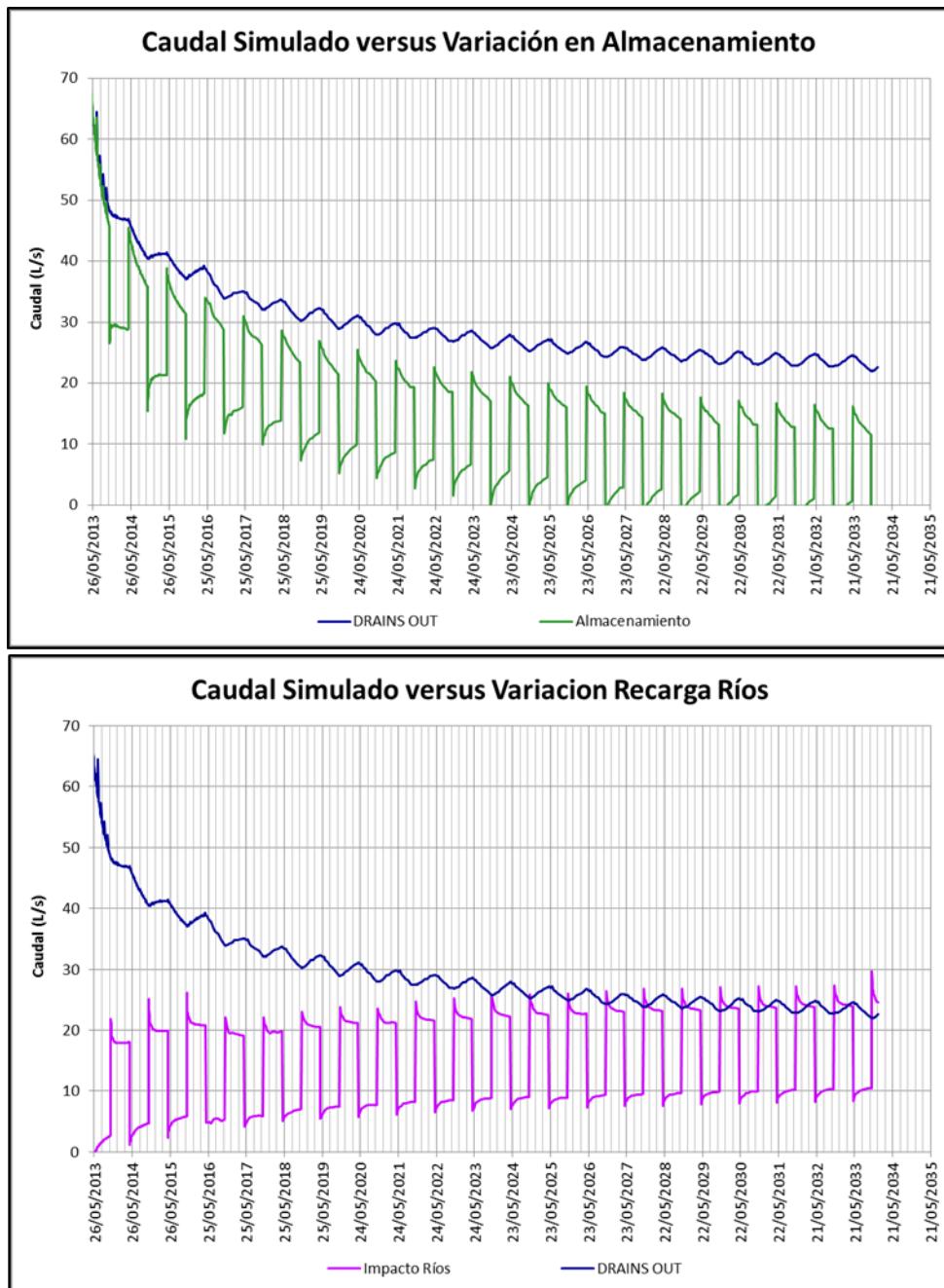


Figura 3-18. Caudal de base simulado para Túnel Lama

Escenario 1: Efecto Shotcrete

En el gráfico de la Figura 3-19 se muestra el caudal de base simulado para las infiltraciones en el túnel y su evolución en el tiempo, bajo el efecto del *shotcrete* en la mitad superior de su perímetro.

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 38 l/s en época de deshielo.

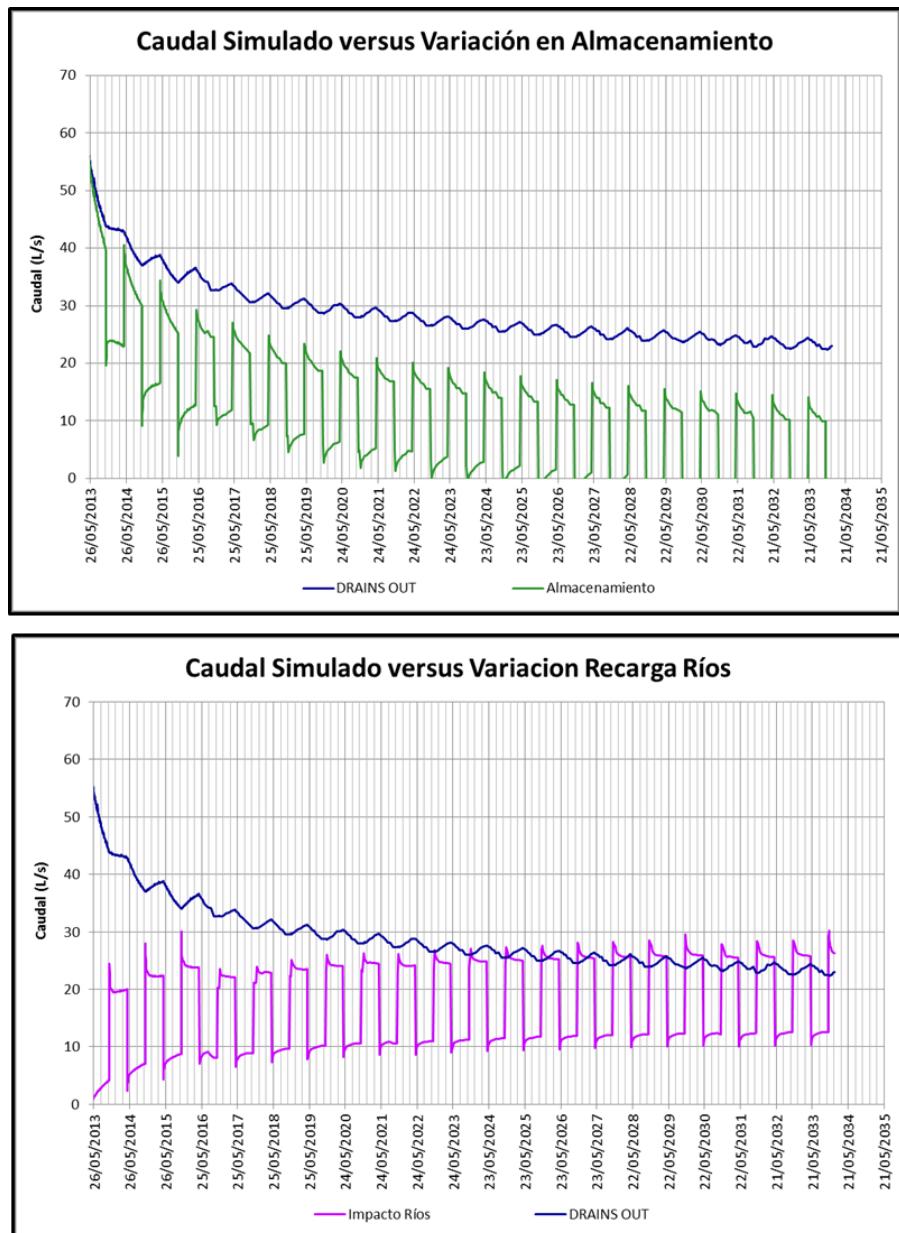


Figura 3-19. Caudal de base simulado para Túnel Lama con Efecto Shotcrete.

El flujo simulado para el túnel en el escenario Caso Base, sin considerar la presencia del *shotcrete*, versus el caudal simulado al impermeabilizar la mitad superior del túnel se muestra en la Figura 3-20.

Se observa una reducción del caudal de infiltración al túnel de alrededor del 25%. Esta disminución se ve reflejada durante el primer período de construcción del túnel, es decir hasta junio de 2012. Luego de 2012 y hasta 2014, la reducción del caudal de infiltración al túnel es de alrededor del 15%. Y luego del 2014 ambos caudales se igualan, con pequeñas variaciones en los períodos estivales.

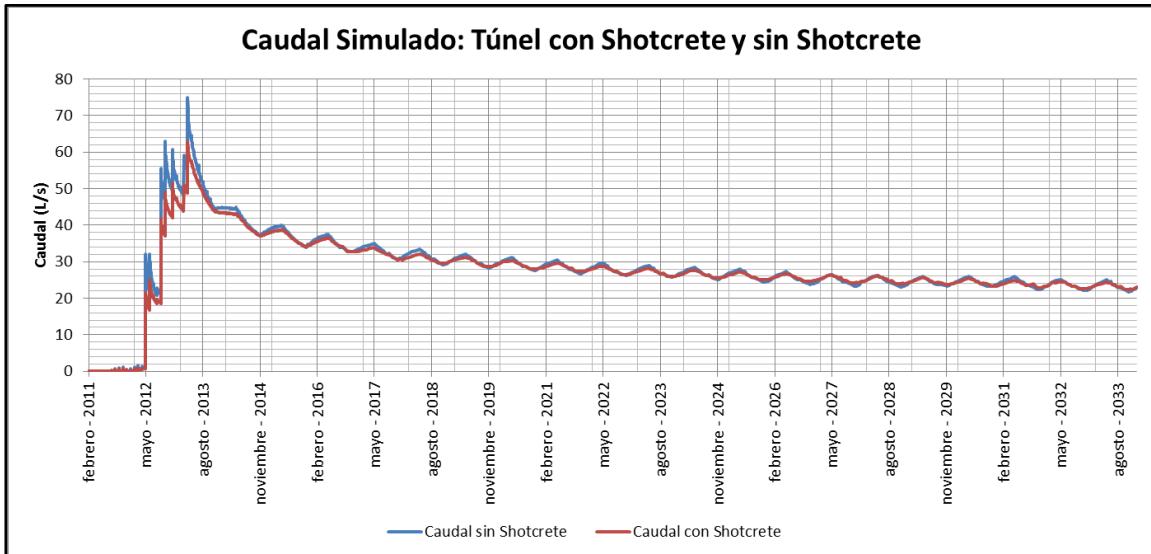


Figura 3-20. Flujo en Túnel sin *shotcrete* versis flujo en Túnel con *Shotcrete* en la mitad superior de su perímetro.

Escenario 2: Efecto Año mayor recarga

En el gráfico de la Figura 3-21 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.

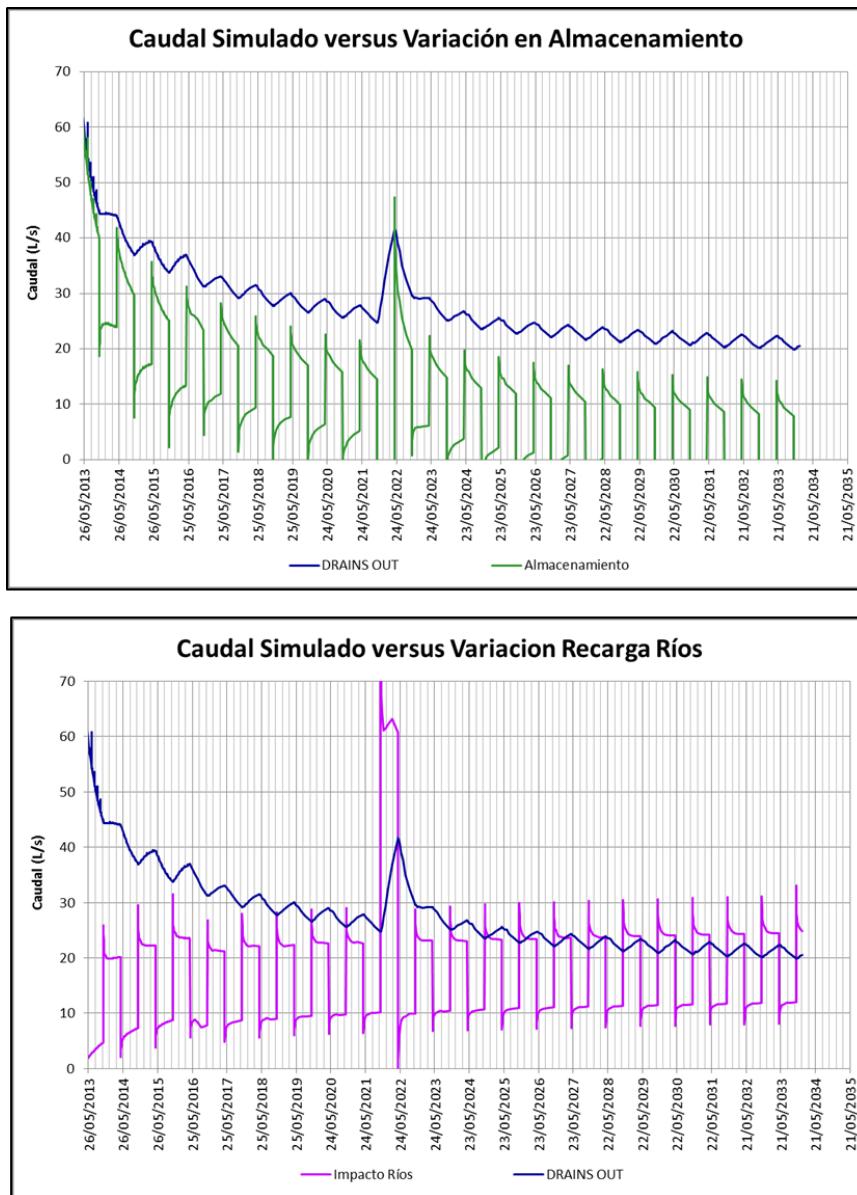


Figura 3-21. Caudal de base simulado para Túnel Lama, considerando una recarga adicional para el período estival 2022.

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 3-22.

Al comparar el caudal de infiltración al túnel durante el período estival del año 2022, considerandolo 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 ingerido de 41 l/s.

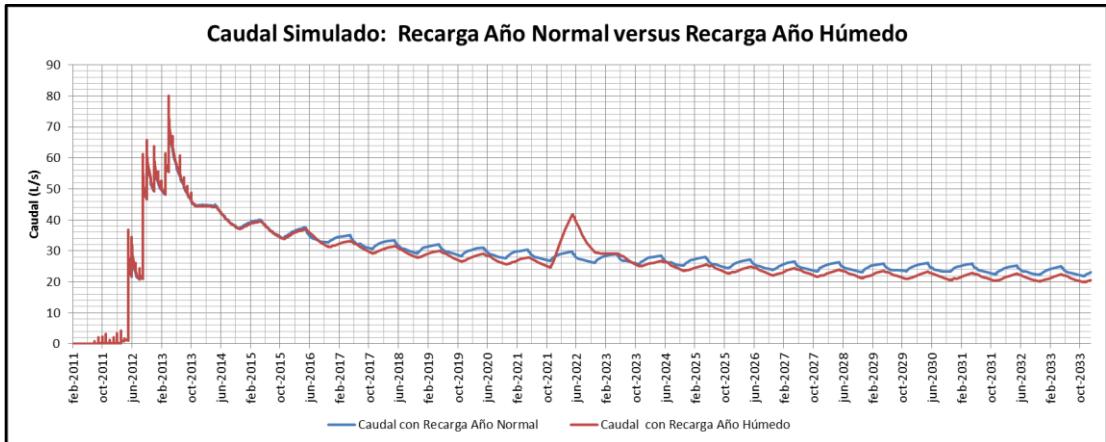


Figura 3-22. Flujo en Túnel simulado considerando Año Normal versus flujo considerando Año Húmedo.

Finalmente se muestra, en la Figura 3-23, la comparación de los caudales simulados que infiltran al túnel para los tres escenarios propuestos.

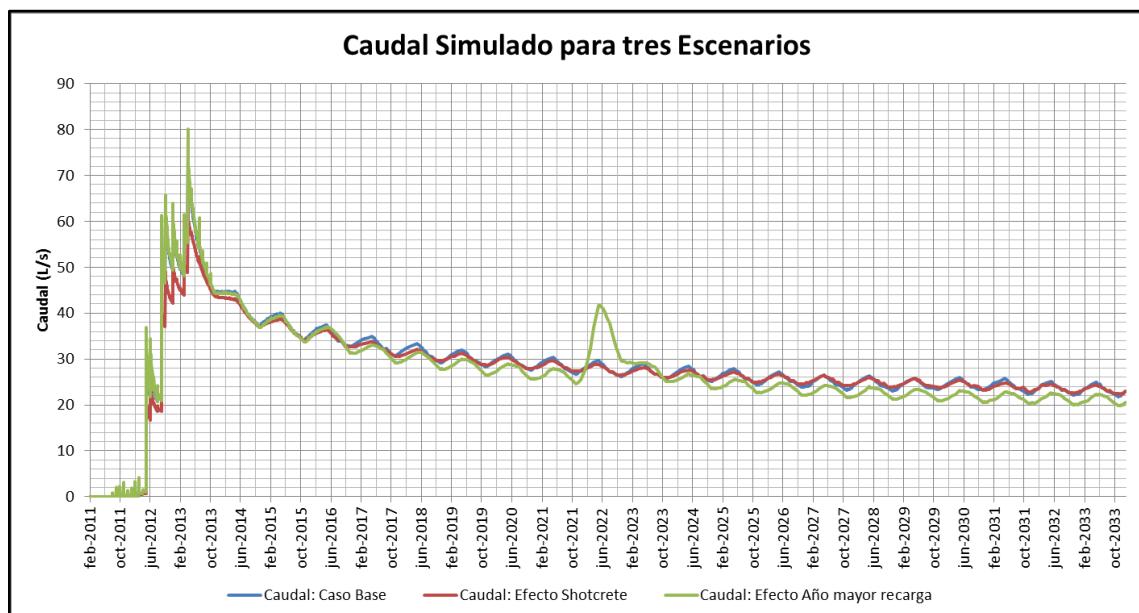


Figura 3-23. Flujo en Túnel simulado para tres escenarios: Caso Base, Efecto Shotcrete, Efecto Año mayor recarga.

4 Conclusiones y Recomendaciones

4.1 Conclusiones

Con el fin de complementar ensayos previos de permeabilidad in situ y estimaciones previas en base a parámetros geomecánicos, se utilizó la abertura y espaciamiento de discontinuidades y se obtuvieron nuevos y más precisos valores de la conductividad hidráulica. En base a 14 puntos de medición a lo largo de toda la porción saturada del túnel, se obtuvo una conductividad hidráulica promedio mínima de 1,10E-05m/s y una promedio máxima de 1,41E-05m/s, con errores porcentuales estimados en 49% y 47% respectivamente.

Las pruebas de concepto demostraron una compatibilidad aceptable entre simulaciones numéricas y las soluciones analíticas de Goodman et al. (1965) y Lei (1999). Se prefirió la solución analítica de Lei (1999), ya que ésta es la que mejor se adapta a la geometría del túnel Lama respecto al macizo rocoso.

Se demostró mediante simulación numérica 2D que al cementar la mitad superior del túnel (impermeabilización del 50% de su perímetro) que el caudal de infiltración residual en régimen estacionario se reduce un 25% respecto al túnel sin cementar. Este “efecto shotcrete” obtenido mediante simulación numérica fue aplicado en las estimaciones analíticas.

Los caudales de infiltración residual estimados mediante la solución de Lei (1999), aunque con rangos amplios, tuvieron una coincidencia aceptable con los caudales medidos en el portal del túnel, cuyo promedio para las últimas 3 quincenas es de 65l/s. Los valores obtenidos mediante soluciones analíticas se resumen como sigue:

- Caudal mínimo sin *shotcrete*: 89,47-97,03l/s
- Caudal mínimo con *shotcrete* (50% del perímetro): 67,10-72,77l/s
- Caudal máximo sin *shotcrete*: 114,90-124,61l/s
- Caudal máximo con *shotcrete* (50% del perímetro): 86,17-93,45l/s
- Rango total sin *shotcrete*: 89,47-124,61l/s
- Rango total con *shotcrete* (50% del perímetro): 67,10-93,45l/s

Sumado a que los rangos expresados son de por sí amplios, debe incorporarse a los resultados los errores de 47-49% propagados desde los cálculos de conductividad hidráulica, lo cual resulta en márgenes de error en el orden de 60-100l/s para cada valor. Por esta razón, las estimaciones analíticas de caudal del presente informe 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.

Sobre la base del trabajo de simulación numérica realizada se puede concluir que:

Para la situación previa a la construcción del túnel se ha logrado reproducir el gradiente hidráulico original y los niveles medidos, por Golder 2007, en los piezómetros para enero 2007. Se obtuvo un error cuadrático medio (RMSE, su sigla en inglés) de 6 m y un error cuadrático medio normalizado (NMRS, su sigla en inglés) de 4,2%, lo que es considerado un buen ajuste.

Los niveles simulados para el modelo en estado transitorio muestra un buen ajuste con los pocos niveles medidos en piezómetros durante el periodo de excavación del túnel.

El flujo simulado para la infiltración hacia el túnel muestra el efecto de la recarga estacional en época de deshielos así como el efecto del vaciado instantáneo del volumen almacenado debido a la excavación.

Escenarios Predictivos

Escenario 0: Caso Base: la simulación predictiva indica que el flujo de infiltración en el túnel fluctúa entre 22 para los periodos de inviernos y 41 l/s (un 90% mayor) para los periodos estivales, influenciados directamente por la recarga desde los ríos.

Escenario 1: Efecto *Shotcrete*: la simulación predictiva considerando el efecto del *shotcrete* en la mitad superior del túnel, indica que el flujo de infiltración fluctúa entre 22 para los periodos de inviernos y 38 l/s para los periodos estivales, influenciados directamente por la recarga desde los ríos.

La simulación del caudal de infiltración hacia el túnel, considerando la mitad superior del mismo cementado, demuestra una reducción de un 25% principalmente en el primer periodo de construcción, respecto del túnel sin revestir.

Escenario 2: Efecto año mayor recarga: Al agregar el efecto de un año de precipitaciones más abundante, 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).

El nivel de conocimiento actual en cuanto a flujos y niveles no permite un ajuste más certero de niveles y la influencia de la recarga sobre ellos, por lo tanto, es probable que el efecto de esta última tanto sobre niveles como sobre los caudales pueda estar sub-estimado.

Para los períodos de invierno el flujo en el túnel proviene directamente del volumen almacenado, por cuanto se ha supuesto que no ocurre recarga durante esta estación.

Para el nivel actual de conocimiento de la hidrogeología del sector, el modelo construido permite hacer un análisis de sensibilidad de los parámetros, de modo de determinar un rango de variación de los caudales estimados.

Para obtener predicciones más certeras es necesario realizar un control mensual de la variación de niveles en las cercanías del túnel, que permitan estimar de mejor manera el efecto de la recarga sobre ellos. Esto puede implicar la necesidad de recalibrar el modelo predictivo a fin de ajustar estas nuevas mediciones.

También es recomendable tener un mejor y más continuo control de flujo en el túnel y sobre todo hacer una diferenciación de las fuentes de agua y de su peso en el caudal total aforado.

Es recomendable hacer un análisis hidrológico que permita determinar el balance superficial de agua que permita estimar en forma más aproximada tasa de recarga desde los ríos.

Se estima que estos rangos, aunque amplios, son los máximos posibles a largo plazo (30 años) y los caudales de infiltración residuales del túnel estarán dentro de los mismos tanto en estaciones secas como en estaciones de deshielos.

Estos rangos conservadores de caudales de infiltración están aún muy por debajo de la capacidad de tratamiento del Sistema Integral de Tratamiento de Agua (SITA) en el área del portal del túnel, el cual está diseñado para tratar un caudal promedio de 250l/s y flujos repentinos de hasta 300l/s.

Un modelo numérico 3D de flujo subterráneo del túnel (actualmente es sus últimas etapas de calibración) será útil para estrechar estos rangos y constituir una herramienta predictiva de mayor alcance.

4.2 Recomendaciones: Plan de monitoreo e instrumentación

SRK recomienda llevar a cabo un plan de monitoreo e instrumentación para aguas superficiales y subterránea durante la suspensión de actividades del proyecto Pascua-Lama a ser implementado en el corto o mediano plazo. Un monitoreo hidrogeológico es fundamental para continuar en el tiempo con el proceso de calibración y retroalimentación de las estimaciones analíticas, simulaciones numéricas 2D y, sobre todo, del modelo numérico 3D, de tal forma que esta valiosa herramienta se vaya tornando cada vez más precisa y confiable.

Dicho plan debe ser implementado tanto para agua superficial como para agua subterránea.

4.2.1 Agua superficial

- Medición semanal de caudal en terreno en el arroyo Turbio en al menos tres puntos: (1) en su tramo superior sobre el camino de frontera, (2) en la confluencia entre el arroyo Turbio y su afluente noroeste-sudeste (área del sondaje GTDH06-01) y (3) inmediatamente aguas arriba de la captación y entubado del arroyo Turbio (al sudoeste del portal). Debe medirse el caudal a la mañana y a la tarde, debido a que SRK ha constatado que el caudal de este arroyo puede aumentar hasta más de un 300% entre las 15hs y las 19hs respecto a los valores mínimos durante la noche y la mañana.
- Medición semanal de caudal de los cursos que constituyen la recarga al túnel desde la ladera norte, es decir el arroyo noroeste-sudeste y surcos menores hacia el este.
- Medición mensual de pH en los puntos anteriores y evaluación de su relación con el caudal de deshielo, lo cual tiene fuerte implicancia en el pH en los distintos sectores del interior del túnel.

4.2.2 Agua subterránea

Medición del nivel de agua en sondajes en la superficie por encima del túnel.

En la actualidad solamente está en funcionamiento el pozo PDT-01, los demás sondajes se encuentran obstruidos en la boca de pozo, derrumbados en el fondo, o el nivel de agua está por debajo del fondo del pozo (“secos”). Para optimizar el monitoreo del nivel de agua en sondajes, SRK recomienda seguir los siguientes pasos:

- Llevar a cabo maniobras de despeje de obstrucciones o reabertura de pozos, si es que BEASA lo considera factible. El día 11/12/2013, SRK realizó una recorrida de medición en el sector de los sondajes, los resultados se resumen en la Tabla 4-1.

Sondaje	Profundidad (m)	Estado	Recomendación
GTDH06-01	90	Seco	Seguir midiendo, probablemente sube el nivel en épocas húmedas. Consensuar con BEASA reperforación en el mediano/largo plazo
GTDH06-02	85	Boca obstruida	Liberar la boca de pozo con un barrenó corto
GTDH06-03	160	Derrumbado	(1) Descartar del monitoreo en el corto plazo. (2) Convenir con BEASA su reperforación en el mediano/largo plazo
GTDH05-04B	120.15	Inhabilitado para medición del nivel de agua por instalación de un termistor por parte de BEASA	Consensuar con BEASA la utilización de este sondaje para su uso tanto en la medición de temperaturas (termistor) como del nivel de agua
PDT-01	Desconocida	Activo	Continuar con el monitoreo

Tabla 4-1. Resumen del estado actual de los sondajes de monitoreo en la superficie por encima del túnel.

- Medición en el corto/mediano plazo. Recorrido quincenal de medición del nivel de agua en los pozos habilitados, de forma presencial y mediante el uso de freatímetro.
- Medición en el mediano/largo plazo. Instrumentación para mediciones *in situ* mediante el uso de sensores y almacenamiento de la información. SRK recomienda utilizar sensores de cuerda vibrante, dada su larga vida útil. El sensor de cuerda vibrante es altamente preciso y mide la presión del agua monitoreando los cambios en la frecuencia de una cuerda vibrante instalada entre el cuerpo del instrumento y una membrana sensible a la presión. Los datos de variación de la altura piezométrica pueden ser transmitidos online o almacenados en una memoria en la boca del pozo. SRK recomienda la segunda opción debido a las intensas nevadas y problemas de transmisión que pueden ocurrir durante el invierno en estas condiciones extremas. La instalación de estos dispositivos en pozos es relativamente sencilla y se muestra un esquema en la Figura 4-1.

Medición de caudales de infiltración en el túnel

- Control semanal de caudales en los aforadores sin cuello instalados en el portal del túnel, pertenecientes al Sistema de Tratamiento Exterior (STE) actualmente en funcionamiento. En el corto/mediano plazo, los aforadores pueden ser controlados presencialmente en terreno. En el mediano/largo plazo, BEASA puede considerar la instalación de un sensor de ultrasonido en cada aforador (Figura 4-2), con el fin de automatizar el control del nivel de agua en los aforadores y almacenamiento de datos durante el invierno.

- Mapeo mensual de zonas de alta, media y baja infiltración en el interior del túnel, con estimación de caudales en cada sector. SRK recomienda medir adicionalmente pH durante estas campañas de medición en el interior del túnel.

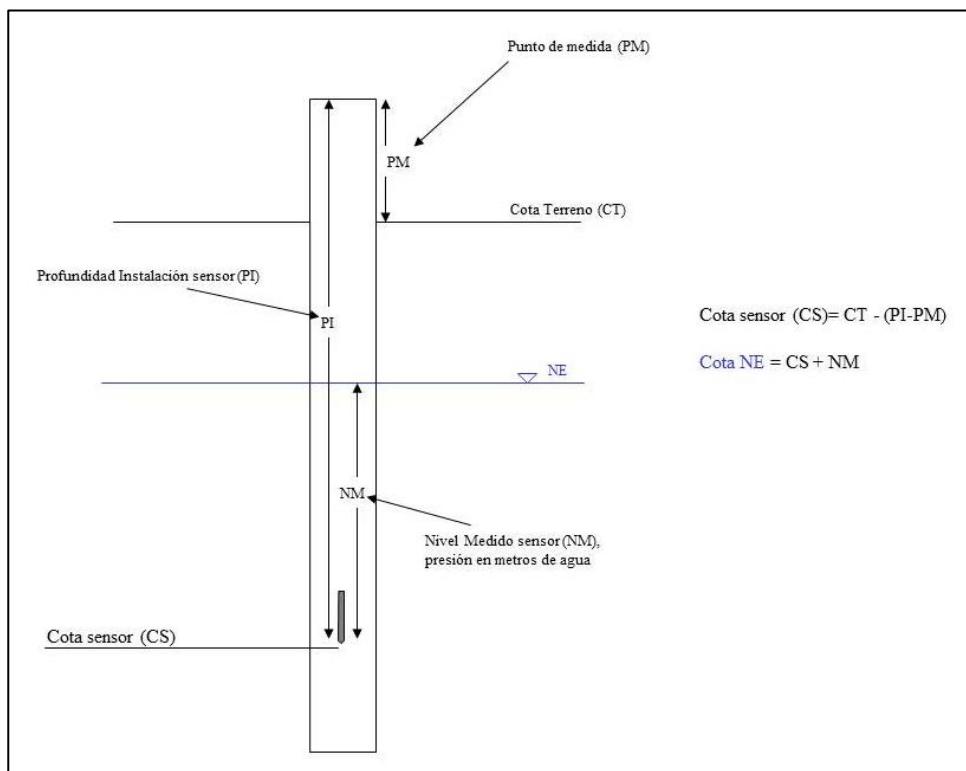


Figura 4-1. Esquema de configuración de un sensor en un sondaje y obtención de la cota del nivel de agua.

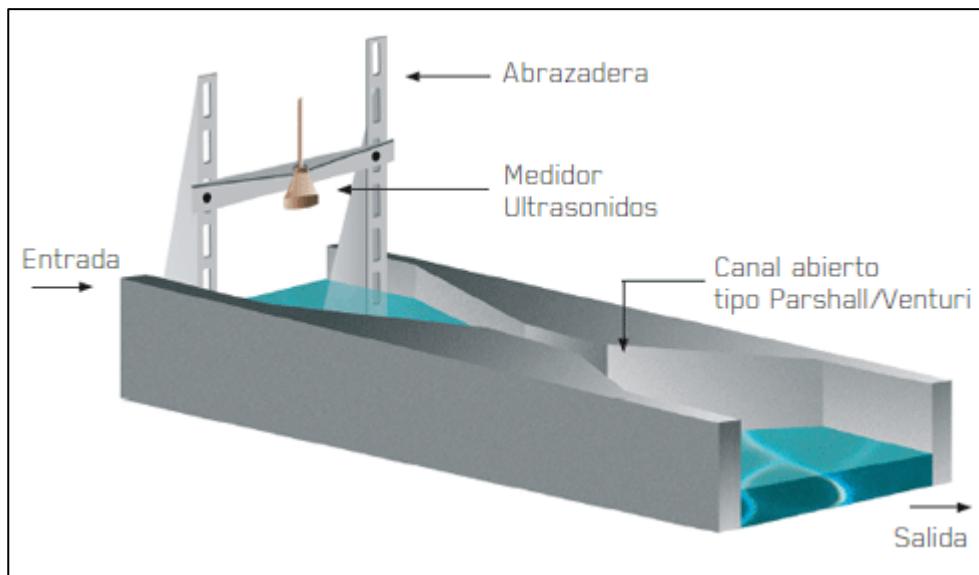


Figura 4-2. Esquema de funcionamiento de un aforador con un sensor de ultrasonido para registrar los niveles de agua

Compilado por

Camilo Raúl de los Hoyos

Jefe del área de Geología & Hidrogeología en SRK Consulting

Consultor Senior

Revisado por

Alejo Oscar Sfriso

Jefe del área de Geotecnia en SRK Consulting

Consultor Principal

Todos los datos utilizados como fuente más el texto, tablas, figuras y adjuntos a este documento han sido revisados y preparados de acuerdo con prácticas profesionales aceptadas en ingeniería y medio ambiente.

5 Referencias

- 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., Javendel, I., 1965. Ground-water inflow during tunnel driving. Engineering Geology Bulletin IAEG 2(1): 39-56.
- Lei, S., 1999. An analytical solution for steady flow into a tunnel. Ground Water 37(1): 23-26.
- Louis, C., 1974. Introduction à l'hydraulique des roches. Bull BRGM, sect III, 4: 283-356.
- SRK 52-2040-06-35-0: Estimación y proyección en posición del nivel freático, túnel Lama. 21 de febrero de 2013.
- SRK 52-2040-06-95: Estimación preliminar de caudales residuales de ingreso al túnel Lama luego de concluída su excavación. Segunda quincena de noviembre de 2013.
- SRK 52-2040-06-96: Estimación preliminar de caudales residuales de ingreso al túnel Lama luego de concluída su excavación. Primera quincena de diciembre de 2013.
- SRK 52-2040-06-97: Estimación preliminar de caudales residuales de ingreso al túnel Lama luego de concluída su excavación. Segunda quincena de diciembre de 2013.

Registro de Distribución SRK

Nº Informe

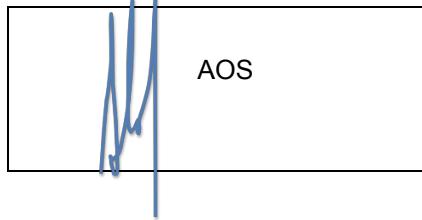
52-2040-06-94-

Nº Copia

0

Nombre/Título	Empresa	Copia	Fecha	Autorizado por
Eugenio Santander	BEASA	1	10/01/2014	Alejo O. Sfriso

Firma de aprobación:



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.