ADENDA Nº3

ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL "MODIFICACIONES PROYECTO PASCUA LAMA"

CONTENIDO

1. METODO DE EXPLOTACION 1-1
2. GLACIARES Y PERMAFROST 2-1
Línea Base 2-1
A. Características Básicas. 2-1
B. Balance combinado. 2-2
C. Deformación (o desplazamiento) 2-3
D.Variaciones. 2-3
E. Estabilidad General 2-4
F. Permafrost 2-5
Inventario de Glaciares 2-5
Impactos en la Intervención de Glaciares 2-6
Impactos de la Nieve acumulada en las Obras 2-7
Impactos del material particulado sobre los Glaciares 2-7
Presencia de un Glaciar de Roca en el Botadero Norte 2-8
3. MEDIO AMBIENTE HUMANO 3-1
Aspectos generales 3-1
Aspectos Específicos 3-8
4. TRANSPORTE 4-1
5. RECURSO HIDRICO 5-1
Anexo II-B. Recursos Hídricos 5-4
Plan de Contingencia 5-7
6. MODELO HIDROGEOLÓGICO 6-1
Calibración del Modelo 6-1
Anexo II-F 6-8
Representatividad del Registro de la Estación El Indio 6-12
Cuenca Superior 6-15
7. EMBALSE DE REGULACIÓN 7-1
8. AGUAS ACIDAS 8-1
Anexo X-A-5 8-16
Anexo II- M 8-18
ANEXO X-A-1 8-19
9. FLORA Y FAUNA 9-1
10. EMISIONES DE MATERIAL PARTICULADO 10-1
11. PLAN DE SEGUIMIENTO 11-1

12. DISPOSICION DE RESIDUOS 12-1
Anexo X-A-4 12-1
13. PLAN DE CIERRE Y ABANDONO 13-1
Anexo X-A-4 13-1
14. PERMISOS AMBIENTALES SECTORIALES 14-1
Artículo N°90 14-1
Artículo N°93 14-1
Planta de Incineración 14-1
Botadero de Residuos Inertes 14-2
Artículo N°96 14-2

LISTADO APENDICES

Apéndice 1 Plano de Instalaciones y Monitoreos Proyecto Pascua-Lama

Apéndice 2 Certificados de avalúo fiscal, Carta de solicitud de cambio de uso de suelo, Solicitud Cambio de uso de suelo y Plano polígono cambio uso de suelo (Lámina 3)

Apéndice 3 Figuras

LISTA DE ANEXOS

Anexo 1-1 Informe en Derecho

Anexo 2-1 Informes Relacionados

- Anexo 2.1.A Estabilidad General de los Glaciares Impactados, Proyecto Pascua-Lama
- Anexo 2.1.B Areas de las Cuencas Carmen y Transito v/s Areas del Futro Proyecto
- Anexo 2.1.C Comentarios sobre Hielo en Sondajes de Camino y Tunel Proyecto Pascua -Lama
- Anexo 2.1.D Glaciar de Roca en el Sector Nevada Norte

Anexo 2-2 Informes Relacionados

- Anexo 2.2.A Mediciones de Espesor en Glaciares de Chile Centro-Sur
- Anexo 2.2.B Alpine ice cores and ground penetrating radar: combined investigations for glaciological and climatic interpretations of a cold Alpine ice body.
- Anexo 2.2.C Recontruction Of Sublimation And Precipitation From The Cerro Tapado Ice Core (North Chilean Andes, 30ºS)
- Anexo 2.2.D The interannual variability of the Echaurren glacier mass balance: Chilean Andes (abstract).
- Anexo 2.2.E Late Quaternary Glacier response to humidity changes in the arid Andes of Chile (18 - 29ºS).
- Anexo 2.2.F Global Solar Radiation, Soil Temperature and Permafrost in the Central Andes, Argentina: a Progress Report.
- Anexo 2.2.G A Handbook on Periglacial Field Methods.

- Anexo 2.2.H Changes of the 0ºC isotherm and equilibrium line altitude in central Chile during last quarter of the 20th century**.**

Anexo 5-1 Láminas Perfiles Hidrogeológicos.

Anexo 5-2 Gráficos de Precipitaciones y Análisis de Caudales de Estaciones Regionales

Anexo 6-1 Modelo Hidrológico de la Cuenca Río Estrecho.

Anexo 6-2 Pronóstico de Caudales de Descarga desde las Instalaciones de Botadero de Estéril en la Época de Cierre Proyecto Veladero.

Anexo 6-3 CD de datos de caudales

⇩⇩⇩ FIELD CODES ⇩⇩⇩

.DOC
.DOC
.DOC
.DOC
.DOC
.DOC
.DOC
.DOC
.DOC
0.DOC
1.DOC
2.DOC
3.DOC
4.DOC

C:\Compilacion_EIA\ADENDA_3\Consolidado

ADENDA Nº3

ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL "MODIFICACIONES PROYECTO PASCUA-LAMA"

1. METODO DE EXPLOTACION

1.1 Sin perjuicio de los análisis técnicos y económicos presentados en la respuesta N°1 del Adenda N°2, se solicita al titular analizar si existen nuevos efectos y/o impactos ambientales generados por las alternativas de métodos de explotación presentadas.

Respuesta:

El Proyecto sometido al sistema de evaluación considera como alternativa de explotación el de rajo abierto y no otra. Creemos que no corresponde evaluar ambientalmente proyectos distintos al sometido por el titular al SEIA (Se adjunta como Anexo 1-1 informe en derecho al respecto). No obstante la no procedencia de la pregunta, se accedió a explorar la viabilidad económica y técnica de otras alternativas confirmándose que la única forma de explotar el yacimiento Pascua Lama de una manera técnica y económicamente viable es a través de un rajo abierto. Las otras alternativas analizadas, esto es la de explotación subterránea o la mixta con rajo no interferente, hacen que las reservas del proyecto disminuyan al punto de hacerlo inviable económicamente.

Por otra parte, la alternativa de explotación mixta, que es la que menos afectaría las reservas, impactaría, al igual que la de rajo abierto, pero de manera no controlada, los glaciares reservorios localizados en el área del Proyecto. Esto por la desestabilización de taludes que produce la afectación indirecta de los cuerpos de hielo. Sin perjuicio de lo anterior, con motivo del ICSARA 2, se modificó el plan de rajo abierto a fin de postergar al máximo en el tiempo la afectación de los glaciares involuctrados. Lo anterior, con el objeto de contar con la mayor información posible antes de dicha afectación. Asimismo, el área de glaciares a afectar se redujo a la mitad (de 10 hectáreas a 5 hectáreas), limitándose el impacto a menos del 0.2% de los hielos que aportan a la cuenca del Rio del Carmen.

1.2 Atendiendo a los antecedentes entregados en la respuesta N° 1 de la Adenda N° 2, es posible observar que las reservas de mineral en la zona comprendida entre el rajo no interferente y el rajo completo, corresponden aproximadamente al 1% del total de reservas existentes, mientras el oro recuperado en dicha zona equivaldría a menos del 2,5% del total de onzas obtenidas con el rajo completo. Se solicita al titular referirse al respecto.

Respuesta:

Entendemos que lo expresado en la Adenda 2 pueda haber llevado a confusión. En efecto, al tener el rajo completo 17,4 millónes de onzas de oro, en 328 Mt de mineral y al ser el material potencialmente extraible entre el rajo no interferente y el rajo completo, un total de 428.000 onzas de oro, en 3,5 Mt de mineral, pareciera lógico concluir que las 3,5 Mt equivalen aproximadamente a 1% de 328 Mt. y que a su vez, las 428.000 onzas de oro, equivalen a un 2,5% de 17,4 millónes de onzas de oro.

Sin embargo, dicha apreciación no es correcta dado que el total de toneladas de mineral y reservas de las tres alternativas presentadas a la autoridad son las siguientes:

Método Explotación	**Millones toneladas**	**Millones onzas oro**
Rajo Abierto Original	328	17,4
Minería Subterránea (Hundimiento Masivo)	199	9,6
Rajo No Interferente	297	15,3

De esta tabla resumida, se desprende que la pérdida de reservas entre el Rajo Original y el Rajo No Interferente es de casi 10% en toneladas de mineral y 12% en onzas de oro, y no 1% del total de reservas y 2,5% del total de las onzas como pareciera co. Para mayor clarificación, se debe mencionar que en el Adenda 2 se evaluaron dos alternativas de Rajo no Interferente con métodos subterráneos, los que fueron descritos en el Anexo I-A:

- Evaluación del rajo abierto con hundimineto masivo: Este método determinó que no era factible extraer mineral adicional tanto de abajo del piso del rajo como de las paredes laterales del mismo sin afectar seriamente la estabilidad de importantes secciones de las paredes del rajo, lo que podría resultar en problemas de seguridad y ambientales, incluyendo la destrucción incontrolada de secciones de los glaciares. El resumen de estos resultados de esta alternativa se indican en la tabla mas arriba evidenciando una reducción de 10% del mineral extraíble y 12% de las onzas de oro.

- Evaluación del Segundo método mixto que implica el mismo Rajo Abierto no Interferente y métodos subterráneos selectivos: Esta alternativa, cuya evaluación preliminar indica que sería posible recuperar un adicional de 3.5Mt de mineral y 428,000 onzas de oro, de las cuales 186,000 onzas ya están contabilizadas en los 17.4 million onzas y 176,450 onzas estarían fuera del límite del rajo original. Sin embargo, considerando la importante inversión y riesgo que esta alternativa implica para obtener un potencial menor de recuperación de inversión, lo cual no es sin riesgo en

especial para el glaciar Esperanza, se consideró como no viable por el momento. De esta manera, las reservas de esta alternativa también se consideran como 297 Mt de mineral y 15.3 millones de onzas de oro.

De esta manera, la merma en las reservas sin una reducción significativa en la inversión necesaria para desarrollar el Proyecto Pascua-Lama, resultan en un proyecto con insuficiente rentabilidad y retorno de inversión.

1.3 La respuesta N° 1 de la Adenda N° 2, señala que el glaciar Esperanza, considerando su estructura actual, sería interceptado por el desarrollo del rajo alrededor del año 2009. Sin embargo, en el "Plano de Disposición General de la Mina Año 8" se observa que recién durante este período comenzará la intervención sobre el glaciar Esperanza. Dado que la etapa de prestripping durará aproximadamente 3 años, se desprende que la intervención sobre dicho glaciar se realizaría no antes de 11 años, desde iniciada la etapa de ejecución del proyecto, esto es, no antes del año 2017. Se solicita al titular aclarar dicha inexactitud.Además, la respuesta señala que debido a su limitado tamaño y reducción natural, dicho glaciar podría desaparecer aproximadamente el año 2015. Lo anterior implicaría que es posible que el glaciar Esperanza ya no exista al momento en que el pit alcance su actual ubicación. Se solicita aclarar al respecto.

Respuesta:

La diferencia entre lo respondido en la respuesta No. 1 del Adenda 2 y y lo indicado en el Plano referido, se debe a que, por un error de redacción en la respuesta, se invirtieron las referencias a los hielos Toro 1, Toro 2 y Esperanza.

En consecuencia, la información correcta es que el plan minero establece que el rajo intercepte el glaciar reservorio Esperanza alrededor del octavo año de producción, esto es no antes del año 2017.Que el glaciar Esperanza pueda haber desaparecido hacia el año 2015 es hoy solo una hipótesis. La figura 2-1 del Anexo 3-e en la Adenda 2, que indica la tendencia a reducirse en tamaño Toro 1, Toro 2 y Esperanza, refleja una proyección lineal basada en datos históricos y no un análisis estadístico de potenciales eventos climáticos futuros., Ahora, en caso de persistir esta tendencia en el tiempo, se producirá una reducción significativa del tamaño de Esperanza al punto de que no exista al momento en que el rajo llegue al lugar donde actualmente se emplaza.

1.4 La respuesta N° 1 señala que los glaciares Toro 1 y Toro 2 serán interceptados por el rajo alrededor del año 2016, sin embargo en el "Plano de Disposición General Mina Final año 1", ya se observa intervención en dichos glaciares. Considerando que las actividades de prestripping se realizarán durante aproximadamente 3 años, se estima que el impacto sobre los glaciares ocurrirá a más tardar el año 2010. Se solicita al titular aclarar dicha inexactitud, indicando las diferencias en los volúmenes afectados, el impacto asociado al aumento de la masa glaciar afectada, y la

reconsideración de las medidas de mitigación, reparación y/o compensación que sean pertinentes.

Respuesta:

Tal y como se señaló anteriormente, en la redacción en la respuesta 1 del Adenda 2, por error se traspuso el glaciar Esperanza al Toro 1 y Toro 2. Lo correcto es que Los hielos de Toro 1 y 2 serán interceptados por el rajo no antes del año 2009. Esto en el caso que la construcción parta el 2006.

De esta manera se puede asegurar que no hay diferencias en los volúmenes estimados, sino un error de redacción, ya que los volúmenes son calculados en base de la topografía actual y no a la condición proyectada.

1.5 En el Punto 1.6.1., la respuesta contiene un error en el tonelaje asignado al Botadero Nevada Norte, al hablar de 600.000 millones de toneladas, como contrafuerte que confina el glaciar de roca. Lo correcto son 1.200 millones de estéril contra 400.000 toneladas de glaciar de roca (también válida la comparación de 3 há. de glaciar de roca quedarán cubiertas por 300 há. del botadero Nevada Norte.

Respuesta:

Efectivamente los 600 millones de toneladas representan solamente el monto conservador estimado de material estéril que actúa directamente como un refuerzo hasta el nivel más alto del glaciar de roca en la porción más adyacente de la Cuenca del Estrecho. A esto hay que agregar los 1,200 millones de toneladas los cuales también contribuyen a dar soporte adicional.

1.6 En el punto, en relación a Riesgo Geológico, se solicita que en la presentación del Permiso Técnico Sectorial de Sernageomin, el titular deberá preparar el estudio de riesgo abarcando desde la cabecera de la Qda. Estrecho hasta la Planta HDS, al nivel de detalle a escala 1:5000.

Respuesta:

CMN acoge lo solicitado. En el permiso técnico sectorial del SERNAGEOMIN se presentará un estudio de riesgo geológico abarcando desde la cabecera del Río del Estrecho hasta la Planta de tratamiento de drenajes ácidos, a una escala 1:5000.

2. GLACIARES Y PERMAFROST

Introducción General al Tema:

Dado el tenor de las preguntas relativas a glaciares, estimamos conveniente, antes de proceder a dar respuesta a las mismas efectuar las siguientes precisiones generales a modo de introducción.

1. El proyecto ha sido modificado a fin de evitar la intervención de glaciares propiamente tales. En efecto, el proyecto actual, no afectará los glaciares Guanaco ni Estrecho que son los que la literatura y los expertos catalogan como tales. Solo se afectarán, reubicándolos, los glaciares reservorios Toro 1, Toro 2 y Esperanza los que nunca han sido catalogados ni registrados como glaciares propiamente tales. Ninguno de los registros nacionales o internacionales de glaciares los incluye. Tampoco han sido identificados como tales en alguno de los estudios publicados sobre glaciares ya sea en Chile o en el extranjero.

2. Los estudios efectuados por CMN en relación al tema han implicado la obtención de una serie de antecedentes los cuales han sido recolectados, comparados y analizados por varios consultores, científicos y especialistas chilenos y extranjeros de prestigio mundial. Para los efectos de su preparación y presentación se han utilizado métodos reconocidos y estándares de uso común entre profesionales de vasta trayectoria, incluyendo el Centro de Estudios Científicos en Valdivia (CECS), Chile.

3. Creemos que el trabajo glaciológico desarrollado por la empresa, representa desde ya una contribución significativa al desarrollo de la ciencia y al escaso conocimiento que se tenía de los mismos. En efecto, el volumen de información obtenida y estudios realizados a lo largo de los últimos 5 años, hacen que los hielos ubicados en el área de influencia de Pascua Lama sean probablemente de los más estudiados y respecto de los que más se sabe en toda la región.

4. Esta información ha sido presentada en su totalidad a las autoridades en distintas formas y niveles de detalle. Los datos obtenidos para cada uno de los cuerpos incluyen entre otros: su área de superficie y variaciones observadas a través de fotos aéreas e Ikonos durante un período de 50 años; una completa descripción de sus características básicas mediante mediciones efectuadas en 6 ocasiones, incluyendo balance de masa, calórico e hídrico todos obtenidos tanto de meses de invierno como de verano durante los años 2004 y 2005; datos meteorológicos obtenidos en el sitio durante un período de 13 años y datos extrapolados de 24 años resultantes de mediciones efectuadas en El Indio ubicado 50 kms aprox. al sur del sitio de Pascua Lama; y los flujos de agua medidos en puntos de acceso seguro aguas abajo de los hielos.

5. Dichos análisis también incluyen una simulación por un período de 25 años que demuestra tendencias de desempeño similares a los del glaciar Echaurren, el cuál se considera como uno de los más documentados en Chile, ubicado en el Región Metropolitana.

6. Adicionalmente y con la intención de aportar mayor información sobre la materia, CMN se ha comprometido en la Adenda II a continuar realizando estudios científicos y a desarrollar un programa de monitoreo exhaustivo según lo recomendado por el propio CECS.

7. Para la obtención de datos de línea de base de los glaciares del área de influencia, se optó por la tecnología GPR (Ground Penetrating Radar) la cual es mundialmente aceptada como las mas eficiente y moderna para mediciones en hielos. Según el experto Rivera del CECS esta es, efectivamente, la tecnología apropiada ya que sus márgenes de error van del 1% al 6%. No obstante, en este ICSARA 3, se nos indica que es necesario proceder a corroborar mediante una campaña de sondajes en glaciares la exactitud de la información obtenida a través del sistema GPR. Desde ya, manifestamos que el Titular no tendría inconveniente en implementar dicha campaña, tal como se solicita, antes de la intervención de los glaciares. Debemos eso si, manifestar nuestra aprehensión en cuanto a que los sondajes efectuados de la manera propuesta en el ICSARA 3, quizás no son la alternativa mas adecuada ya que implican una excesiva intervención en los glaciares. Sobretodo, en aquellos que nunca serán intervenidos por el rajo. Además, dichos sondajes no permitirán mostrar la estructura del glaciar como grietas verticales. Una alternativa menos agresiva a considerar, sería realizar un solo sondaje en los glaciares Toro 1, Toro 2, Esperanza y Guanaco, y sólo, en el caso de que el resultado de esos sondajes arroje resultados muy distintos a los obtenidos a través del sistema GPR, se proceda con los siguientes.

8. Luego de un gran esfuerzo realizado con motivo del ICSARA 2, el Titular pudo redefinir el área de glaciares a intervenir a la mitad. De 10 hectáreas que se decían intervenir originalmente hoy se intervienen solo 5. Además, luego de una readecuación del plan minero, se logró atrasar al máximo la intervención de los hielos. (Toro 1 y 2 (1 hectárea) el año 2009, y Esperanza (4 hectáreas) el 2017). Esto permitirá contar con la mayor información posible antes de proceder con la reubicación de los hielos. En cuanto a volumen, los hielos a reubicar se reducen al 0.2 % del volumen total de los hielos existentes en la Cuenca del Carmen. En agua equivalente, dicho porcentaje representa la cantidad de 70.000 metros cúbicos al año, lo que constituye un flujo prácticamente imperceptible.

9. A mayor abundamiento, y con el fin de dar tranquilidad absoluta a los usuarios aguas abajo, el proyecto contempla, a partir del Adenda 2, la construcción de un tranque de acumulación de aguas, de 5 millones m3 lo que permitirá almacenar una cantidad de agua 70 veces mayor a cualquier pérdida posible anual de caudal de

agua estimada según el método utilizado por el Titular, o a 250 veces mayor si se sigue el método de cálculo utilizado por la DGA.

10. Finalmente, es del caso destacar que CMN posee 104.89 acciones en el Rio El Carmen equivalentes a 88 l/s de acuerdo a la tasa actual de conversión de la Junta, las cuales estarían disponibles para cubrir cualquier eventual perdida de caudal, si se estima ésta, en el peor de los casos, no podría superar los 9 l/s.

Línea Base

2.1 La caracterización de la Línea Base de los glaciares y glaciares de roca intervenidos directa o indirectamente por las operaciones mineras, debe proporcionar antecedentes Ciertos, obtenidos de mediciones directas realizadas con un grado de precisión adecuado al parámetro que se describe. A la fecha y con los antecedentes presentados por el Titular, en numerosos aspectos no se cuenta con antecedentes ciertos de la Línea de Base de los glaciares (por ejemplo la temperatura y el balance de masas), en otros hay errores (por ejemplo la profundidad de la isoterma 0°C bajo los glaciares) y, en varias, contradicciones (por ejemplo la relación de espesores de hielo, tipo de glaciar, y movimiento de los glaciares). Lo que se explica en mayor detalle en el anexo adjunto "Análisis y Evaluación de la Adenda Nº2 ", consultoría contratada por la Dirección Regional de CONAMA a Geoestudios.

Respuesta:

El Proponente optó por el método GPR (Ground Penetrating Radar), por ser la metodología mas moderna y eficiente para la obtención de datos de línea de base. Lo anterior, es ratificado por glaciólogos de alto prestigio internacional que han participado en la elaboración de los estudios independientes realizados en el área, incluyendo al experto Andrés Rivera del CECS, según quien el GPR tendría una precisión del 1-6%, lo que lo constituye en un método bastante más preciso que otros procedimientos de prospección geofísica empleados en Chile. Así en el informe "Mediciones de espesor en glaciares de Chile centro-sur" (Andrés Rivera, *et al*, Centro de Estudios Científico, Valdivia, 2002), en Anexo 2.2.A se señala lo siguiente:

"Se presentan resultados de mediciones de espesor de hielo realizadas en Chile centro – sur (30-41ºS) durante los últimos años. La información fue obtenida mediante radar en cinco glaciares. En todos los casos, las señales de radar fueron levemente atenuadas permitiendo la penetración de la totalidad del hielo, lo que implica que la presencia de agua supra, intra y subglacial no afecto significativamente las señales. El sistema se probó tanto en glaciares descubiertos, así como en glaciares con cubierta detrítica, la que si bien genero cierto nivel de ruido en los registros, no impidió la penetración de las señales hasta el fondo subglacial, obteniéndose espesores máximos de 230 m en la zona de ablación del glaciar Juncal Norte. El análisis de la potencia de reflexión interna y de fondo, permitió caracterizar una condición fría para el glaciar Tapado (sin deslizamiento basal), mientras que para el glaciar Juncal Norte, se corroboró su condición temperada. Las mediciones de espesor de hielo realizadas

con este sistema de radar tienen una precisión bastante mejor que otros métodos de prospección geofísica empleados en Chile (1-6%) permitiendo un cálculo más confiable y preciso del volumen equivalente en agua existente en estado sólido en la cordillera. Un programa de medición de espesores en glaciares representativos de las distintas cuencas del país, podría mejorar la evaluación del recurso hídrico, permitiendo un seguimiento en el tiempo de las variaciones y respuestas glaciales frente a los cambios climáticos que están afectando actualmente el país."

El GPR constituye una herramienta para caracterizar un glaciar en su entorno, con y sin cubierta detrítica, permitiendo un cálculo más confiable y preciso del volumen equivalente en agua sin usar métodos agresivos que impacten a los glaciares. Se trata de no, por estudiar glaciares, especialmente si no van a ser intervenidos por el rajo, intervenirlos con campañas de sondajes.

Adicionalmente, la línea base y los estudios presentados en los varios Anexos III de la Adenda 2 han sido revisados por glaciólogos internacionales tales como el Dr. Michel Vallon y Dr. Christian Vincent (Laboratoire de Glaciologie et de Geophysique de l'Environnement, France), y por el Dr. Juan Pablo Milana (Centro de Estudios Avanzados en Zonas Áridas, La Serena). El Dr. Vallon y el Dr. Milana indicaron en los Anexos III-A y III-B que la información recopilada es suficiente para evaluar los impactos ambientales. Conjuntamente con lo anterior, el Dr. Rivera del CECS visitó la faena en Enero 2005 y CMN se comprometió en el Adenda 2 a implementar todos los estudios complementarios recomendados por Dr. Rivera.

La cantidad de estudios efectuados han permitido contar con opiniones de varios expertos respecto de este proyecto, sobre la viabilidad de reubicar los hielos y los impactos potenciales en términos de flujo aguas abajo.

No obstante lo anterior, el Titular está dispuesto a proceder con la campaña de sondajes de validación indicados mas abajo, propuestos por Geoestudios - consultoría contratada por la Dirección Regional de CONAMA, los que serían realizados de la manera que se pide, y en forma previa a la intervención de cualquier cuerpo de hielo. Queremos, eso si, manifestar nuestra aprehensión en cuanto a que los sondajes efectuados de la manera propuesta mas abajo, quizás no son la alternativa mas adecuada ya que implican una excesiva intervención en los glaciares. Sobretodo, en aquellos que nunca serán intervenidos por el rajo. Además, dichos sondajes no permitirán mostrar la estructura del glaciar como grietas verticales. Una alternativa menos agresiva a considerar, sería realizar un solo sondaje en los glaciares Toro 1, Toro 2, Esperanza y Guanaco, y sólo, en el caso de que el resultado de esos sondajes arroje resultados muy distintos a los obtenidos a través del sistema GPR, se proceda con los siguientes.

Es por ello que se requiere que la información de la Línea Base de Glaciares sea presentada en los siguientes términos:

A. Características Básicas.

a) <u>Límites (o extensión) del glaciar.</u> Es simple de establecer en los glaciares sin cubierta detrítica. Sin embargo en aquellos con cubiertas detrítica (permanente o temporal) en sus márgenes, la extensión del glaciar debe establecerse con adecuados métodos de exploración directa (los métodos geofisicos —incluido el GPR — no funcionan en mezclas de estratos de hielo puro y estratos con variados contenidos de impurezas detríticas). La exploración directa es mediante sondajes, pozos, catas, o similares.

<u>Respuesta:</u>

El titular no tendría inconvenientes en efectuar la exploración directa que se propone, esto es "mediante sondajes, pozos, catas o similares". Lo anterior podría incluso implementarse previo a la intervención de cualquier cuerpo de hielo. No obstante lo anterior, nos permitimos señalar lo siguiente.

El método "Ground" Penetrating Radar, como indica su nombre, mide la estratigrafía en la tierra, siendo, asimismo, una herramienta que permite una medición del hielo con óptimos resultados. Además, GPR tiene un buen desempeño en materiales congelados siendo el método más utilizado para efectos de medir la estratigrafía en tierras congeladas. No existe otro método que otorgue mayores detalles estratigráficos (capas de hielo) en perfil 2D que el GPR.

En su operación en materiales congelados, GPR atraviesa la superficie de detritos, y entrega detalles del perfil en un corte transversal continuo que refleja una visión completa en 2D del subsuelo. A diferencia del GPR, la perforación solamente entrega datos de un sector del hielo los cuales deben ser interpolados entre las perforaciones.

Tal como lo señala el Dr. Rivera en el Anexo 2.2.A a esta Adenda "el sistema de GPR se probó tanto en glaciares descubiertos, así como en glaciares con cubierta detrítica, la que si bien generó cierto nivel de ruido en los registros, no impidió la penetración de las señales". Esta capacidad del método quedó demostrada en las mediciones efectuadas en el glaciar Esperanza (Anexo III-G, apéndice 1, figura 6) durante el mes de noviembre del año 2004, en las cuales, éste muestra perfiles que se extienden por debajo de los detritus sobre el glaciar.

Por otra parte y respecto del aporte al balance hídrico, es importante destacar que es el hielo descubierto el que aporta la mayoría del agua del glaciar en verano, a diferencia de lo que sucede con el hielo cubierto. Estas diferencias en cuanto a los límites de uno y otro tipo de hielo se encuentran señaladas y debidamente diferenciadas en la Adenda 2.

Asimismo, la identificación del hielo descubierto se puede realizar fácilmente mediante la utilización de imágenes de Ikonos 2005, la cual es una imagen de alta resolución de una

calidad muy suficiente para esta interpretación. En el caso del hielo cubierto, en la mayoría de los perfiles GPR, es bastante obvio los límites de los glaciares por su rápido acuñamiento El Dr. Milana discute este tema en el Adenda II, Anexo III-A, paginas 35, 36, al indicar que *"Grandes sectores del Toro 1 ya se encontraban en el 2005 componiendo un depósito de hielo cubierto el que pudo ser revelado con los servicios de GPR."*

En virtud de lo anteriormente expuesto, creemos que el método de GPR es válido para definir los límites (o extensión) de un glaciar. Es una herramienta que, por lo demás, no genera impactos o daños ambientales como podría llegar a producirlos el método propuesto por la autoridad el cual conllevaría construcción de caminos, excavaciones, y perforaciones sobre el hielo.

> ***b) <u>Espesor del glaciar.</u> Se suele definir mediante técnicas de prospección geofisica apropiadas al tipo de glaciar que se investiga. Sin embargo, todos los métodos de exploración geofísica tienen grados diversos de incertidumbres (o errores), de manera que la exploración geofisica debe ajustarse, corregirse y complementarse con exploraciones directas (sondajes) en algunos puntos (3 en glaciares pequeños, 6 en glaciares mayores suelen ser suficientes); al menos uno de los puntos de exploración directa debe ubicarse en el sector de mayor espesor de hielo. Los perfiles de exploración deben extenderse más allá de las márgenes del glaciar (para verificar la ausencia de hielo), y deben ser a lo menos uno longitudinal y varios transversales, dependiendo esto de la forma del glaciar. La cota de los puntos en superficie en los cuales se determina espesor debe tener precisión de centímetro, lograda con levantamiento topográfico desde puntos de referencia firmes y estables, ubicados fuera del glaciar.***

<u>Respuesta:</u>

El titular no tendría inconvenientes en proceder, previo a la intervención de cualquier cuerpo de hielo, con la campaña de sondajes que se propone para definir el espesor del glaciar. No obstante lo anterior, nos permitimos señalar lo siguiente.

La información obtenida a través de sondajes puede dar una mayor exactitud pero, sin embargo, otorga solamente una dimensión única. Además, la determinación del punto más profundo del glaciar, a través de la utilización de sondajes, requiere una gran cantidad de sondajes, lo que conlleva una intervención significativa en el glaciar. Esta intervención se evita a través de la utilización del GPR (ver Anexo III-G del Adenda 2), el cual permite definir el entorno del glaciar fácilmente. Asimismo la realización de tres perforaciones en un glaciar pequeño (como es señalado por la autoridad) permite entregar muy poca información comparada con la que se podría obtener con el GPR.

Tal como se mencionó anteriormente, el GPR es un método electromagnético usado permanentemente en Chile y otras partes del mundo, sobre los glaciares para medir, entre

otros, el espesor de hielo del glaciar. Asimismo, este método otorga una precisión mayor comparado con otros métodos tales como el sondaje. Esto se demuestra a través de la correlación entre uno y otro método en varias locaciones, incluyendo el cercano Glaciar Tapado (Al respecto ver Rivera, *et al*, 2001, Anexo 2.2.A, "*las mediciones de espesor de hielo realizadas con este sistema de radar tienen una precisión bastante mejor que otros métodos de prospección geofísica empleados en Chile (1-6%) permitiendo un cálculo más confiable y preciso del volumen equivalente en agua existente en estado sólido en la cordillera*"). Muchas líneas de GPR pueden ser efectuadas sin ocasionar ningún tipo de impacto en un glaciar permitiendo visualizar perfiles completos a través de su masa total. La utilización del GPR ha permitido obtener más de 40 perfiles en los glaciares en Pascua-Lama. La confiabilidad de este método ha sido avalada por la aceptación del mismo por parte de científicos, tales como el Dr. Rivera del CECS quien utilizó esta herramienta en una visita a Pascua Lama en Enero de 2005, no manifestando ningún tipo de observación respecto de los resultados obtenidos por CMN a través del GPR.

Asimismo, las líneas GPR mostradas en el Anexo III-G del Adenda 2 son de una alta exactitud, y han sido revisadas y aprobadas por el Dr. Vallon, según lo indicado en el Anexo III-B, pagina 4/26, donde se señala que "*Los grosores de hielo y la morfología bajo glaciar pueden pues considerarse como bien conocidos. Estos pequeños glaciares, desde este punto de vista, son probablemente los mejores estudiados de los Andes.*"

Quizás sería mas conveniente, en vez de la campaña de sondajes arriba propuesta, efectuar un sondaje en la parte más profunda del glaciar Guanaco (identificado por GPR), tal y como fue solicitado por el Dr. Rivera, utilizándolo además para medir temperaturas. Los resultados de la investigación serán comparados con los obtenidos mediante el método GPR y sólo en caso de que arrojen resultados muy diversos a éste, se podría proceder con el resto de los sondajes. En todo caso, el Titular está dispuesto en esta materia a proceder de la manera que mejor determine la Institucionalidad Ambiental.

> ***c) <u>Estratigrafía del glaciar.</u> Para efectos de la Línea Base, se entiende por estratigrafía del glaciar la proporcion de hielo-impurezas detríticas presentes en la masa del glaciar, en particular cerca de la base y en bandas (de polvo y detrito) dentro del hielo de la masa del glaciar. En los glaciares de roca, es parte del glaciar la cubierta de detrito en la superficie. La descripción estratigráfica debe indicar profundidades, espesores, proporciones de hielo-detrito, características de las impurezas (tipo, composición, tamaño, etc.). La estratigrafía del glaciar se describe a partir de muestras obtenidas a través de todo un perfil vertical del glaciar, mediante sondajes, y complementadas con observaciones en paredes de grietas, cortes de frentes, catas, pozos y similares.***

<u>Respuesta:</u>

El titular no tendría inconvenientes en efectuar los sondajes y observaciones en paredes de grietas, cortes de frentes, catas y pozos que se indican. No obstante lo anterior, nos permitimos señalar lo siguiente.

La estratigrafia interna de los glaciares no tiene incidencia directa en el flujo de agua, que es el impacto más importante para efectos de la Evaluación de Impacto Ambiental.

GPR es un método que puede mostrar la estratigrafía en caso de así requerirse. A este respecto nos referimos al reporte efectuado por el Dr. Milana (Anexo III-A, paginas 52 a 55) para El Guanaco, en el cual los datos del GPR fueron reprocesados para aumentar la reflexión interna a fin de investigar la historia climática del último Holoceno de El Guanaco.

La estratigrafía interna del glaciar tiene valor para demostrar el ensuciamiento natural del hielo. La información presentada en el Anexo III-A Sección 4.11, pagina 102 y en el Anexo III-B, pagina 11/26 de este último documento, explica que los glaciares en el área de Pascua–Lama son naturalmente polvorientos, existiendo gran cantidad de polvo depositado naturalmente sobre los glaciares antes de la exploración. La geología del área es tal que las exposiciones superficiales son fácilmente erosionables y transportables producto tanto del viento y como del derretimiento, cubriendo frecuentemente hielos que están en superficies bajas.

La opinión de varios expertos en la materia, incluyendo el Dr. Vallon (ref Anexo III-B, pagina 12/26), indica que *"existe un reto original para un investigador de la tercera región de Chile: analizar las variaciones de la concentración de polvos del hielo del glaciar Guanaco e intentar interpretarlas. El reto es interesante, eso podría conducir a una buena tesis, pero nadie puede afirmar que este estudio permitirá adquirir datos de la variabilidad glacio-climática a mediano y largo plazo".* Por lo tanto para efectos de la evaluación de impacto ambiental se considera que la estratigrafía del glaciar es de valor limitado. No obstante lo anterior, el titular propone como parte del plan de investigaciones efectuar un sondaje en el glaciar Guanaco que muestre la estratigrafía del glaciar lo cual puede ser comparado con los datos obtenidos por GPR. La perforación será realizada utilizando un taladro electromecánico que obtendrá muestras limpias, simples y adecuadas para análisis químicos. Este estilo de perforación es limpio, portátil, y no conlleva la construcción de un camino en el glaciar.

> ***d) <u>Estructuras del glaciar.</u> Las estructuras del glaciar son, esencialmente, fracturas (en tensión y en compresión) y disposición de estratos, además de otras en casos particulares. Las estructuras presentes en superficie deben mostrarse en un plano del glaciar. Aquellas en profundidad, inferidas de los sondajes y exploraciones geofisicas, deben mostrarse en perfiles.***

<u>Respuesta:</u>

El titular no tendría inconvenientes en efectuar los sondajes y exploraciones geofísicas de la manera que se indica.

Efectivamente y como lo señala la autoridad en la superficie de los glaciares Guanaco, Estrecho y Ortigas Uno se notan grietas. Las grietas demuestran el movimiento de esos glaciares, siendo ese movimiento real medido a través de estacas, según se indicó en la respuesta al ítem 2.1.C de este Adenda III. Los resultados determinaron que el movimiento es tan menor que se considera insignificante para efectos de la evaluación de los impactos ambientales y por tanto se ha considerado que no es necesario efectuar un plano de ellos. Las grietas no están presentes en los glaciares Toro 1, Toro 2 y Esperanza lo cual demuestra los bajos niveles de movimiento detectados producto de la medición.

Por lo demás, las estructuras de un glaciar pueden ser detectadas por GPR, tal y como se discute por Olaf etal, 2003, Anexo 2.2.B de este Adenda. Además Rivera (2002, anexo 2.2.A pág. 69) indica que:

"Actualmente, el método de radar ha desplazado al método de gravedad debido a su mayor precisión y capacidad de recolección de datos. Asimismo, es más versátil que el método sísmico, por lo que se ha transformado en el método estandarizado para determinar espesores de hielo y la estructura interna de los glaciares."

En todo caso, el Titular no tiene inconvenientes en comprometerse a desarrollar la campaña de sondajes propuesta por Geoestudios, si la COREMA en su RCA lo estimare necesario, lo que podría perfectamente realizarse antes de cualquier intervención de glaciares. No obstante, hacemos ver que, en nuestra opinión los sondajes verticales propuestos por Geoestudios no son los óptimos ya que producirán impactos innecesarios en los glaciares (que no serán tocados por el proyecto) y no permitirán mostrar la estructura del glaciar como grietas verticales. Una alternativa, menos agresiva a considerar sería realizar un sondaje en cada uno de los glaciares Toro 1, Toro 2, Esperanza y Guanaco, tal y como está mencionado en la sección 2.1.A. anterior y sólo, en el caso de que el resultado de esos sondajes arroje resultados muy distintos a los obtenidos a través del sistema GPR, se proceda con los siguientes. Los resultados de la investigación podrían ser entregados como parte integral del "Plan Final de Reubicación de Hielo" que el titular debe entregar a Conama, según lo establecido en la RCA 039 / 2001, Ítem k.

> ***e) <u>Temperatura del glaciar.</u> Conocer la temperatura en la masa del glaciar, y sus variaciones a lo largo de las estaciones del año, es esencial para estimar diversas propiedades del glaciar. La temperatura al interior del glaciar está controlada por los parámetros climáticos, por los procesos de recongelamiento del agua libre al interior del glaciar, por la gradiente geotérmica, por el calor de fricción que produce el deslizamiento en la base de glaciares temperados y, finalmente, por el espesor mismo del glaciar. En glaciares de poco espesor puede ocurrir que parte del año todo el hielo se encuentre por debajo de 0°C, y parte del año todo sea temperado***

(básicamente a 0°C) La única manera cierta de medir la temperatura en la masa de hielo al interior de un glaciar, y sus variaciones en un ciclo anual, es utilizando sensores de temperatura que se insertan a diversas profundidades en un sondaje a través del glaciar.

Respuesta:

El Titular estaría dispuesto a insertar sensores de temperatura a diversas profundidades en un sondaje a través del glaciar, si así lo estimare la autoridad. No obstante nos permitimos señalar lo siguiente.

Los diversos estudios efectuados en término de régimen climático, morfología, y penetración del GPR concluyen que los glaciares Toro 1, Toro 2 y Esperanza son de hielo frío. El GPR es un método que permite identificar la base de hielo frío o temperado de un glaciar, como se muestra en el glaciar Guanaco a una profundidad de 130m (Adenda 2, Anexo III-G, figura 13 de apéndice 5). El uso del GPR para identificar temperaturas se discute en el documento de Cassasa, Rivera, y Acuña, 2001, Anexo 2.2.A, donde se señala que *"El análisis de la potencia de reflexión interna y de fondo, permitió caracterizar una condición fría para el glaciar Tapado (sin deslizamiento basal), mientras que para el glaciar Juncal Norte, se corroboró su condición temperada."*

Además, otros expertos a través de las recientes investigaciones concluyen que el hielo de los glaciares en estudio es frío (Milana Anexo III-A, p105, sección 7.6, y Vallon Anexo III-B 4y 5/26 del segundo documento). Al respecto, el Dr. Vallon señala que:

"es razonable afirmar que los glaciares Esperanza, Toro y Guanaco son glaciares fríos, soldados a su cuenca, que éste sea rocoso o movible (morrena basal).

Disponemos por otra parte, de otra fuerte presunción para pensar que los glaciares son a temperatura negativa: es la excelente calidad de las reflexiones de las ondas radar. A la frecuencia de 100 mega Hertzios la experiencia pone, de manifiesto, que no se habrían podido obtener reflexiones a 130 m de profundidad sobre el glaciar Guanaco si el hielo hubiera estado a la temperatura de fusión.

La hipótesis que los glaciares son fríos es pues, a nuestros ojos, la hipótesis científica que tiene más oportunidades de comprobarse; ella no requiere a priori ninguna confirmación experimental. La aserción contraria: "Los glaciares son templados" es altamente improbable." (el subrayado es nuestro).

1) Clasificación del glaciar Esto debe hacerse empleando algunas de las clasificaciones aceptadas internacionalmente. Por ejemplo, aquella del inventario de glaciares de Canadá (ver, por ejemplo, "Information booklet for the inventory of Canadian glaciers", 1973). La clasificación del glaciar debe señalar el tipo primario,

la forma, la característica del frente, el perfil longitudinal, y la fuente principal de alimentación.

Respuesta:

No obstante lo anterior, CMN propone efectuar la clasificación señalada por la autoridad para los glaciares propiamente tales y reservorios localizados cerca del proyecto Pascua Lama como parte del inventario a ser realizado en la Cuenca del Huasco.

En todo caso es importante destacar que en el caso del proyecto Pascua-Lama, existe en la Addenda 2 una cantidad mayor de información respecto a los glaciares que la que corresponde a la clasificación propuesta en el documento citado por la autoridad. Así, respecto a la clasificación de los glaciares, el Dr. Vallon (Addenda 2, Anexo III-B, pagina 6-26) y el Dr. Milana (Addenda 2, Anexo III-A, pagina 26) concluyen que los glaciares localizados cerca del proyecto Pascua Lama son tipo reservorio o "*glaciaretes*". El Dr. Vallon señala que: **"***Los glaciares de la zona se comportan como glaciares reservorios (glaciers réservoirs) y no como glaciares evacuadores para reanudar una distinción introducida por Louis Liboutry (Traité de glaciologie, Masson, Paris, 1965, tome 2,*[1] *página 458), la comprensión de su metabolismo no requiere la consideración de su dinámica."*

B. Balance combinado.

El balance combinado de un glaciar incluye el balance de hielo (normalmente descrito como balance de masa), el balance calórico, y el balance hídrico. Este balance debe hacerse para todo el entorno del glaciar, la superficie y la base. El balance combinado de un glaciar debe hacerse en ciclos anuales, y que comprendan las ganancias de masa en la estación invernal y la pérdida de masa en la estación veraniega. Es conveniente complementar las mediciones del balance combinado, con perfiles topográficos (o nivelación) de precisión en transectas por la superficie de un glaciar, a partir de puntos fijos y estables fuera del glaciar.

El balance combinado en superficie debe hacerse empleando todas las recomendaciones de UNESCO (Technical Papers de 1970 y Manual de 2003) aplicables, las que se refieren esencialmente a la metodología a utilizar en las mediciones (que son aplicables a todo tipo de glaciares), los parámetros climáticos a medir con instrumentos instalados en la superficie de los glaciares (una o más estaciones en el glaciar), las mediciones (observaciones y descripciones) en la nieve de temporada a realizar en pozos de nieve, la identificación de la nieve de años anteriores, la densidad y distribución de los puntos de medición en un glaciar, la instalación de a lo menos una estación para medir caudales efluentes de glaciares, y diversos otros antecedentes. En campos de penitentes, debe emplearse una

[1] *Tratado de glaciologia, Masson, París, 1965, volumen 2*

metodología específica para determinar tasas de fusión y pérdidas de masas en esas superficie rugosas. El balance combinado en la base del glaciar debe hacerse a partir de antecedentes tales como el gradiente geotérmico, la temperatura al interior del glaciar (en la base en particular) y sus variaciones en el año, la magnitud del deslizamiento del glaciar sobre su base (en el caso de glaciares temperados), y el espesor de hielo.

Respuesta:

Se hace presente que este balance ya ha sido realizado en Pascua-Lama, siendo calculada la pérdida de masa, tanto en la estación invernal como en la estación veraniega, con un control topográfico desde estaciones fuera del glaciar. La información correspondiente fue entregada en el Addenda 2 (principalmente Anexos II-G y III-G).

En efecto, el programa de balance combinado ha sido llevado a cabo según intervalos predeterminados desde marzo del 2003. Esto incluye el balance-masa del glaciar en los glaciares Toro #1, Toro #2, Esperanza, y El Guanaco, utilizando para esos efectos una combinación de estacas de ablación y GPR respecto de la acumulación de hielo y la base del glaciar. Estos datos se encuentran detallados en la Adenda 2, Anexo III-G.

El balance de agua y los balances calóricos se han basado en flujos medidos y datos meteorológicos recolectados alrededor de Pascua -Lama y en estaciones cercanas por un espacio largo de tiempo y complementado por los datos del glaciar cercano el Tapado (ver Ginot, Anexo 2.2.C). Los resultados están detallados en el Adenda 2, Anexo II-G, en el cual se muestran los datos de precipitación histórica y los datos de balance calórico para modelar flujos, así como las estimaciones del balance de masa. Según se detalla en la respuesta 3.31 de la Adenda 2, la proyección del modelo con retrospección en el tiempo genera datos de balance de masa que se parecen a los datos del glaciar Echaurren. Los 50 años de evolución aparente registrados por los glaciares en Pascua parecen coincidir con el retroceso del Glaciar Echaurren, que es el glaciar más cercano en ubicación al proyecto que cuenta con un estudio temporal de balance de masa (ver Vergara y Escobar, 2003, Anexo 2.2.D). Si bien las comparaciones no son exactas, permiten concluir que el mayor incremento de masa en el glaciar ocurre en años en que se registra el fenómeno de El Niño, tal como fue registrado en el año 1998.

Los resultados de estos estudios han sido entregados en forma de resumen en las presentaciones previas a CONAMA (Adenda I), y los detalles de los mismos se han acompañado como apéndices (Adenda II, Anexo III-G).

Respecto al balance y flujo en el base del glaciar, en el Anexo 2.2.A. pag. 76 del Adenda II, Rivera indica que "*Comparando las reflexiones internas del glaciar y de fondo del glaciar, es posible caracterizar y mapear las condiciones hidrológicas y térmicas en la base del glaciar*" Las investigaciones realizadas en Pascua-Lama no han identificado flujo de agua en la base

del glaciar por ser ésta de naturaleza fría por lo cual no forma parte del balance combinado.

Una objeción a las mediciones del balance de masa efectuado podría ser el escaso número de estacas de ablación utilizadas en cada glaciar. Las guías de UNESCO indican que un glaciar típico debe tener 10-15 estacas de ablación. No obstante lo anterior, la ablación en Pascua-Lama ha sido calculada utilizando menos estacas, típicamente 5-10 estacas de ablación. Sin embargo, creemos que, en el caso en estudio, el número de estacas utilizado no compromete los resultados del balance de masa de manera alguna. Esto es debido a que las variaciones de acumulación y ablación son relativamente pequeñas a lo largo de las superficies del glaciar (ver el Informe de Dr. Vallon, Addenda II, Anexo III-B, por ejemplo en página 11/18 donde dice "*figuras 10 y 11 ponen de manifiesto que no existe ninguna relación entre la acumulación y la altitud")*. La acumulación es dominada por los efectos de la acumulación de nieve, y la ablación es dominada por la exposición a la radiación. La variación espacial en la acumulación es determinada por perfiles de GPR a través de la acumulación de nieve, y sondeo manual entre estacas. La variación espacial en ablaciones también se refleja por los perfiles del GPR que se repiten en los mismos cortes transversales en años consecutivos y utilizando la base del glaciar como datos estatisgráficos (ver Adenda 2, Anexo III-G, Apéndice 1, figura 16). Adicionalmente, los penitentes que se desarrollan sobre la superficie de la ablación, introducen una variación mayor en las mediciones de puntos locales comparado con la variación en ablación a través del glaciar, por lo que el simple hecho de agregar más estacas no resuelve este problema. De hecho, el uso de la base del glaciar como un dato estatisgráfico para medir la ablación en los glaciares con penitentes es más exacto que con estacas, particularmente si la frecuencia del mismo GPR y equipo es utilizado cada año, lo cual complementa las mediciones del balance combinado**.**

Es necesario considerar la principal preocupación con relación al impacto ambiental, cuál es el efecto en el flujo de agua en los valles abajo. El nuevo plan para reubicar el hielo no contempla la pérdida del flujo de agua, sin embargo si esto ocurriese, las cifras conservadoras estimadas por el titular son cuatro veces más altas que aquellas estimadas por la DGA (ver informe sectorial referente a Addenda 1, con fecha 15 de abril, desde el director del DGA al intendente de la tercera region). Además la DGA indicó que una perdida de 10 hectáreas (el doble de la cantidad para ser intervenida ahora) no crea un impacto significativo en la calidad o cantidad del agua o del ambiente aguas abajo desde la Cuenca El Toro.

El balance combinado es evaluado en forma adicional por el Dr. Vallon (Adenda 2, Anexo III-B) y el Dr. Milana (Adenda 2, Anexo III-A, paginas 81 a 103), los cuales señalaron que la cifra estimada por impacto por hectárea de hielo es menor que el valor estimado por el titular.

El Dr. Vallon en el Adenda 2, Anexo III-B, pagina 4/26 dice "*el glaciar Esperanza podría muy bien haber desaparecido naturalmente cuando el desplazamiento del hielo se vuelva*

indispensable, en una docena de años, es inferior a 10 hectáreas. Pues, aunque el glaciar Esperanza desapareciera en esta época, la modificación de la superficie cubierta de hielo no debería afectar a los caudales de estiaje estivales de manera mensurable (10 hectáreas ≡ 6 a 13 litros por segundo o sea menos del 2 % del caudal "de estiaje estival", valor bien inferior a la precisión de las medidas de caudal de los ríos, aproximadamente de 10 a 20 %, en el mejor de los casos)."

El titular ha utilizado los documentos UNESCO Technical Papers de 1970, y Manual de 2003 en el programa implementado de balance combinado en Pascua-Lama. Adicionalmente a los materiales de referencia mencionados anteriormente, existen recomendaciones útiles entregadas en "Una estrategia para monitorear glaciares" (1997, US Geological Survey circular 1132). Esto proporciona una visión general de los diferentes niveles del monitoreo de glaciar disponible.

C. Deformación (o desplazamiento)

Los glaciares se desplazan debido a: (i) la deformación visco-plástica del hielo bajo su propio peso, (u) el deslizamiento de hielo sobre su base cuando el glaciar es temperado. Los espesores de los glaciares en el proyecto Pascua Lama, indican que todos ellos (con la sola posible excepción del glaciar Toro 2) exceden aquel mínimo necesario para ocasionar deformación del hielo y desplazamiento. El deslizamiento sobre la base debiera ocurrir si el glaciar es temperado en la base, a lo menos parte del año.

La determinación de la tasa de desplazamiento en glaciares pequeños (incluidos Guanaco y Estrecho) es seguramente baja, y su determinación debe hacerse con métodos e instrumentos topográficos que consideren la precisión necesaria para asegurar la obtención de datos reales. Los puntos a medir pueden ser los mismos establecidos para el balance de masa y eventuales sondajes. La instalación de los puntos (materiales, construcción, etc.) debe asegurar que estos no se pierdan durante el invierno, o se tumben durante el verano al quedar totalmente expuestos. Las medición de la red de puntos debe hacerse como mínimo dos veces al año, al término de la estación invernal y al término de la estación veraniega, para determinar los desplazamientos anuales y las diferentes tasas en re los meses de verano y de invierno. Si la determinación de la temperatura del glaciar y sus variaciones en el año muestra que hay agua en la base del glaciar al menos parte del año, debe medirse la velocidad del deslizamiento en la base del glaciar. Esto se realiza observando con inclinómetro la deformación que ocurre en el tiempo de un sondaje vertical. Para ello, pueden emplearse sondajes de exploración del glaciar ejecutados con otros propósitos.

Respuesta:

El Titular está dispuesto a implementar las mediciones a través de los métodos e instrumentos topográficos que se indican. Hemos de anotar que se han tomado medidas respecto del desplazamiento de los hielos. Los desplazamientos observados utilizando el método DGPS fueron lo suficientemente pequeños en Toro 1, Toro 2, y Esperanza para demostrar la existencia de un movimiento insignificante (cambios de menos de 2 o 3 metros por año, los que están dentro del nivel de certeza del método). El titular tiene algunas mediciones efectuadas con estaciones totales de las estacas del glaciar, sin embargo, propone mejorar estos datos para determinar desplazamientos más precisos, según lo solicitado en este ICSARA III. Esta información sería entregada como parte integral del "Plan Final de Reubicación de Hielo" que el titular debe entregar a Conama, según lo establecido en RCA 039 / 2001, Ítem k.

Por otra parte, el tema de la deformación del hielo fue evaluado por el Dr. Milana (Addenda 2, Anexo III-A, pagina 107 a 110) y por el Dr. Vallon (Adenda 2, Anexo III-B, p6/26). Al respecto el Dr. Vallon indica que *"El estudio de la dinámica de los glaciares Toros y Esperanza podría proponerse, como reto, a un alumno de Ingeniería topográfica, deseando demostrar sus conocimientos técnicos. Pero esta hazaña técnica tendría bien poco interés científico."* El Dr. Vallon en pagina 6/26 concluye que *"Los glaciares que son probablemente fríos y soldados a su cuenca, la determinación de la velocidad de deslizamiento está sin objeto."*

D.Variaciones.

Debe estudiarse y establecerse las variaciones glaciares a corto y largo plazo. Por corto plazo se entienden las variaciones en tiempos históricos, incluidas las de años recientes.Por largo plazo se entienden las variaciones ocurridas durante los períodos glaciales en el Cuaternario (a lo menos la última glaciación).

Las variaciones históricas deben documentarse correctamente, empleando antecedentes como:

a) fotografías aéreas tanto en años secos como lluviosos,
b) estudios de geología glacial en las proximidades de los glaciares,
c) estadística meteorológica de la mayor extensión posible,
d) variaciones (o diferencias) de la biota en el área

Particular atención debe prestarse a posibles intervenciones que inducen cambios, en los glaciares, como la construcción de un camino sobre el glaciar Toro 1, presentado posteriormente como una separación del glaciar, pero que no se evidencia como tal en los perfiles de espesor de hielo. Las variaciones de largo plazo deben investigarse con estudios de geología glacial (suelos, formas de erosión y depositación glacial, dataciones cuando es posible encontrar el material adecuado, etc.) a lo largo de valles, alcanzando hasta las mayores extensiones posibles de los glaciares.

Respuesta:

Las variaciones a corto plazo han sido evaluadas utilizando las fotos aéreas disponibles, a partir del año 1955. Estos resultados fueron entregados en presentaciones previas, incluyendo el análisis de variaciones en el área y proyecciones futuras, en la Adenda I y II (Anexo III-A, p33 a P36). Adicionalmente, se han obtenido imágenes de Ikonos de alta resolución para el área del proyecto, las que seguirán realizándose en intervalos semianuales durante la vida del proyecto.

La variación a largo plazo en la glaciación regional está documentada en informes publicados de interés académico debido a la extensiva glaciación en los valles cercanos durante el clima de Pleistocene mucho mas mojado (eg: Late Quaternary Glacier response to humidity changes in the arid Andes of Chile (18 - 29ºS). Ammann, Jenny, Kammer, Messerli, 1999, Anexo 2.2.E), lo cual muestra información solicitada pero que no tiene incidencia para los efectos de la evaluación ambiental.

Adicionalmente, evidencia de tipo geológica o biológica para la extensión Neoglacial de los glaciares está diseminada en el área de Pascua-Lama, sin embargo morrenas laterales del Toro #1 fueron identificadas en una fotografía mostrada en la Adenda II.

Muestras de sedimento provenientes desde lagos proglaciales, que generalmente son utilizados en este tipo de investigaciones, se encuentran en el Valle Ortigas y una investigación de ellos forma parte del plan de monitoreo en Adenda II.

La división del Toro #1 y Toro #2 en cuerpos de hielo separados en una parte superior e inferior es apreciable en las recientes imágenes de Ikonos y en el perfil generado por GPR, el cual también muestra el espesor del glaciar tendiendo a cero en estas ubicaciones. El camino que cruza el Toro #1 es coincidente con esta separación en donde el hielo sobre la superficie no es aparente, pero no es indicativo de una relación directa como impacto. También es claro que hay otros puntos donde los glaciares han sufrido ablación a un grosor cero, particularmente alrededor de las periferias o la formación de hielo cubierto debido al transporte de materia durante el derretimiento de verano.

E. Estabilidad General.

> ***Por definición los glaciares se mueven. Sin embargo, existe una estabilidad general que es preciso evaluar. Esto se refiere al peligro del deslizamiento catastrófico de glaciares enteros, o de partes de glaciares, pendiente abajo y a grandes velocidades de desplazamiento. Esto ha ocurrido en el pasado en glaciares de la cordillera del centro de Chile y en otros países también, y debe analizarse cuando se***

proyectan obras al pie de glaciares o en la trayectoria de un eventual deslizamiento, y más aún cuando se intervienen glaciares.

Los parámetros básicos a emplear en la investigación de la estabilidad de un glaciar, además de los esenciales como forma y espesor del glaciar son:

> Propiedades geotécnicas de las masas de hielo y sus discontinuidades
> Propiedades geotécnicas del material en la base del glaciar, en particular la presencia de tu glaciar con abundante arcillas, y tanto helado como saturado.
> Forma y rugosidad del eventual lecho rocoso. Aceleración sísmica máxima posible en el área.
> Alto nivel freático en el glaciar en condiciones climáticas particulares.
> Combinación de las dos anteriores

La presencia de til en la base de los glaciares parece haber sido el principal responsable de los deslizamientos glaciares, pero las propiedades de este material saturado y cargado por el glaciar deben ser analizadas de manera especial, pues no se reproduce fácilmente en laboratorio.

La estabilidad, o más bien el Factor de Seguridad, de un glaciar o de parte de un glaciar, debe evaluarse empleando para ello modelos geotécnicos adecuados. Esto es absolutamente necesario hacer en glaciares que serán intervenidos directa o indirectamente.

Respuesta:

De ser requerido, el Titular realizará los estudios de estabilidad requeridos utilizando los modelos geotécnicos que se indiquen. No obstante, al respecto se aclara que, a diferencia de lo que se sugiere en la pregunta, El Titular en ningún caso intervendrá el pie de los glaciares ni prevee la construcción de obras situadas en las trayectorias de un eventual deslizamiento (incluido el canal perimetral bajo del glaciar Estrecho). En efecto, según lo señalado en el memo adjunto en el Anexo 2.1.A. el proyecto Pascua Lama incluye solamente la intervención de los glaciares reservorios de la cuenca El Toro: Toro #1, Toro #2 y Esperanza. La intervención señalada en el EIA importa la excavación de las partes superiores de cada uno de estos reservorios, y además en el caso específico de Toro #1 conlleva la construcción de un depósito de hielo sobre su superficie que reciba los hielos excavados, pero en ningún caso se "proyectan obras al pie de los glaciares".

LLos glaciares para ser intervenidos en la cuenca del Toro, sin excepción alguna, han sido clasificados como "fríos", lo cual implica una base del glaciar adherida a la fundación. La fundación por su lado, de acuerdo al plano geomorfológico presentado en la Adenda 2, está afectada por permafrost, el cual proporciona consistencia y resistencia a los materiales que lo constituyen, entendiéndose por tales depósitos de suelos o roca.

Por otro lado, los factores concurrentes en un deslizamiento catastrófico ya sea de partes de un glaciar o del glaciar entero incluyen una fundación empinada, constituida por materiales geotécnicamente incompetentes (materiales no drenados o de baja resistencia al corte), un glaciar de hielo con contenido de agua libre y una pobre adherencia entre la fundación y el glaciar. Adicionalmente, se deben considerar para efectos de ese desplazamiento las condiciones de sobrecarga y de sismicidad del área.

Para el glaciar Toro #1, donde se construirá el depósito de hielo, se observan las siguientes condiciones favorables de la fundación:

i) se observa, en el sector de la base del glaciar, parches de afloramientos rocoso indicativo de una roca basal subsuperficial, y/o de depósitos de suelos de pocos espesor;
ii) el mapeo geomorfológico ha definido zonas de permafrost en este entorno;
iii) la fundación en el sector del pie del glaciar presentaría, de acuerdo a las prospecciones con GPR un perfil longitudinal subhorizontal;
iv) la superficie del glaciar presentaría una pendiente alrededor de 10°.

Los análisis de estabilidad efectuados para estudiar el comportamiento del Toro #1, Toro #2, y Esperanza consideraron lo siguiente:

i) análisis bidimensionales usando técnicas de equilibrio límite;
la situación actual del glaciar Toro #1, como esta naturalmente y además c
ii) propiedades geotécnicas de los materiales, especialmente del hielo glaciar proveniente de estudios de retro análisis que involucran cuerpos de hielo;
iii) un potencial deslizamiento generado a partir de una superficie de falla a lo largo de la interfase de la fundación y el glaciar modelado como bloque;
iv) un análisis de sensibilidad de los parámetros de resistencia de la interfase de la fundación y del glaciar;
v) un sismo de análisis equivalente al máximo creíble de la zona del proyecto, asociado a aceleraciones máximas de 0,30 g.

Los resultados de los análisis de estabilidad (Anexo 2.1.A) para potenciales deslizamientos catastróficos del Toro #1 indican factores de seguridad superiores a 2,0 para condiciones de sobrecarga (depósito de hielo) y sísmicas (pseudos estáticas), por lo que las probabilidades de falla pueden ser consideradas como de bajas a muy bajas.

Además, debido a que existe el plan de excavar la parte superior de los glaciares y no el sector del pie del glaciar, los otros glaciares Toro 2 y Esperanza no van a sufrir deslizamientos.

Esta pregunta, por otra parte, parece sugerir la posibilidad que estos glaciares puedan ser susceptibles de un desplazamiento rápido**,** el cual corresponde a una conducta especial de un glaciar en donde éste periódicamente experimenta movimientos rápidos, entre los periodos más largos sin movimiento. Un ejemplo local de tal conducta es el Glaciar Horcones, el cuál se mueve rápidamente hasta un promedio de 4 kilometros en un año. Un

ejemplo de la identificación y parámetros de control es entregado por Clarke, Schmok, and Ommanney (1986) Characteristics of Surge-Type Glaciers. Journal of Geophysical Research.

Se debe mencionar que los glaciares con un desplazamiento rápido fuera de lo común son, en general, de fácil reconocimiento debido a que tiene características tales como los distintos diseños de morrenas, depósitos terminales y una historia de movimientos rápidos observados. A este respecto se debe destacar que ninguno de los glaciares en el área del Proyecto Pascua-Lama exhibe estas características.

F. Permafrost

A modo de introducción en este tema quisiéramos señalar que el término Permafrost no debe confundirse con la existencia de hielo. No obstante puede existir hielo en áreas de permafrost, le expresión permafrost está referida al régimen termal del terreno, no a su contenido de agua. El contenido de hielo, en caso de ser observado en cuerpos permafrost, es variable y por lo general esta concentrado en el punto mas alto del permafrost debajo de la capa activa.

El hielo, en el evento de estar presente debajo de la capa activa, no se derretirá a menos que el calentamiento climático cauce el deterioro del cuerpo permafrost. Sólo el curso del agua a través de la capa activa podría contribuir con la escorrentía. En particular, en los años calientes y secos, es teóricamente posible que el hielo en la parte superior del cuerpo permafrost se derrita y origine escorrentía. Sin embargo, esta zona posteriormente se convierte en el fondo de la capa activa debido a que se descongela según la estación.

> ***El Titular ha entregado antecedentes incongruentes respecto al suelo helado en el área. Por ejemplo, dice que la isoterma de 0°C se encuentra a 800 m por debajo del piso de los glaciares (un valor aparentemente erróneo), y por otro lado los datos de temperatura encontrados en un pozo de hasta 200 m de profundidad muestran valores entre +3 y +5°C (que el titular considera erróneo.***

Respuesta:

Según lo indicado en la respuesta 3.30 del Adenda 2 "debe tenerse en cuenta que las partes bajas de ellos (glaciares) están ubicadas a casi 800 m de altura por encima de la isoterma de 0ºC y que el gradiente térmico del aire es casi de 1ºC/100m. Por ello, se debe recalcar que no existen dudas de que estos cuerpos tienen base fría, lo que es resultado de su posición muy por encima de la isoterma anual de los 0ºC. Independientemente, cabe citar que en un estudio de un glaciar aún mas bajo altitudinalmente, ubicado 50 km hacia el sur, se describió como de base fría (Milana y Maturano, 1999). Los datos de temperatura en profundidad, recogidos en el Cerro Tapado (Ginot et al., 2002) y en Pascua-Lama, indican condiciones medias de temperatura del hielo de -8ºC cerca de los 5000m de altitud. Esta

temperatura garantiza secciones congeladas superiores a los 130 m, que es la profundidad máxima de hielo registrada en el caso del Glaciar Guanaco."

En virtud de lo expuesto anteriormente, podemos concluir que es la "base" de los glaciares la que está ubicada a 800m arriba de la cota mínima de la "línea superficial" de la isoterma cero, y no que el permafrost está 800m abajo de los glaciares (lo cual implicaría que estos tuvieran una profundidad de 800m). El método GPR utilizado en el Guanaco (ver Adenda 2, Anexo III-G, figura 13 de apéndice 5A) indica que la base del permafrost en ese parte es de alrededor de 130m por debajo de la superficie en esa zona.

Por otra parte y con respecto a los sondajes efectuados a 200 m de profundidad que mostraron datos de temperatura con valores entre + 3 y 5C, tal y como se indica en Adenda 2, Anexo III-A, Sección 3.2, el titular ha sostenido que no se pueden usar estos datos como indicadores de permafrost. Las mediciones de temperatura se llevaron a cabo en terreno con alteración de la zona alrededor del yacimiento lo cual muestra temperaturas positivas. Esto es debido a que este resultado junto con los resultados del modelo termal indican que el régimen termal ha sido interrumpido durante la perforación, probablemente a través de la introducción de agua y oxigeno en las rocas alrededor de los sondajes, lo que ha generado reacciones exotérmicas. Estas reacciones han producido el suficiente calor para elevar y mantener la temperatura de la roca alrededor del sondaje a temperaturas sobre cero grados.

Los resultados del modelamiento termal en otras locaciones, por ejemplo Schrott 1991 (Anexo 2.2.F), indican que las condiciones de terreno congelado se presentarían en los niveles superiores de la futura mina. Esto es consistente con la información publicada sobre elevaciones de permafrost cerca del glaciar Tapado. La isoterma 0 (basado en temperatura de aire promedio) está a a partir de los 4200 metros de altura y por lo tanto se espera permafrost en forma discontinua sobre esta elevación.

> ***Por ello, se solicita al titular que se realice un adecuado estudio del suelo helado señalando, en toda el área afectada:***
> ***a. Profundidad máxima del suelo (o roca) helado, probada con datos de exploración geofisica corroborados con sondajes.***

<u>Respuesta:</u>

El Titular se compromete, de así estimarlo la autoridad, a efectuar el estudio del suelo helado señalando lo solicitado. No obstante, se señala que en el memorando adjunto en el Anexo 2.1.B se ha efectuado una estimación, a grandes rasgos, a fin de contextualizar las posibles áreas de permafrost ubicadas alrededor de la mina. Para estos efectos, se utilizó una simulación básica que considera que sobre los 4200m, la isoterma cero permafrost es posible y que sobre los 4800m dicha isoterma es probable. Lo anterior es sin perjuicio de que estos

datos deben ser confirmados en terreno considerando variables tales como el aspecto solar y otras, que permitirían un estudio completo. Es necesario tener presente que sólo un 19% de la cuenca aguas arriba de Algodones, que corresponde a las cuencas de Carmen y el Transito, se encuentra localizada sobre los 4200m y en consecuencia en ese lugar podría llegar a existir permafrost. En todo caso de esa área solamente un 0.4% va a ser excavada o cubierta por el botadero de la mina. Respecto de la cota 4800m, nivel sobre la cual es probable la formación de permafrost solamente un 4% de la cuenca se ubica sobre esa elevación siendo sólo un 0.7% de esa área cubierta por el permafrost. Además, hay que considerar que la evolución del permafrost y de una capa activa importa que podrían formarse nuevamente en las diversas áreas de la mina. Por lo tanto la superficie de permafrost que podría existir en las áreas de la futura mina, es insignificante relacionado con el permafrost existente en la cuenca pudiendo, además, formarse permafrost en forma constante alrededor de la mina.

Asimismo, se han tomado medidas de la profundidad máxima de permafrost sobre los glaciares con el método GPR. Los resultados obtenidos indican que el permafrost existe a través de todo el espesor de los glaciares Esperanza (35 m), Toro #1, (28 m) y Toro #2 (12 m). En el Glaciar El Guanaco, existe permafrost en una profundidad de aproximadamente 130 metros o más, según se indica por la penetración de la energía del radar a 200 MHz en aquellas profundidades. Además, se han realizado medidas de sondaje con termistores, sin embargo los resultados se han visto comprometidos por los efectos termales del sondaje. No obstante lo anterior, el titular propone efectuar mediciones de temperaturas respecto de los sondajes solicitados en Icsara II así como un mapeo de permafrost. Los resultados de la investigación serán entregados como parte integral del "Plan Final de Reubicación de Hielo" que el titular debe entregar a Conama, según lo señalado en la RCA 039 / 2001, Ítem k.

b. Contenido de hielo en el suelo helado.

<u>Respuesta:</u>

El Titular se compromete, de así estimarlo la autoridad, a efectuar el estudio del suelo helado señalando lo solicitado. La razón por la cual el Titular no ha efectuado mediciones del contenido de hielo en permafrost se debe a que el permafrost no se añade al ciclo hidrológico anual. No obstante en Anexo 2.1.C se ha efectuado una evaluación del hielo en sondajes, caminos y túneles del program de exploración. Los contenidos de hielo en las rocas perforadas y rellenos evidentemente fueron sólo visualizados en la primera parte de los sondajes y del total de los sondajes perforados menos de 5% encontró hielo. Generalmente el hielo encontrado se ubicaba en el material de relleno coluvial, que corresponde a los primeros metros de roca meteorizada. Cuando se evidenciaba hielo en roca, éste sólo se encontraba en fracturas pequeñas abiertas.

Los trabajos realizados bajo esa cota, como sondajes geotécnicos en la actual ubicación del chancador, no han mostrado presencia de hielo, ni siquiera en el material de relleno en la primera parte de las perforaciones.

Además, datos de muestras de superficie, tomadas entre los 0 y 2 metros de profundidad a través de ripeos utilizando un buldózer D8R, mostraron promedios de humedad de 2,3%. Las muestras tomadas en interior Túnel Alex, presentaron promedios de humedad de 0,9%. Estos datos ayudan a entender la escasa cantidad de humedad, agua ó hielo presente en los primeros metros de suelo y/o roca.

c. Características estructurales del suelo helado (estructuras en superficie que muestran la presencia de suelo helado)

Respuesta:

El Titular se compromete, de así estimarlo la autoridad, a efectuar el estudio del suelo helado señalando lo solicitado. No obstante, podemos señalar que, en sentido estricto, hay muy pocas geoformas de diagnóstico de la presencia del permafrost, por ejemplo los polígonos de la cuña del hielo. No obstante lo anterior, las geoformas que se relacionan con los ambientes periglacial han sido incluidas en el mapa de geomorfología entregado en el Adenda 2, Anexo III-C.

d. Espesor (o profundidad) del horizonte activo (aquel que sufre ciclos anuales de congelamiento y fusión). Variaciones de este espesor según el aspecto (exposición de los terrenos) y cota.

Respuesta:

La capa activa ha sido detectada en varias calicatas, cortes de camino, y sondajes y se encuentra documentada en el Anexo 2.1.C.

Una serie más sistemática de medidas similar a aquellas usadas por Humlum y Matsuoka, (2004, A Handbook of Periglacial Field Methods), serán ejecutadas este verano. La manera más idónea de medir la capa activa y las variaciones anuales es con un equipo termistor de 4 puntos con datalogger, es por ello que estos serán instalados este verano en varias locaciones a lo largo del área del Proyecto. Los resultados demostrarán que la capa activa es más profunda en los taludes que dan al norte pudiendo tener hasta 2 o 4 metros de grosor (ver Anexo 2.2.C)

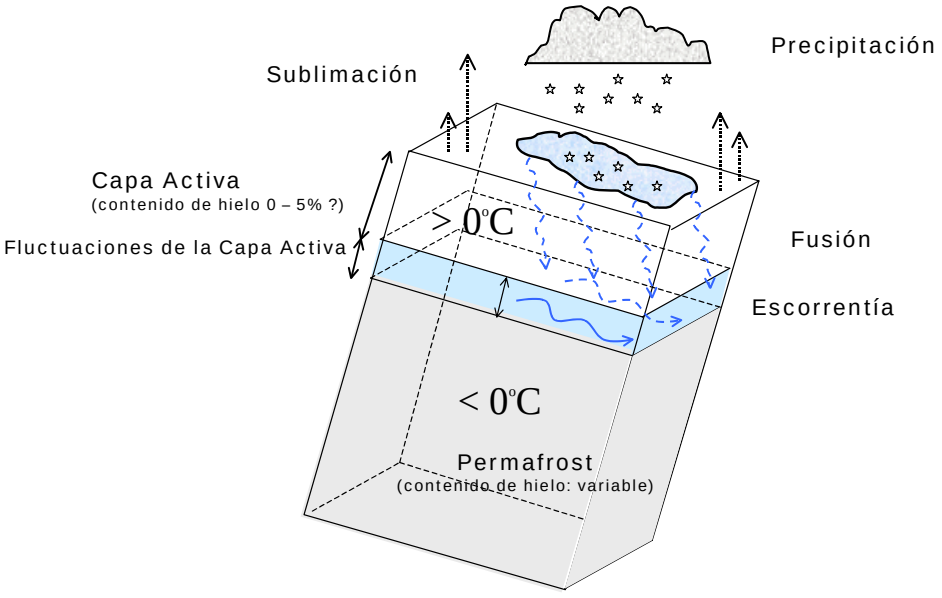
e. Recurso hídrico comprometido en el horizonte activo.

Respuesta:

El Titular se compromete, de así estimarlo la autoridad, a efectuar el estudio del suelo helado señalando lo solicitado. No obstante, se señala que en las áreas de permafrost se producen escorrentías sólo durante la época de derretimiento originándose como consecuencia de la fusión de la nieve que ingresa a la capa activa. La capa activa se define como la capa superior de suelo o roca en una región permafrost cuya temperatura aumenta sobre los 0°C durante los meses de verano. El agua de deshielo que se mueve a través de la capa activa hasta la interfase con el permafrost se congelará y derretirá a medida que la capa activa alcance su mayor espesor a fines de verano. El agua de deshielo seguirá la gradiente topográfica y contribuirá con el caudal. A principios de otoño disminuirá la profundidad de la capa activa debido a su recongelamiento y el agua contenida por acción capilar se congelará, para ser liberada durante el verano siguiente. El hielo puede concentrarse, según la estación, al fondo de la capa activa.

En resumen, el hielo contenido en el cuerpo permafrost debajo de la capa activa no contribuye con el ciclo hidrológico anual. El agua en la capa activa es pasajera anualmente y se origina por la nieve derretida. El retiro de la capa activa puede cambiar temporalmente la forma de la curva hidrográfica debido a un cambio en la capacidad de almacenamiento, pero no afectará la escorrentía anual total.

La siguiente Figura resume este proceso simplificado como un diagrama en bloque.



Típica Hidrología Permafrost para el Área de Estudio

f. Volumen y masa total del suelo helado a ser removida en las excavaciones del rajo y otras obras. Cantidad de solo hielo a remover. Volumen y masa del horizonte activo a remover, y de la cantidad de solo hielo

Respuesta:

Tal y como se señala en el memorandum adjunto en el Anexo 2.1.C, la cantidad de hielo y humedad en el permafrost es mínima. Además, en el memorando adjunto en el Anexo 2.1.B se indica que los áreas de permafrost en la mina son muy limitadas comparadas con aquellas ubicadas adentro de la cuenca.

En realidad el volumen total del permafrost no es muy relevante ya que: (i) no contiene mayor cantidad de hielo; y (ii) el permafrost debajo de la capa activa no genera escorrentías.

g. Señalar el botadero donde se acumularan los detritos de suelos helados, y el efecto de estas masas de hielo en la estabilidad de ese botadero.

Respuesta:

Los detritos de suelos helados serán depositados como barrera de nieve al lado del depósito de hielo ubicado en el Toro 1. Este depósito será un pequeño filo de unos metros de detritos y hielo y por su tamaño limitado no requiere un mayor análisis.
Por otra parte, debido al poco contenido de hielo en el permafrost, el impacto del hielo en el botadero de 1.2 billones de toneladas va a ser insignificante. Esto se muestra en el Anexo 2.1.D. Por el otro lado, los asentamientos propios de la roca estéril del Botadero Nevada Norte asociados a su consolidación, sin influencia del protalus, ocurrirán durante y después de la construcción del botadero. El asentamiento total podría ser un 5% del espesor del botadero. Dada la magnitud del asentamiento esperado durante la construcción y operación del botadero, será difícil de cuantificar asentamientos debido al deshielo del protalus. No obstante, la nivelación de las plataformas del botadero será parte de las operaciones habituales y posiblemente de cierre, de manera que cualquier asentamiento relacionado con el deshielo será reparado como parte normal de las operaciones del botadero.

Asimismo es del caso destacar que la estimación para la humedad de la roca desde el rajo es solamente de alrededor de 2 a 4%, dependiendo la temporada (ver Anexo 2.2.C).

INVENTARIO DE GLACIARES

2.2 El Titular ha proporcionado un inventario de glaciares de la hoya del Rio Huasco, pero incluyendo solamente glaciares mayores. Se solicita que este se complete incluyendo todas las masas glaciares grandes y pequeñas, e incluyendo los

glaciares de roca. Se pide al Titular atenerse a normas establecidas para el inventario de glaciares, por ejemplo: "Information booklet for the inventory of Canadian glaciers", 1973.

Respuesta:

El titular se ha comprometido en el Adenda II a completar un Inventario del Glaciar de la Cuenca El Huasco, comprometiéndose para estos efectos a cumplir con las normas establecidas para el inventario del glaciar, incluyendo aquellos requerimientos establecidos en el documento Canadiense indicado.

Es necesario tener presente que no existen antecedentes en la zona de Pascua Lama respecto a la existencia de algún inventario de glaciares, el cual podría haber permitido la comparación entre los glaciares ubicados en Pascua-Lama con los glaciares existentes en la cuenca de Huasco. No obstante lo anterior, CMN realizó un registro de cuerpos de hielo descubiertos en la cuenca del Huasco (Adenda 2 Anexo III-F) el cual entrega información solamente respecto de la proporción general de hielo descubierto en la Cuenca del Huasco. No obstante alguno de los glaciares más pequeños podrían no haber sido considerados en el estudio efectuado en la cuenca del Río Huasco debido a que dichos glaciares se encuentran fuera del área del proyecto y no están registrados en los imágenes disponibles. Lo anterior pone de manifiesto que sólo un 0,2% de los glaciares de la Cuenca del Huasco serán intervenidos producto de los trabajos en la mina (5 hectáreas).

Asimismo, el Dr. Milana presenta "Inventarios preliminares" en el Adenda 2, Anexo III-A, paginas 30 y 71, lo cual evidencia que el titular no tuvo la intención de presentar un inventario de glaciares.

.

IMPACTOS EN LA INTERVENCIÓN DE GLACIARES

2.3 Se solicita que el titular determine los efectos de la intervención de glaciares analizando los siguientes aspectos:

Respuesta:

Los efectos en la intervención del glaciar han sido determinados y documentados, particularmente en la Adenda 2. Los impactos potenciales de intervenir estos glaciares estarían relacionados con la cantidad y tiempo del flujo de agua en los ríos o con la estética de los glaciares. Los impactos en el flujo en particular han sido analizados y revisados por autoridades sectoriales en forma posterior a la Adenda I. El impacto en el flujo sería el resultado de impactos potenciales sobre los mismos glaciares, tales como excavación, depósito y deposición de polvo.

Sin la existencia de la mina la tendencia de reducción de tamaño de los glaciares ubicados en la cuenca alta del río Huasco es consistente con la reducción de glaciares vista en otros lugares en Chile Central. Estas tendencias similares se aprecian en los Andes y han sido sostenidas por investigadores (Carrasco, Casassa, Quintana, 2003 en Anexo 2.2.H). Asimismo, el análisis de las fotografías aéreas ha permitido identificar una reducción en la superficie de los glaciares a lo largo del período analizado en las imágenes. Adicionalmente los cálculos de balance de masa efectuados en Pascua han demostrado esta reducción, tal como se indica en el Anexo III-G de la Adenda 2.

De cualquier modo, el Estudio de Impacto Ambiental se ha desarrollado asumiendo que los glaciares no van a desaparecer y que, por ende, será precisa la remoción, traslado y manejo de los hielos que están detallados en el Plan de Reubicación de Hielo incluido en el Anexo III-E del Adenda 2. Además, el titular ha planificado la mitigación, en la mayor medida posible, de los eventuales impactos sobre los glaciares.

Por su parte, la evaluación de los glaciares en distintos períodos apunta a establecer una tendencia y no a realizar un análisis de mayor precisión y han sido usados por el titular y en otros estudios de este tipo.

> ***A. La modificación que ocurre en cada uno de los parámetros de la Línea de Base de los glaciares intervenidos directa o indirectamente. Previo a ello es necesario establecer cual es la Línea de Base de cada glaciar.***

Respuesta:

Respecto a establecer cuál es la línea de base para cada glaciar, nos remitimos a lo ya respondido en 2.1. Solo nos cabe agregar, que el impacto hídrico en términos de agua equivalente o referentes a balance de masa, aún cuando la línea de base aportada en base a GPR, estuviere 100% equivocada, sería mínimo. En efecto, supongamos que en vez de tener el sistema GPR un margen de error máximo del 6% como indica el experto Rivera, este fuere del 100%. En este evento, en vez de afectar el 0,2% de los hielos de la Cuenca del Carmen, se afectaría un 0,4%. En términos de agua equivalente, en vez de disminuir el caudal en 2,5 lts/seg promedio, este disminuiría en 5 lts/seg. Desde el punto de vista de impacto ambiental, creemos que en primer lugar, aún en caso de una disconformidad del 100%, estos se encuentran ampliamente compensados con las medidas de compensación propuestas. En segundo lugar, pensamos que de estimarse, desde el punto de vista ambiental viable la afectación de 0,2% de los hielos, no vemos por que razón no lo sería el 0,4%.

No obstante lo anterior, Los datos de la línea base, en función del tema más relevante en este EIA, vale decir el flujo de agua asociado, están detallados a continuación con una simulación de posible impactos.

Análisis de los posibles impactos de la intervención de los glaciares en los caudales

Supuesto	Area glaciar descubierto (Marzo'05) (ha)	Método DGA (Escalado a un evento extremo) Febrero (l/s)	Método DGA Volumen anua (m3)	Modelo EIA (Adenda II Anexo II-G) Febrero (l/s)	Modelo EIA Volumen anual (m3)	Impacto en caudales (Feb) Rio Huasco en Algodones Método DGA (%)	Impacto en caudales (Feb) Rio Huasco en Algodones Modelo EIA (%)	Impactos en volumen de agua Relativo a la presa de 5 millones de m3 Método DGA (# de años)	Impactos en volumen de agua Relativo a la presa de 5 millones de m3 Modelo EIA (# de años)
El plan funciona, la mitigación es efectiva	0,0	0,0	0	0,0	0	0,00%	0,00%		
Toro #1, Toro #2, Esperanza Excavado (el plan y la mitigación fallan)	5,0	2,5	19.665	9,1	70.864	0,06%	0,22%	254	71
Toro #1, Toro #2, Esperanza (completa pérdida de los tres glaciares)	16,5	8,2	64.326	29,6	231.807	0,20%	0,71%	78	22
Pérdida de todos los glaciares en El Toro (incluyendo Toro #1, #2, Esperanza)	24,4	12,2	95.417	44,0	343.850	0,29%	1,05%	52	15
Pérdida de 25% de Guanaco (lado chileno)	66,8	33,4	260.697	120,2	939.457	0,79%	2,86%	19	5
Todo el Río Toro más 25% de Guanaco	91,2	45,6	356.115	164,1	1.283.307	1,09%	3,91%	14	4

Notas:
Escalameinto de un evento extremo de la DGA resulta en un caudal específico de 0,5 l/s/ha para Febrero.
Modelamiento proporcionado en la Adenda II del EIA, Anexo II-G proporciona un caudal específico de 1.8 l/s/ha para Febrero.
La mediana de los caudales para Febrero en Rio Huasco en Algodones es de 4200 l/s

B. La perdida total de masas de hielo en las cuencas. Por los efectos directos en indirectos.

Respuesta:

De ocurrir una pérdida total del hielo de los glaciares excavados en el área del rajo abierto, y ninguna de las medidas de mitigación es implementada o de implementarse, éstas fueren un completo fracaso, el impacto en términos de flujo se estima en 2.5 l/s promedio al año, o 9 l/s en el mes seco de febrero. Esta estimación es validada por la DGA dado que este servicio calculo un impacto potencial aún mas bajo, esto es 2.5 l/s (en febrero).

El impacto indirecto sobre los glaciares puede resultar de la deposición de polvo, de cambios en los patrones de acumulación de nieve, o de cambios en las dinámicas del glaciar debido a que van a ser excavados en parte. Todos estos potenciales impactos indirectos han sido analizados, llegándose a la conclusión de que no serán significativos. No obstante, si todos los glaciares en la Cuenca del Río Toro se perdieran, el impacto estimado según el método de cálculo usado por Titular sería de 1.8 l/s/ha. Si se ocupara el método de cálculo usado por la DGA, éste sería de 0.5 l/s/ha. El área total de hielo de glaciar no cubierto en la Cuenca del Río Toro (definido por el TO1a estación fluviométrica en Marzo del 2005) es de 24.4 has, por lo tanto, en caso de que se perdiera el total de masa de todos glaciares en la Cuenca y no solamente el volumen de los hielos reubicados, el impacto sobre el caudal aguas abajo sería de 44 l/s en Febrero, según método de cálculo del Titular o de 12.2 l/s en febrero ocupando el sistema de la DGA.

Supuesto	Area glaciar descubierto (Marzo'05) (ha)	Método DGA (Escalado a un evento extremo) Febrero (l/s)	Método DGA Volumen anual (m3)	Modelo EIA (Adenda II Anexo II-G) Febrero (l/s)	Modelo EIA Volumen anual (m3)	Impacto en caudales (Feb) Rio Huasco en Algodones Método DGA (%)	Impacto en caudales (Feb) Rio Huasco en Algodones Modelo EIA (%)	Impactos en volumen de agua Relativo a la presa de 5 millones de m3 Método DGA (# de años)	Impactos en volumen de agua Relativo a la presa de 5 millones de m3 Modelo EIA (# de años)
El plan funciona, la mitigación es efectiva	0.0	0.0	0	0.0	0	0.00%	0.00%		
Toro #1, Toro #2, Esperanza Excavado (el plan y la mitigación fallan)	5.0	2.5	19,665	9.1	70,864	0.06%	0.22%	254	71
Toro #1, Toro #2, Esperanza (completa pérdida de los tres glaciares)	16.5	8.2	64,326	29.6	231,807	0.20%	0.71%	78	22
Pérdida de todos los glaciares en El Toro (incluyendo Toro #1, #2, Esperanza)	24.4	12.2	95,417	44.0	343,850	0.29%	1.05%	52	15
Pérdida de 25% de Guanaco (lado chileno)	66.8	33.4	260,697	120.2	939,457	0.79%	2.86%	19	5
Todo el Río Toro más 25% de Guanaco	91.2	45.6	356,115	164.1	1,283,307	1.09%	3.91%	14	4

Notas:
Escalameinto de un evento extremo de la DGA resulta en un caudal específico de 0,5 l/s/ha para Febrero.
Modelamiento proporcionado en la Adenda II del EIA, Anexo II-G proporciona un caudal específico de 1.8 l/s/ha para Febrero.
La mediana de los caudales para Febrero en Rio Huasco en Algodones es de 4200 l/s

C. La posibilidad de subsistir de restos de glaciares afectados por excavaciones, o de glaciares cargados con botaderos, o de glaciares afectados por el mayor polvo de origen industrial (el efecto de diversas concentraciones de polvo sobre el albedo de los glaciares — y sobre la tasa de fusión o sublimación - debe evaluarse con ensayos prácticos en terreno). Masas de hielo afectadas, que no tienen posibilidad subsistir deben agregarse al volumen de hielo perdido (punto B más arriba). Para evaluar el efecto de las cargas sobre glaciares, emplear modelos numéricos de simulación computacional. En los modelos emplear parámetros derivados de los estudios de Línea de Base.

Respuesta:

El Titular se compromete a evaluar la carga sobre glaciares empleando los modelos numéricos de simulación computacional que la autoridad estime pertinentes. Debemos hacer presente que el Titular ya ha desarrollado dichos modelos numéricos según se presenta en el Anexo III-A, Cap. 6.

No obstante lo anterior, el polvo disminuirá el albedo (reflectividad) de la superficie nival, y dependiendo del color del polvo, puede también disminuir el albedo de una superficie de hielo. Dependiendo de la conductividad térmica del polvo, su grosor y distribución, y la disponibilidad de radiación solar, esto puede tener el efecto de aumentar la ablación en la superficie. Esto redundará en un aumento a corto plazo en la disponibilidad del agua de deshielos en los cursos de agua. A largo plazo, la disminución del albedo puede resultar en la reducción del área del glaciar, y como consecuencia resultar en la reducción del flujo hídrico en el período tardío del verano.

Las acciones propuestas son mitigar los efectos del polvo a través del control de los impactos del albedo. La primera medida de mitigación será minimizar en su origen cualquier fuente de polvo, a través de la implementación de medidas, tales como, el riego de caminos, detonación eficiente, el uso eficiente de camiones, instalar el chancador primario de manera subterránea con un sistema de captación de polvo. etc. El siguiente nivel de mitigación es aumentar artificialmente la cubierta nival por medio de barreras de nieve, las que reducen tanto la cantidad de polvo depuesto en la superficie nival, y también agregan nieve a los glaciares para compensar cualquier aumento en la ablación.

Los impactos potenciales en los flujos hídricos debido a la reducción del área del glaciar han sido presentados en la respuesta B mas arriba. Este análisis muestra todas las potenciales reducciones en área de glaciar producto del polvo, y sus impactos asociados a los cursos de agua.

El balance calórico modela los efectos del albedo y entregará información adicional a los procesos físicos detrás de los efectos en los recursos hídricos, pero no es crítico cuantificar exactamente el impacto potencial según se ha explicado anteriormente. El monitoreo en terreno de los cambios en el albedo será utilizado para determinar si las medidas de mitigación son efectivas y entregarán antecedentes para su complementación en caso de ser necesario.

D. Evaluar de manera práctica y teórica la pérdida de masa de hielo que ocurre en el proceso de excavación-traslado-depositación de detritos glaciales. Esto debe hacerse con pruebas pilotos, antes de la intervención de glaciares y con modelos de simulación de fusión de hielo.

Respuesta:

El titular está dispuesto a evaluar de manera práctica y teórica la perdida de masa de hielo que ocurre en el proceso de excavación-traslado-depositación de detritos glaciales en la manera propuesta. Sin embargo, se debe notar que este tema ha sido tratado en el documento Viabilidad de Manejo de Glaciares en la Adenda I. Este documento sigue siendo aplicable a pesar de las modificaciones experimentadas por el plan de reubicación de hielos. En ese documento se entrega información sobre la excavación, transporte, depósito de nieve y hielo que sirven de base para evaluar lo solicitado por la autoridad. Por otra parte, se debe tener presente que la sublimación es mínima durante el corto periodo que dura el transporte de los hielos lo que no pareciera hacer innecesarias las pruebas en terreno solicitadas por la autoridad.

E. Cambios en el efecto regulador que ejercen los glaciares sobre la escorrentía de la cuenca.

Respuesta:

Los glaciares son importantes recursos hídricos en los Andes Centrales pues contribuyen a los ríos en hacia el final del verano, cuando las precipitaciones no existen o son muy pocas. Los glaciares pueden ser vistos como reservorios de agua estacionales con la nieve acumulándose en invierno, para luego lentamente derretirse en verano. La influencia del cambio climático en los glaciares es análoga a la disminución de la altura de un tranque a una tasa que reduce el área disponible de glaciar reservorio, y como consecuencia, a su capacidad para almacenar y liberar agua. El factor de control primordial del rol de un glaciar en el balance anual en el agua es su superficie, y no su profundidad (que controla la longevidad de un glaciar reservorio según cambie el clima). Las áreas relativas de los glaciares reservorios Toro 1 y 2 en relación con los presentes en el Río del Carmen y la cuenca del Huasco (en Algodones) son las siguientes:

	Área total (ha)	Área Relativa (%)	Volumen Total (miles m3)	Volumen Relativo (%)
Glaciares del Rio Toro (cuenca completa)	25	100%	1,984	100.00%
Glaciar Guanaco (porción en Chile)	89	28%	35,600	5.57%
Glaciar Estrecho	139	18%	90,100	2.20%
Glaciar Amarillos	30	83%	5,900	33.63%
Glaciar Ortigas 1	101	25%	65,300	3.04%
Glaciares en Rio Del Carmen	1,183	2.1%	440,900	0.45%
Glaciares en Rio Huasco Algodones	2,260	1.1%	892,600	0.22%

Notas:
Las áreas de la Adenda 2, Anexo III-E (Plan de Reubicacion de Hielo) no incluye plataformas de seguridad en el límite del rajo
Referencia EIA Adenda 2 Anexo III-F (Relevamiento de Cuerpos de Hielo Descubierto en la Cuenca del Rio Huasco Algodones)
Estimación de los volumenes de los glaciares de acuerdo a la metodología de la DGA 1979

En esta tabla se puede apreciar que el área total de todos los glaciares en la cuenca del Río El Toro es 2.1% de los glaciares en el Río El Carmen, y sólo 1.1% de los glaciares en el Río Huasco (en Algodones). Esto significa que el efecto regulatorio de todos los glaciares en la cuenca del Río El Toro es relativamente menor. Por ejemplo, en cuencas temperadas, no existen efectos medibles en los flujos a menos que haya un mínimo de 5% de glaciar en la cuenca.

El impacto en los recursos hídricos ha sido abordado anteriormente en otros documentos y analizados según se presenta a continuación. La principal influencia de los glaciares en el flujo hídrico es la misma que en cualquier cuenca con glaciares en el mundo, y pueden ser resumidas de la siguiente manera:

- Un peak secundario tardío en el verano,
- Variabilidad marcada diurna en las descargas de verano,
- Flujos hídricos no esperados y a veces importantes ,

- Un retraso en los flujos peak anuales en relación con cuencas sin glaciares,
- Una disminución en la variación de los flujos anuales y mensuales.

Se debe notar que los glaciares en la cuenca de Pascua Lama son relativamente pequeños en comparación con las áreas de la cuenca. Es por esta razón que la comparación de los datos de los cursos de agua de cuencas con y sin glaciares no revelan diferencias significativas.

Dos son las principales fuentes de los cursos hídricos para las cuencas en el área de Pascua Lama: el derretimiento del pack de nieve anual y el derretimiento del glaciar permanente. La fuente primordial de los cursos es el agua del pack anual. Este se produce en el verano con un peak en Diciembre. En el verano tardío (febrero y marzo), el pack anual de nieve desaparece, y el flujo del derretimiento del glaciar pueden exceder los flujos de pack anual de nieve. De esta manera, los flujos peak en el área del Proyecto resultan del derretimiento del pack anual, pero una parte significativa del volumen anual de caudal puede provenir del derretimiento del glaciar, particularmente en años secos. Si el volumen del derretimiento de glaciar es lo suficientemente grande, puede producir un peak secundario en el verano tardío. Esto es cuando, el aumento de la exposición de la cubierta de hielo, unido a temperatura mas cálidas, combinan el proceso de derretimiento del glaciar.

Para mayor información, ver la Adenda I y en los informes de balance de aguas (Adenda 2, Anexo II-G).

F. Cambios en el valor paisajístico del área intervenida por la afectación de los glaciares.

Respuesta:

Es del caso señalar que el proyecto podría generar impactos potenciales en la estética de los glaciares debido a la intervención de los mismos. Esto es debido a que la remoción del hielo del glaciar para el desarrollo del rajo abierto dará como resultado un cambio perceptible en el escenario local. Sin embargo, se debe tener presente que esta zona no presenta concurrencia de personas que no estén sino relacionadas con la actividad minera de manera que la afectación de tipo paisajística tendrá un efecto limitado.

Por otra parte, se debe consignar que los glaciares propiamente tales, Estrecho y Guanaco, no serán intervenidos de manera alguna.

G. La producción de agua ácida desde un botadero de estériles, considerando que este se encuentra localizado sobre un glaciar de roca, con lo cual se generan núcleos calientes por lixiviación bacteriana dentro del botadero y una aún mayor producción de aguas ácidas por la rápida fusión del hielo afectado por núcleos calientes.

Respuesta:

La construcción del botadero Nevada Norte sobre el protalus modificará el régimen térmico. Sin embargo, como se discute en Anexo 2.1.D la depositación de una capa de 200 m de espesor aislará el hielo contenido en la fundación de cualquier variación estacional de la temperatura ambiente. La experiencia en operaciones mineras en el Ártico indica que el hielo no se deshiela rápidamente o que en muchos casos se preserva bajo los botaderos. Por ejemplo, en Red Dog Mine, Alaska, un cuerpo masivo de hielo ha perdurado sin derretirse en la fundación de un botadero desde su construcción efectuada a finales de los '80. Las temperaturas del terreno en esa área, previo al desarrollo del botadero eran de aproximadamente -0,6°C. En Whistle Mine, cercana a Sudbury Ontario, se detectó congelamiento al interior del botadero mientras se excavaba para rellenar la mina a rajo abierto. El permafrost no se produce en forma natural en Sudbury, por lo que las condiciones desarrolladas son necesariamente consecuencia de la construcción del botadero.

La segregación de la roca estéril producto de su depositación a lo largo del talud promueve el desarrollo de bajas temperaturas en la base del botadero. En la medida que la temperatura ambiental sea menor que la temperatura promedio de la roca del botadero, se produce una circulación de aire. Durante el invierno, el aire tibio asciende dentro del botadero mientras que el aire frío desciende enfriando la base del botadero con roca más gruesa. En verano, cuando la temperatura ambiental se eleva sobre la temperatura dentro del botadero, el aire frío y más denso es atrapado en el botadero y la circulación de aire se detiene.

Aunque la experiencia en otras operaciones mineras en climas fríos indica que el hielo contenido en la fundación del botadero de estéril Nevada Norte no se derretirá, esto no es necesariamente así. De esta manera, el eventual deshielo del hielo contenido en la fundación tendría dos impactos sobre el botadero: i) aumento de la infiltración en la fundación y en el botadero; y ii) asentamientos diferenciales causados por la pérdida de volumen en la fundación.

No obstante lo anterior, según se ha explicado, el glaciar de roca ubicado en la zona del botadero es muy pequeño y no tiene una importancia significativa en el balance hídrico del río Estrecho. De todas maneras, y aunque en la actualidad no existen flujos significativos, en caso que pudiese drenar agua desde este glaciar de roca, el agua será recolectada y manejada por el sistema de captación, almacenamiento, y tratamientos de aguas ácidas. Como se explicó en el Adenda 2, este sistema puede manejar grandes cantidades de agua con amplias variaciones en el flujo, incluyendo cualquier agua que pudiese liberarse de este glaciar de roca.

H. A largo plazo, la regeneración de un glaciar de roca sobre la superficie del Botadero Norte, y el efecto de avance del glaciar sobre el botadero (erosión

subglacial, aporte hídrico, carga sobre el botadero. A corto plazo, el efecto del glaciar de roca y de sus formas de alimentación (impacto de avalanchas) sobre el canal perimetral al botadero.

Respuesta:

Dentro del perímetro del futuro botadero Nevada Norte, existe una pequeña geoforma que presenta un pequeño frente escarpado, y una superficie irregular que, en términos generales, corresponde a un glaciar de roca; sin embargo, el término técnico que le corresponde a esta geoforma es el de *pro-talus rampart* (protalus). La extensión areal de este cuerpo es de alrededor de 3 ha. Este protalus se encuentra en la ladera norte del valle del Río del Estrecho, entre las elevaciones 4550 m y 4600 m, como se muestra en la Figura 1 de Anexo 2.1.D y presenta un frente con taludes, en las caras del lóbulo, del orden de 40°.

Este protalus será, en el largo plazo, completamente cubierto por el botadero Nevada Norte por efecto de una columna de roca estéril de aproximadamente 200 m de altura. El protalus se encontrará a una distancia aproximada de 250 m al interior del botadero, medidos desde la cresta final del mismo.

Sin perjuicio, que el titular se compromete a realizar los estudios que la autoridad estime pertinentes, éste ha iniciado estudios e investigaciones conducentes a la caracterización de este protalus, relativos a la estimación de la cantidad de hielo presente y su régimen térmico.

Por otra parte y respecto a la remota posibilidad que un glaciar de roca se forme sobre la superficie del botadero, se hace presente que éste sería relativamente benigno en términos de erosión, agua derretida, y carga adicional. Las avalanchas que pudiesen ocurrir en este talud han sido consideradas en el diseño del canal perimetral. Aún en el evento de que una avalancha llenara completamente la cuneta del canal, éste retendría su capacidad de drenaje total por el diseño establecido.

IMPACTOS DE LA NIEVE ACUMULADA EN LAS OBRAS

2.4 En las faenas mineras en la alta cordillera se suelen acumular importantes volúmenes de nieve, al menos en algunos años particularmente lluviosos. Antecedentes de esto se han presentado en el área del proyecto Pascua Lama. Si el Titular remueve y acumula la nieve que estorba sus operaciones (por ejemplo en el rajo) debe indicar:

- ***a. Donde se dispondrán los botaderos de nieve.***
- ***b. Cuales serán las dimensiones de estos botaderos de nieve.***
- ***c. Que se hará para garantizar la estabilidad de los eventuales botaderos de nieve.***
- ***d. Como se manejará las aguas provenientes de la fusión de la nieve en los botaderos de nieve.***

e. Que medidas se adoptarán para no contaminar los eventuales botaderos de nieve con residuos industriales.

f. Como se modifican los aportes hídricos a la cuenca por la intervención del manto de nieve natural.

Respuesta:

Con relación a los ítems a – d de esta pregunta, hacemos presente que, en general, la nieve removida de áreas de trabajo, de transporte y de áreas de acceso será depositada en distintos lugares dentro del sistema de drenaje de cuencas, por tanto no están contemplados grandes "botaderos de nieve". Generalmente la nieve se recogerá utilizando maquinaria especializada, será cargada en camiones y transportada fuera de las áreas de trabajo. La nieve despejada de los caminos de servicios y accesos generales fuera del área del rajo será, en general, removida utilizando maquinaria especializada depositándola en lugares donde se derritan y drenen naturalmente siguiendo su curso natural. La nieve despejada de los bancos de la mina y de los caminos de transporte en el rajo ubicados en el área de operaciones de la mina, será generalmente acumulada en las áreas desarrolladas dentro del rajo para el almacenamiento del agua de contacto. La nieve removida alrededor del campamento y áreas generales de servicio será cargada en camiones y transportada a áreas planas apropiadas en donde pueda ser depositada en capas relativamente delgadas. En ningún caso, la nieve retirada será depositada en lugares donde contribuya a aumentar el flujo de ARD o a generar una posible formación de avalanchas.

Por otra parte, los desechos industriales que no sean residuos peligrosos serán incinerados y las cenizas serán depositadas en el relleno sanitario designado. Los desechos peligrosos serán almacenados temporalmente en contenedores, en un área segura y transportados fuera del sitio a una instalación apropiada. El titular no ha contemplado que los residuos industriales se depositen en aquellas áreas en donde se colocará la nieve removida.

Por último, en consideración a que la nieve removida será distribuida en cuencas respectivas donde se acumula, no existirá impacto hidráulico.

IMPACTOS DEL MATERIAL PARTICULADO SOBRE LOS GLACIARES

2.5 Se solicita al titular que se valide en terreno, los valores de tasas de fusión de hielo debidas a la acumulación de polvo, ya que estas pueden ser significativamente mayores con efectos no solo en los glaciares pequeños adyacentes al rajo, sino también en los Glaciares mayores.

Respuesta:

El titular se compromete a validar en terreno los valores de tasas de fusión debido a acumulación de polvo según lo solicitado.

En todo caso, es importante destacar que los glaciares en el área de Pascua–Lama son naturalmente polvorientos y que actualmente ya existe una gran cantidad de polvo depositado naturalmente sobre los glaciares (ver la información presentada en Adenda 2, Anexo III-A Sección 4.11, pagina 102 y Anexo III, pagina 11/26 de este segundo documento). Esto es especialmente aplicable en la zona del Toro y Esperanza en donde la geología es tal que las exposiciones superficiales son fácilmente erosionables y transportables, tanto por el viento como por el derretimiento, cubriendo frecuentemente el hielo que está en superficies bajas.

2.6 En el Vol. 1 Pág. 3-1 señala que el recubrimiento con detritos de los glaciares definidos como glaciares reservorios, alteraría la función hídrica de estos hielos. Sin embargo, en el mismo Vol. Pág. 3-4 señala que los Glaciares. Toro 1, Toro 2 y Esperanza tendrá una mejora en su fisiografia dado el aporte del hielo rico en detritos. Además, más adelante (Pág. 3-6) señala que el plan implica recubrir el hielo desplazado con una capa protectora del propio detrito subglaciar, y en la Pág. 3-30 manifiesta que las cubiertas finas de detritos aumenta la ablación en un 20% como promedio de varias observaciones en alturas similares en el mundo. Asi se le solicita al titular definir claramente las acciones que esperan ejecutar y justificarlas.

Respuesta:

A este respecto, se hace presente que en la página 3.6 del Adenda 2, se explica que sí el objetivo primario respecto de los glaciares es la "preservación" del hielo, y no la mantención de su función hídrica, el titular cuenta con un plan alternativo propuesto por Dr. Vallon. Este plan alternativo implica depositar el hielo excavado en el valle ubicado al Este del cuerpo de hielo Esperanza y recubrirlo luego con una capa protectora elaborada con una gran cantidad de detrito subglacial, es decir roca. Este material aísla los factores de ablación, pero se debe señalar que dicha medida implica la reducción de la función hídrica de estos hielos en una gran medida.

Sin embargo, el plan de reubicación de hielo propuesto en Adenda 2, Anexo III-E, implica un depósito de hielo sobre y adyacente al Toro 1. Este plan está elaborado con el objetivo primario de mantener la función hídrica del hielo sin alteración, conservando el área de hielo descubierto en vez de crear depósitos de hielo cubierto.

El impacto potencial del polvo en los glaciares depende de diversas variables, incluyendo grosor, color, termales, conductividad y tiempo en el año. Para aumentar la tasa de derretimiento se requiere que todas estas variables trabajen en conjunto. Así para aumentar la fusión el grosor de detritus necesita ser menor que varios centímetros, de lo contrario comenzará a aislar el hielo que está debajo del intercambio de energía en la superficie. El color debe ser más oscuro (albedo más bajo) que el hielo en sí, de lo contrario la energía

solar se refleja afuera del mismo. La conductividad termal del polvo debe ser capaz de transmitir calor desde la superficie superior hacia la de contacto con hielo subyacente, de otro modo nuevamente actuará como un aislante. Todo esto debe ocurrir en el tiempo en que haya ablación general, de lo contrario el polvo se incrustará dentro y abajo de la acumulación de nieve y no tendrá efecto.

Por otra parte, en la página 3.4 de la Adenda 2, se explica que una "barrera de nieve" que consista en una mezcla de hielo y detritus, se instalara barlovento del depósito de hielo en Toro 1 mejora la fisiografía de la superficie, lo cual aumentará la acumulación de nieve sobre el depósito de hielo.

Por último, en la página 3.30 se discute el aumento en ablación debido al depósito de las cubiertas finas de detritos, los cuales no son suficientes grandes para aislar la masa de hielo de la radiación solar. Por el contrario, en caso de ser lo suficientemente gruesas, logran aislar el glaciar y protegerlo.

2.7 La ejecución del rajo y otras instalaciones significan excavar la superficie de manera que resulta esperable un cambio en las características del manto geológico que aportaría el material particulado. De esta manera se solicita al titular generar un estudio que de cuenta de las características que tendría el material particulado que eventualmente cubriría los glaciares a intervenir, para estimar los cambios que esta variable implicarían en el comportamiento del albedo, como por ejemplo sobre la conductividad térmica del detrito (Vol. 1 Pág. 3.-3 1) y el efecto que pudiese tener la eventual estratificación de polvo y nievo y/ o mezcla.

Respuesta:

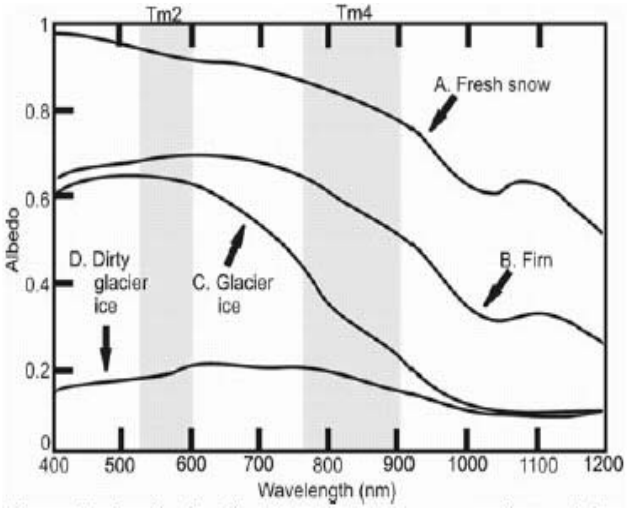
El titular se ha compromete a realizar la mediciones requeridas por la autoridad siguiendo los procedimiento y en la forma que se determine. Sin embargo, se debe notar que el titular ya había comprometido una investigación similar a la solicitada por la autoridad (respuesta 3.10, punto VI "Plan de Monitoreo", del adenda 2).

Conforme a lo anterior, el titular ya inició el análisis de las características que tendría el material particulado que podría cubrir los glaciares a intervenir. Por ejemplo, se han realizado análisis de fuentes de polvo y sus impactos, y según los resultados preliminares, se ha corroborado que el glaciar Guanaco contiene bastante polvo cuyo origen no es la zona de mineralización de Esperanza y Toro 1 y 2 (viene de más al oeste de la futura mina). Esto está acorde con las estimaciones el impacto sobre los glaciares a través del modelamiento de viento y polvo de la Adenda 2 (Anexo III-D y Anexo IV), lo cual indica que las operaciones mineras no van a impactar el glaciar Guanaco.

2.8 Se solicita al titular que aclare porque en el Vol. 1 Pág. 3-56 declara que se planificará un plan de monitoreo del albedo, que sugiere un límite máximo de 0.2 para la variación de la ablación. Y posteriormente señala que la determinación de dicho límite máximo quedará sujeto a consideraciones.

Respuesta:

El monitoreo del albedo entregará una indicación directa de cualquier acumulación de polvo que pueda ocurrir en la superficie del glaciar. El Titular ha sugerido usar como indicador de grandes variaciones de albedo un cambio en el albedo de 0.2, debido a que es una diferencia medible. Sin embargo, en consideración a que se prevén cambios en el albedo en forma natural y estacionalmente (ver la figura abajo; un cambio de 20% de albedo (0.2) representa la diferencia aproximada entre nieve fresca y antigua, y también entre nieve antigua y hielo de glaciar), se plantea complementar las mediciones con sistemas basados en observaciones manuales y adaptar el valor de 0.2 para diseñar un sistema que pueda detectar cambios en albedo por el posible impacto de la mina. El sistema entonces utilizará chequeos visuales, cámaras a distancia y medidas de albedo calibradas en terreno y el valor de 0.2 puede cambiar.



PRESENCIA DE UN GLACIAR DE ROCA EN EL BOTADERO NORTE

2.9 Se le solicita al titular aclarar las técnicas por las cuales se determinó la inactividad del denominado Estrecho-B y su escaso aporte hídrico, siendo el único cuerpo relacionable al glaciar de roca y que quedaría bajo el Botadero Nevada Norte de estériles (Vol. 1 Pág. 3-39), preciso cuantificar con mayor exactitud los aportes hídricos que significan.

Respuesta:

Dentro del perímetro del futuro botadero Nevada Norte, existe una pequeña geoforma que presenta un pequeño frente escarpado, y una superficie irregular que en términos generales corresponde a un glaciar de roca; sin embargo, el término técnico que le corresponde a

esta geoforma es el de pro-talus rampart (protalus). La extensión areal de este cuerpo es de alrededor de 3 ha. Este protalus se encuentra en la ladera norte del valle del Río del Estrecho, entre las elevaciones 4550 m y 4600 m, y presenta un frente con taludes, en las caras del lóbulo, del orden de 40°. Este protalus será, en el largo plazo, completamente cubierto por el botadero Nevada Norte por efecto de una columna de roca estéril de aproximadamente 200 m de altura encontrándose a 250 m de la cresta final del botadero.

En relación a esta geoforma, el titular En el Adenda 2, en la imagen satelital la geogorma no parecia tener cantos y surcos, o frente activo, por lo cual no parecia tener las caracteristicas para ser considerado un glaciar de roca. Posteriormete, el trabajo de terreno (ver Anexo D) ha evidenciado que esta geoforma tiene entre un 2 y un 5% de hielo, coluvio sin clasificar, y con movimiento (ver Anexo 2.1.D). De esta manera, el Titular puede concluir que dicho "protalus rampart" es activo y no inactivo como se sostuvo anteriormente.

No obstante lo anterior, la actividad del Protalus, como se discute en Anexo 2.1.D, no afecta la conclusión general sobre la relevancia de este cuerpo desde el punto de vista de su aporte hídrico. En el peor escenario evaluado la contribución hídrica de esta forma es muy pequeña como para apreciar visualmente cualquier flujo de agua en superficie saliendo desde su base.

3. MEDIO AMBIENTE HUMANO

Aspectos generales

3.1 ***Se considera que el titular ha presentado la información solicitada en el ICSARA 2, respecto al medio humano, en cuanto a la caracterización de éste, la re-evaluación de impactos y la definición de medidas complementarias a las incorporadas en la RCA N° 039/2001.***

A pesar de lo anterior, y considerando que la evaluación de las alteraciones sobre los sistemas de vida y costumbres de la población, incorpora también un análisis con relación a la afectación o menoscabo en la calidad y disponibilidad de los recursos naturales que constituyen el sustento y por ende un elemento de bienestar para la población. Es así, como aún no existen los elementos de juicio necesarios que permitan asegurar que no habrá afectación del recurso hídrico, por el Plan de traslado de glaciares (Esperanza, Toro 1 y 2), los cuales cumplen una función de reservorio y regulador del balance hídrico en la cuenca, recurso altamente valorado por las comunidades que residen aguas abajo del Proyecto.

Respecto a lo anterior, se consulta sobre la efectividad de las medidas de mitigación y compensación definidas por el titular, en especial sobre la construcción de un embalse de cabecera y la capacidad de éste de suplir dichas funciones, así como la estimación de la vida útil del embalse, considerando para ello los procesos de sedimentación, como también, estimación de los aporte hídrico al embalse considerando las precipitaciones, escurrimientos superficial, y las pérdidas por efecto de la evaporación, infiltración, etc., a fin de llegar a una tasa de recarga de éste que permita determinar su vida útil.

Respuesta:

Los tres glaciares reservorios que se requiere intervenir muestran una marcada tendencia a desaparecer en forma natural dentro de un corto/ mediano plazo como otros glaciares en la region (ver Carrasco, Casassa y Quintana, en Anexo 2.2H) . Aún cuando los estudios glaciológicos indican que estos glaciares están compuestos de “hielo frío” el plan de reubicación propuesto tiene como objetivo principal prolongar la vida de ellos como potenciales “reservorios” . Es importante recordar que la contribución de los glaciares a los caudales se produce a través de la conservación de la nieve caída en la temporada invernal hasta la temporada estival donde ésta se derrite y contribuye al flujo hídrico. De esta manera, la contribución de los glaciares desde el punto de vista hídrico está determinada por el área o la superficie del hielo descubierto, zona que logra preservar la nieve hasta el verano. En consencuencia, el plan de reubicación de hielos busca precisamente ese

objetivo, preservar la zona de hielo descubierto con el propósito de mantener inalterada la contribución hídrica a los cursos de agua.

En razón de lo anterior, el titular ha implementado una serie de medidas específicas para mitigar y minimizar cualquier impacto sobre el recurso hídrico, a saber:

- Excavación, transporte y disposición de una forma y ubicación que elimina esencialmente la posibilidad de degradación de los cuerpos de hielo. Los resultados de los estudios de glaciología muestran que los depósitos de hielo continúan estando sobre la cuenca El Toro por lo que no presenta ningún cambio en el flujo de recursos hídricos sobre la misma.

- Posicionamiento del hielo excavado y la berma protectora de detrito de una forma tal que contribuya naturalmente a la acumulación de nieve para agregar área y volúmen a la sección más central del glaciar reservorio El Toro. Se estima que aproximadamente 0,4 km de material de ditrito de 2.5 m de altura agregarán el equivalente anual de 16.000 m3 de agua al "reservorio".

- Posicionamiento de aproximadamente 3,1 km de 2.5 metros de altura de barrera de protección contra la nieve en posiciones estratégicas sobre los límites de la mina barlovento de los remanentes de Toro 1, 2 y Esperanza y en otros lugares sobre la cuenca el Toro de tal forma que contribuyan naturalmente a la acumulación de bloques de nieve para aumentar el área y volumen alrededor de estos glaciares. Se estima que esto agregaría el equivalente anual de 124,000 m3 de agua al "reservorio", lo que sumado al efecto de la berma protectora (16.000 m3) totaliza 140.000 m3 de agua, el doble del impacto estimado.

Según se ha mencionado, el volúmen total de hielo actualmente estimado a ser reubicado representa un equivalente de aproximadamente 70,000 m3 de agua por año de manera que, con la implementación de las barreras de nieve, se aumentará la acumulación de nieve anual en una cantidad mas que suficiente para mitigar la potencial pérdida producto del traslado de los hielos. Mas aún, en caso que el plan de reubicación de hielo sea exitoso, la implementación de esta medida resultará incluso en un aumento del recurso hídrico en la cuenca El Toro como resultado del Proyecto.

Por otra parte, y además de todas las medidas de mitigación anteriores, y con el propósito de compensar cualquier impacto sobre el medio ambiente humano, el titular ha comprometido la entrega de fondos para la construcción de un embalse de regulación con capacidad para 5,000,000 m3 el cual permitirá almacenar el equivalente a más de 70 años del promedio anual estimado por el Titular de la potencial pérdida en caso que la reubicación de los hielos y la acumulación de nieve no sea exitosa. Consecuencialmente,

con la implementación de esta medida se logrará compensar largamente cualquier potencial pérdida de la capacidad de regulación que cumplen los glaciares intervenidos.

Sin embargo, la ubicación, impacto ambiental, vida útil, eficiencia y efectividad de este embalse será analizada durante los estudios de ingeniería básica que se realizarán con posterioridad. Según lo indicado en la respuesta a la pregunta 7.3, los estudios se desarrollarán bajo la dirección del Directorio de la Junta de Vigilancia, 1 año después que el Proyecto haya entrado en la etapa de producción.

Por otra parte, se debe tener presente que el impacto potencial estimado debido a la perdida de la contribución hidrica de los glaciares reservorios a ser intervenidos es de 2,5 l/s en una cuenca donde CMN cuenta derechos de agua por más de 90 l/s y donde la mediana del caudal en el punto de su primer usuario aguas abajo del Proyecto es 1810 l/s en estación DGA Río del Carmen en El Corral . El caudal total entrando al reservorio en las cercanías de Santa Juana (Estación DGA, Huasco Algodones), es alrededor de 5650 l/s mediana anual.

En consideración de todo lo anterior, se puede aseverar que las comunidades que residen aguas abajo del Proyecto no debiesen ser impactadas de manera alguna por su ejecución.

3.2 No existe claridad respecto a cuál será la operativa de las distintas figuras de coordinación, seguimiento y de ejecución de medidas que existirán, como por ejemplo el Comité Vial, y Fundación. Se necesita conocer cuál será la orgánica y operatividad de estas instancias (administración, coordinación, etc.). Por ello, se requiere precisión respecto:- Conformación precisando organizaciones (territoriales y funcionales, con personalidad jurídica u otro tipo de organización, etc.), autoridades, servicios públicos, etc., que lo integrarán. Orgánica interna y operativa. Injerencia o competencias de estas instancias dentro de las decisiones asociadas a la implementación de medidas ambientales, por ejemplo, el Comité Vial podrá participar en las políticas ambientales y de seguridad vial a implementar, en el entendido que el titular solo señala que éste tendrá como competencia el conocer las inquietudes de las comunidades y mantener permanente interacción entre los actores del Proyecto.

Respuesta:

CMN a través de su programa de Relaciones Comunitarias establecerá los procedimientos necesarios para la adecuada coordinación de las diferentes instancias que interactuarán en y con la comunidad. Sin embargo, se puede mencionar que varias de estas estructuras son mencionadas en otras respuestas de esta Adenda 3 o en Adenda 2, a saber, el Comité que administra los fondos entregados a la Junta de Vigilancia (respuestas 3.1 y Sección 7 de esta Adenda), el Programa de Proveedores (respuesta 7.4.a, 7.4.b, 7.7.c y 7.8 de Adenda N°2 y respuesta 3.9 de esta Adenda), el Programa de Capacitación y Reclutamiento (respuesta

7.4.a), la Fundación de Desarrollo Sustentable (respuesta 7.5.e del Adenda 2 y 3.10 de esta Adenda) y el Comité Vial (respuesta 7.2.a II.2 de Adenda 2).

Como criterio central, se estima que la conformación de estas orgánicas debiera estar indicada por COREMA, ya que ello le otorga a la comunidad una imagen de mayor objetividad. De este modo y de acuerdo a la temática que aborde cada orgánica, debiera estar administrada por un comité compuesto de 2 miembros de cada uno de los servicios público competentes, así como el conjunto de organizaciones territoriales y funcionales que pudieran jugar un rol en la materia. En tanto CMN participará siempre con 2 miembros de estas instancias con una contraparte formalmente designada para dicha tarea.

Operativamente, estas orgánicas siempre debieran estar integradas por representantes de organizaciones tanto territoriales como funcionales que cuenten con personalidad jurídica vigente, exigencia a la que están habituadas las organizaciones comunitaria de las comunas del Área de Influencia Directa, y que la gran mayoría cumple, no obstante se debiera estimular e intensionar la formalización y obtención de personalidad jurídica de actores que no estén representados, tales como los jóvenes o temporeros/as.

Dichas orgánicas para ser efectivas requerirán de un funcionamiento regular y periódico, para lo cual CMN, al menos en el primer año, proveerá asistencia técnica de profesionales debidamente capacitados que estimulen el afianzamiento del equipo y faciliten su proceso de organización interna, incluido en ello el reforzamiento a las convocatorias y la difusión de los avances a la comunidad en general.

En función de las temáticas puntuales que cada orgánica aborde (por ejemplo el tema vial), informarán a la orgánica general de seguimiento (Comité de seguimiento o como resuelva denominarle), de los resultados de sus actividades, de sus inquietudes y propuestas para mejorar el grado de éxito de las medidas bajo las cuales se enmarca su funcionamiento.

3.3 Se solicita, respecto al Plan de Monitoreo Social propuesto por el titular, lo siguiente: Ampliar la duración de éste en el entendido que en cinco años no es posible verificar los potenciales cambios a nivel de dinámicas poblacionales y sociales que pudieran suscitarse por la construcción y operación del Proyecto. Además, existen medidas definidas por el titular que deben ejecutarse durante toda la vida útil del Proyecto.

- Considerar en su diseño conceptual y en la operatividad del Plan de Monitoreo Social la conformación de un comité de seguimiento, dentro del cual puedan participar los distintos actores identificados por el titular (servicios públicos, comunidad) en donde el titular participa como un actor más dentro del Comité, entregando información necesaria para corroborar la implementación de las medidas ambientales enunciadas en la respectiva RCA. Este comité deberá ser

validado por todos los actores participantes como una instancia de trabajo sistemático e intersectorial.

- Cabe señalar, que en el caso que la RCA incorpore una Auditoría Ambiental Independiente, esta debería formar parte del comité de seguimiento para que informe en forma periódica los resultados de su gestión. La experiencia ha mostrado que las Auditorías Ambientales son un enorme aporte en la generación de información ambiental relevante y en la interpretación y análisis de la misma.

- Definir el contexto en el cual se incluirá a la población indígena (diaguita) en el Plan de Monitoreo Social, especificando los mecanismos de interacción que el titular empleará.

- El Plan debe permitir de forma anticipada visualizar controversias a propósito de la operación del Proyecto, como también eventuales impactos no identificados con anterioridad durante el proceso de evaluación. Al mismo tiempo, permiten canalizar y dar respuesta de forma expedita a denuncias ambientales realizadas por la comunidad.

Respuesta:

En efecto, el Plan de Monitoreo Social debe extenderse a toda la vida útil del Proyecto, de modo de poder hacer seguimiento a los cambios que éste pudiese suscitar en el medio humano en el mediano plazo. No obstante se estima que los primeros cinco años serán determinantes para marcar tendencias en este ámbito y por ello deben ser considerados un hito, a partir del cual hacer una evaluación a fondo y una reformulación que permita perfeccionarlo en base a la experiencia e información recaudada.

Considerando la naturaleza del objeto de monitoreo; el medio humano, el Plan de Monitoreo debe ser participativo, para lo cual se creará una orgánica específica, integrada por representantes de todas las organizaciones comunitarias con personalidad juridica de la Comuna de Alto del Carmen y Vallenar. Cada organica de seguimiento funcionará de modo autónomo a nivel comunal, pero con instancias establecidas de coordinación (semestral), a fin de potenciar y/o resolver aquellos temas de interés común. Cada organización deberá estar administrada por un comité de dos miembros cada, una las oganizaciones comunitarias, los Municipios respectivos, la COREMA y CMN.

Para potenciar el Plan de Monitoreo Participativo y la utilidad del mismo para la comunidad, se desarrollará un programa de Educación Ambiental dirigido a los representantes de las organizaciones comunitarias que integren la instancia de seguimiento, a fin de preparar a éstos para que comprendan los resultados de los monitoreos y los vinculen a la realidad de las localidades y grupos humanos que representan.

A CMN le corresponderá proporcionar la información y recursos necesarios para efectuar el seguimiento, lo que incluye Auditorias Ambientales, así como también deberá designar una contraparte específica para este fin, que participará de todas las reuniones que efectúe la orgánica de seguimiento.

Dadas las características de la población indígena de ambas comunas y en especial el nivel organizacional que presenta la comunidad diaguita, esta constituirá parte de la orgánica de seguimiento a través de los representantes de sus organizaciones, las cuales ya cuentan con personalidad jurídica. Concretamente, fruto del proceso de reetnificación que está experimentando este grupo humano, el acento específico del Plan de Monitoreo en este caso, debe estar en resguardar que el Proyecto no interfiera en sus avances, básicamente a causa de la generación de alteraciones en la dimensión antropológica, por medio por ejemplo de flujos migratorios.

A fin de fortalecer el rol de los representantes de las organizaciones, como canalizadores de las inquietudes e intereses de sus representados, se elaborará y distribuirá de modo masivo (a todas las organizaciones con personalidad jurídica de todo tipo) un boletín con los resultados de los monitoreos específicos para cada medida del medio humano, así como también los resultados y acuerdos de la orgánica de seguimiento. Esta misma información será difundida a través de los medios de prensa locales (radios y diarios).

De acuerdo a su política de Minería Responsable, entre otars cosas, Barrick busca apoyar el crecimiento económico y social de las comunidades cercanas a sus Proyectos y operaciones, en el caso de Pascua-Lama, el valle del Huasco. Para ello, se han implementado y se seguirán implementando proyectos de desarrollo local sustentable, haciéndose cargo de las necesidades e intereses de la comunidad local y sus autoridades. Entre estos Proyectos están los relacionados con la temática de Cultura y Tradiciones, a partir de los cuales se busca apoyar el rescate y promoción de las tradiciones locales, especialmente de la cultura diaguita.

Para ello, en conjunto con las organizaciones que agrupan a los representantes de dicha etnia, se desarrollarán proyectos de acuerdo a sus intereses, apoyando principalmente en recursos y capacidad de gestión.

3.4 Respeto al Fondo de Desarrollo Sustentable (US $10 millones) para implementar iniciativas relacionadas con salud, educación, capacitación, infraestructura, seguridad ciudadana, fomento productivo y apoyo a la cultura y tradiciones, se solicita al titular ampliar la información entregada en la Adenda 2, en el entendido de precisar:

Temáticas a financiar considerando montos asignados o porcentajes a cada temática. Por otro lado, aclarar si los talleres de formación de mano de obra serán financiados a través de este fondo u otra vía de apoyo que posee la empresa.

Grupo objetivo, aclarar quiénes tendrán acceso a dicho fondo, en especial si está pensado solo para organizaciones con personalidad jurídica, como también si existirán ítems especiales o montos pre asignados asociados a población vulnerable dentro de la cuenca, como por ejemplo, la población diaguita.

Respuesta:

El Fondo de Desarrollo Sustentable (en adelante FDS) es producto de la política mundial de Barrick, Minería Responsable, la cuál consiste en velar por el bienestar de nuestros trabajadores, proteger el medioambiente e incentivar el desarrollo económico y social de las comunidades cercanas a nuestras instalaciones.

En cuanto a las temáticas a financiar, el FDS implementará un plan de cooperación y trabajo conjunto con las autoridades regionales y comunales del Huasco para co-financiar proyectos que promuevan el desarrollo sustentable en la Tercera Región, especialmente en los sectores de salud, educación, capacitación, infraestructura, seguridad ciudadana, fomento productivo y apoyo a la cultura y tradiciones. No se han establecido montos determinados o preasignados por área o temática.

Será la propia organización la que establezca tanto las modalidades de financiamiento, como los montos, áreas temáticas, requisitos de los beneficiarios, grupos humanos focalizados, etc. No obstante para dar inicio a la operación del Fondo de Desarrollo Sustentable y focalizar su intervención, de manera de poder medir impacto, CMN postula que el Directorio tripartita opere el primer año un Fondo Concursable para organizaciones con personalidad jurídica en no más de 3 áreas temáticas y para Proyectos de beneficio colectivo de no más de un año de ejecución. Lo anterior otorgará la práctica y experiencia mínima que ayude a perfeccionar el enfoque y metodologías de este Fondo de Desarrollo Sustentable para ampliarse a más áreas temáticas y tipos de beneficiarios, así como también ayudará al entrenamiento y afiatamiento del equipo humano que integre el Directorio y la organización en general que conducirá el Fondo.

La modalidad anteriormente descrita entregará la necesaria flexibilidad para que el fondo sea asignado a los temas de interés que se definan conjuntamente entre las partes, los cuáles pueden naturalmente evolucionar en el tiempo. Determinar a través del SEIA los porcentajes de distribución del fondo puede, a juicio de CMN, rigidizar el manejo eficiente y efectivo de los dineros, al quedar ligado a un compromiso formal mediante RCA, complicando la modificación futura para adaptarse a las necesidades e intereses de la comunidad (ver también la respuesta 3.2 anterior).

Por otra parte, no está previsto que el Fondo financie la selección/contratación y entrenamiento del personal que será contratado directamente por CMN o sus contratistas. El

Programa de Capacitación y Reclutamiento será financiados con distintos recursos de los del FDS.

La Fundación estará domiciliada en Vallenar y su administración será ejercida por un directorio compuesto, tanto por representantes de la empresa como por autoridades regionales, representantes de la comunidad del Valle del Huasco. Este directorio en conjunto priorizará y decidirá a qué Proyectos se destina el fondo.

El sector público estará representado por las instituciones que la COREMA establezca, el sector privado estará representado por el proponente (CMN) y la comunidad por representantes de organizaciones comunitarias con personalidad jurídica que den cuenta de los diferentes actores sociales, tales como CUT, Colegio de Profesores, Asociación de Agricultores, Uniones Comunales de Juntas de Vecinos, Uniones Comunales de Adultos Mayores, Uniones Comunales de Clubes Deportivos, etc. Esta organización definirá internamente un Directorio tripartito, de modo de hacer más ejecutivo su funcionamiento..

3.5 Por último, el titular no ha precisado cuáles serán los instrumentos o medios de verificación de cumplimiento de las medidas ambientales comprometidas para el medio humano, como por ejemplo, campañas preventivas de seguridad vial, planes de nivelación de competencias laborales, etc., considerando que éstos pueden ser: informes, fichas, registro fotográfico.

Respuesta:

CMN estima como adecuados los métodos sugeridos por la autoridad para verificar no sólo el cumplimiento, sino también la efectividad de las medidas propuestas. Otros instrumentos factibles de emplear para verificar el cumplimiento son los registros de asistencia y de calificaciones para la nivelación de competencias laborales, los materiales de educación, difusión y/o instrucción (dípticos, afiches, boletines, etc.)que se empleen para las campañas preventivas, etc.

CMN, a través de su Programa de Relaciones comunitarias, implementará los procedimientos necesarios para la adecuada coordinación de las diferentes instancias que interactuan en y con la comunidad. En razón de lo anterior, CMN propone que los medios de verificación de cumplimiento, incluyendo auditorías independientes, sean definidos en este marco por los demás Comités administrativos antes referidos.

Aspectos Específicos

3.6 Con relación al numeral 7.3, de la Adenda 2, se solicita al titular aclarar la omisión de la medida ambiental incluida en el anexo 7D, la cual señala que se implementará un conjunto de protecciones internas en las paredes, cielos y ventanas, además de barreras acústicas frente a todas las escuelas del listado entregado por el titular.

Respuesta:

Se rectifica el error producido al reproducir en la respuesta 7.2 del Adenda N°2 los compromisos expresados en el Anexo VII-D. El Proyecto sí considera estas medidas de protección de las escuelas cercanas al camino de acceso conforme la necesidad, caso por caso, para mitigar los efectos del ruido vehicular.

3.7 Con relación a las medidas ambientales señaladas, es posible señalar que el titular en su respuesta omite la implementación de protecciones internas y condiciona la instalación de barreras acústicas (necesidad y factibilidad), ¿esta condición está relacionada a espacio real para su instalación? o ¿está condicionada a los resultados del monitoreo a implementar?.

Respuesta:

Las medidas específicas a ser consideradas en cada escuela que requiera atenuación de ruido serán determinadas basándose en los resultados de monitoreos en cada locación, la proximidad con el camino, el diseño y construcción de cada escuela. De este modo será posible lograr resultados efectivos en cada caso específico.

3.8 Se considera válida la información entregada por el titular en la cual demuestra que actualmente la comuna de Alto del Carmen, y el valle en general, no se presenta como un atractivo turístico, por lo tanto el flujo de turistas es bajo y nulo, en especial en la zona alta del valle.
Sin embargo, el titular no ha analizado, en forma integral y proyectivamente, cómo la instalación de una mina afectará la imagen del valle, como potencial poio turístico, en especial si se considera que dentro del Plan Maestro de Inversiones del Gobierno Regional, se ha identificado a Alto del Carmen como comuna turística, lo cual demuestra un claro interés de la autoridad de fomentar dicha actividad, existiendo actualmente iniciativas concretas al respecto, por ejemplo, Sendero de Chile, creciente oferta de alojamiento (impronta rústica del valle), etc.
Cabe señalar, que ningún sitio por si solo corresponde a un atractivo turístico, está calidad es otorgada por las personas que deciden en algún momento fomentarlo como tal, por ello, hace una o dos décadas atrás las Torres del Paine o el Valle del Elqui, no eran considerados atractivos turísticos y tal vez los flujos de turistas eran muy parecidos a los que presenta actualmente el valle del Carmen o San Félix, por ello, no es descartable dicho potencial a la luz de los actuales datos sobre flujos de turistas existentes.

Respuesta:

Dentro del marco del compromiso de Minería Responsable, CMN confía en que todas las actividades productivas son compatibles, esto es, la minería, el turismo y la agricultura

pueden coexistir en el Valle de Huasco de una manera de beneficio mutuo. Ejemplos hay muchos donde el turismo, la agricultura y la minería conviven de manera armónica. Más aún en el propio Valle del Elqui, citado por la Autoridad, conviven turismo, minería y agricultura.

De esta manera, no necesariamente la mera implementación del proyecto redundará en un impacto en la imagen del valle y por tanto en el potencial turístico del mismo.El desarrollo del turismo requiere, entre otros elementos, una infraestructura de servicios adecuada la cuál es actualmente inexistente en el valle tal y como sostiene la autoridad. Por otra parte, como respuesta específica a las preocupaciones de la comunidad y de esta autoridad, CMN ha estructurado su plan de desarrollo minimizando la atracción de personal externo al Valle de Huasco (lo que potencialmente puede atentar al desarrollo de tal infraestructura de servicios).

Sin embargo, CMN estima que todas las actividades productivas no son incompatibles, razón por la cual buscará oportunidades futuras para trabajar en conjunto con las Autoridades y organizaciones regionales, provinciales, y locales, integrando e implementando iniciativas de desarrollo sustentable que realcen de forma razonable la infraestructura de instalaciones y servicios en el área de influencia del proyecto con el propósito de resaltar y desarrollar el potencial turístico de la zona.

3.9 En respuesta a la pregunta N° 7.4,Volumen 1, Adenda 2, el titular propone en el punto 2., que una de sus medidas para disminuir los altos niveles de desempleo o subempleo en la zona, será el desarrollo de un programa de proveedores de insumos y servicios que priorice la contratación y compra a productores y empresarios en la Provincia del Huasco. Al respecto durante la temporada 2001, el titular realizó un acercamiento en esta línea, con el grupo productivo "Marchiper" en la Comuna de Alto del Carmen, situación que no tuvo resultados positivos para los agricultores, por grandes inconsistencias operativas y por un punto importante donde el titular, condiciona este posible contrato induciendo a que los agricultores aprobaran el Proyecto Pascua Lama en esa fecha. Entonces la consulta es la siguiente:

¿ Cómo se piensa implementar esta medida, que parece tan básica, asociada a la realidad de la Provincia del Huasco y sobre todo en la Comuna de Alto del Carmen, para no crear falsas espectativas, en la población que vive de la agricultura? y cuál será el medio de verificación de la medida?

Respuesta:

La experiencia con el grupo productivo "Marchiper" fue una experiencia muy preliminar comparado con el Plan de Proveedores que se implementará con la ejecución del Proyecto. Aprendiendo de la experiencia que significó el trabajo con las comunidades en el año 2001, CMN ha implementado un procedimiento que permitirá verificar permanentemente su funcionamiento y efectividad.

El titular ha identificado y pretende reservar ítems de bienes y servicios específicos que cree pueden ser sustancialmente proporcionados por negocios locales en el área de influencia del Proyecto y para los cuáles CMN intentará dar primera prioridad a proveedores locales. Un detalle de estos bienes y servicios está incluido en la Tabla 3-1 incluida más adelante. Por otra parte, CMN ha iniciado un programa para identificar y registrar la naturaleza y capacidad de proveedores pequeños y medianos existentes, en el área de influencia del Proyecto quienes tienen interés en ser potenciales proveedores de tales bienes y servicios para el Proyecto. Se revisará en forma objetiva y clasificará cada uno de los potenciales proveedores según su habilidad técnica, capacidad y productividad. Mas aún, se proporcionará una adecuada orientación, entrenamiento y una eventual certificación para aquellos que cumplan con el criterio para que potencialmente provean bienes al Proyecto. Los proveedores podrán ofertar sus servicios y bienes y/o servicios específicos en forma competitiva, los cuales son requeridos por el Proyecto para el cuál han sido calificados/certificados.

El proceso de licitación será realizado publicando las requisiciones en forma electrónica en una página web en donde todos los oferentes calificados /certificados para proveer los bienes específicos o servicios tendrán acceso, tanto a través de sus propios computadores, o en kioscos donados por CMN en centros claves, mantenidos por los usuarios interesados en esa locación. Las requisiciones se mantendrán abiertas para proveedores locales durante 5 días. Una vez transcurrido este tiempo si no se consiguen 3 propuestas calificadas, la licitación quedará abierta extendiéndose al resto de la Región durante 5 días adicionales, tiempo en que si no existen 3 oferentes calificados, la requisición se abrirá para licitación con alcance más allá de la Región. La notificación de las adjudicaciones será publicada en la página web informando el ganador a todos los ofertantes calificados. La información patentada, incluyendo costo, no será publicada y se considerará como información confidencial

La entrega de los bienes generalmente será en el centro de logística en Vallenar. El transporte al sitio será de responsabilidad de CMN. De igual forma, a menos que se autorice lo contrario, el transporte de todo el personal de servicio para terreno será proporcionado por CMN. Toda la mano de obra, supervisión, materiales, vehículos, herramientas, o equipo a ser suministrado estará sujeto a los estándares e inspecciones de CMN, los cuáles en su totalidad estarán estipulados en la Licitación.

Este acercamiento proporcionará una oportunidad de competencia abierta y transparente para los proveedores de bienes y servicios para que se beneficien directamente de la presencia del Proyecto. La efectividad de esta iniciativa será medida por el volumen de los bienes y servicios proporcionados según programa, para la cuál indicadores de desempeño claves serán publicados regularmente.

De esta manera se puede asegurar que se entregarán todos los antecedentes de manera transparente y oportuna a todas las personas que estén interesados en el abastecimiento de los bienes y servicios que serán requeridos para el desarrollo del Proyecto. En razón de lo anterior, no se debieran crear expectativas no razonables pues el propio funcionamiento de este procedimiento permitirá a los proveedores estar concientes de los requisitos y las potencialides existentes para proveer de bienes y servicios al Proyecto.

Tabla 3-1 Ejemplos de Bienes y Servicios que pueden ser sustencialmente proporcionados por negocios locales en el área de influencia del Proyecto.

Descripción	Bienes	Servicios
Instalaciones	• Equipo de oficina • Mobiliario • Mesas y sillas • Sabanas, cortinas, manteles, cubrecamas	• Limpieza • Mantenimiento • Seguridad • Limpieza de nieve
Servicios Públicos	• Salud • Limpieza de basura • Combustible • Gas • Protección contra incendios • Electricidad	• Gásfiter • Retiro y traslado de basura • Distribución de combustible • Mantenimiento de estufas • Mantenimiento de extintores • Mantenimiento eléctrico
Construcción temporal	• Señalética • Barricadas • Andamios • Encuestas	• Diseño de andamios • Encuestas (topografía)
Equipos y herramientas	• Herramientas pequeñas • Equipos pequeños varios • Vehículos ligeros	• Mantenimiento de herramientas • Arriendo de equipos • Mantenimiento de vehículos livianos.

	• Herramientas pequeñas • Insumos de limpieza • Productos de limpieza • Productos de mantenimiento • Lubricantes • Equipos de soldadura • Ropa/uniformes	• Limpieza • Mantenimiento • Seguridad • Limpieza de nieve
Productos de consumo	• Herramientas de Seguridad • Productos de Salud • Publicaciones • Premios	• Entrenamiento de seguridad • Exámenes médicos • Dentales y médicos • Instalaciones para seminarios • Respuesta a emergencias
Salud y Seguridad	• Herramientas de Seguridad • Productos de Salud • Publicaciones • Premios	• Entrenamiento de seguridad • Exámenes médicos • Dentales y médicos • Instalaciones para seminarios • Respuesta a emergencias
Medio Ambiente	• Publicaciones • Premios	• Monitoreo • Instalaciones para seminarios y cursos

Campamento/casino	• Bebidas • Alimentos • Recreación • Sábanas, toallas, manteles • Productos varios para casino (cubiertos, servilletas, papel sanitario, etc.)	• Limpieza
Transporte y logística		• Taxis y Minibuses • Buses • Servicios de mensajería

3.10 En respuesta N° 7.8 (pág. 7-68), Adenda 2, respecto a Fomento productivo de la agricultura de menor escala, se menciona como medida de compensación que "CMN aportará 3 millones de dólares anuales por un períodos de 20 años para el desarrollo de Proyectos y/o programas de mejoramiento de sistemas de riego, de mejoramiento, construcción, reparación y/o modernización de infraestructura hidráulica, de obtención de nuevas fuentes hídricas y similares"; por lo cual, se consulta si existirá algún sistema de seguimiento o cuál será el medio de verificación que asegure y demuestre que los fondos fueron ocupados para las obras señaladas.

Respuesta:

Con el propósito de verificar que los fondos referidos sean utlizados en el desarrollo de Proyectos y/o programas de mejoramiento de los sistemas de riego, de mejoramiento, construcción, reparación y/o modernización de infraestructura hidráulica, de obtención de nuevas fuentes hídricas y, en general, al desarrollo de proyectos y/o programas que busquen lograr estos fines, se creará un Directorio compuesto por 6 directores. Cinco directores serán nominados por CMN y la Junta de Vigilancia del Río Huasco y sus Afluentes y un director será nominado por el Intendente de la Tercera Región. Dicho Comité será presidido por uno de los miembros designados por CMN. El Directorio de la Junta de Vigilancia designará un Gerente quien deberá llevar a efecto las decisiones que tome el Comité. Los acuerdos del Comité deberán ser adoptados por la conformidad de al menos cuatro de sus miembros y, en todo caso, sujetándose a lo que se establezca en un reglamento de funcionamiento del Comité, cuyo texto deberá ser acordado en la primera sesión del Comité con el voto conforme de al menos cuatro de sus miembros, uno de los cuáles deberá ser necesariamente un miembro designado por CMN.

El Comité establecerá las normas generales de funcionamiento de dicho Comité y, en particular, los procedimientos, mecanismos de control interno, obligaciones de información, etc, que permitan velar por la correcta, transparente e informada inversión de los recursos pecuniarios que se aporten por CMN con arreglo a ésta cláusula octava, tales como, pero no limitativamente, criterios objetivos y competitivos para la adjudicación de Proyectos que involucren montos relevantes y restricciones para los actos, contratos u operaciones con miembros del Comité, miembros del Directorio de la Junta o de CMN, ejecutivos principales de la Junta o de CMN y/o personas relacionadas de cualquiera de los anteriores. El Reglamento del Comité sólo podrá modificarse en los mismos términos y con las mismas mayorías aplicables a su aprobación

4. TRANSPORTE

4.1 ***En Tabla N°5-1, Adenda 2, el Titular presenta la información en base a promedios, señalando cantidades como Flujo Diario de Explosivós = 3,1; Flujo Diario de Petróleo Diesel = 7,2; se consulta, si son los valores promedio los mejores indicadores de Flujo de Transporte, ya que los flujos serán continuos, si es así, se solicita al Titular que indique la modalidad del flujo (tipo convoy o intermitente), y que trabaje con cantidades enteras, dado a que se esta trabajando con valores discretos que no pueden ser divididos. Es decir 7,2 viajes de Petróleo significará necesariamente 8 viajes (Resp. 5.3 pág 5-7) y así sucesivamente. Ahora bien, silos flujos no son continuos y tendrán cierta frecuencia como se señala para el flujo de personal (13,6 = 14 buses cada 4 días) en página N° 5-5. ¿Qué frecuencia tendrán; fines de semana, algunos días de las semana, algunos meses?. Se consulta al titular que sucederá los meses de verano, con el flujo vehicular, cuando aumenta la actividad agrícola de los Valles, especialmente en el camino de las Juntas del Carmen hasta Vallenar, que será la única vía de tráfico vehicular para camiones agrícolas y camiones del proyecto Minero. ¿Se contempla medidas adicionales, de seguridad en época de cosecha de uva de exportación, (diciembre a enero).?***

Respuesta

Como indicador de flujo vehicular al Proyecto se ha trabajado con promedios diarios debido a que las cargas se despacharán maximizando la utilización de los camiones. Así por ejemplo, si el promedio de camiones con explosivos es 3,1 al día, indica que la mayorìa de los días subirán 3 camiones, y en eventos esporádicos se requerirán 4 camiones. En este ejemplo, lo que se pretende demostrar es que no se realizarán 4 viajes con explosivos todos los días, con uno de los camiones prácticamente vacío. La carga será consolidada en los centros de logística con el fin de que dentro de lo posible los camiones lleven cargas completas al Proyecto, minimizando así los viajes. En el caso de materiales a granel y provisiones, habrán niveles mínimos y máximos de provisiones almacenadas en terreno, suficientes para varios días de operación, lo que permitirá la regulación de entregas favoreciendo las breves interrupciones de las mismas.

A lo anterior se debe agregar que la cantidad de viajes por día estimada son promedios conservadores puesto que representan escenarios de casos extremos .

En cuanto a la modalidad de flujo, el transporte entre los centros de logística y el Proyecto será en convoyes. Se espera que exista un promedio de dos convoyes por día, cada uno compuesto por entre 6 y 8 camiones . El numero preciso y composición de carga de cada convoy será determinado sobre una base semanal debidamente planeada y manejada diariamente desde los centros de logística. Los convoyes viajarán diariamente excepto los festivos y algunos días específicos de celebraciones según se especifica en RCA N° 039/ 2001. De forma similar, en relación con los buses, el horario y frecuencia de los viajes estará determinado según los cambios de turnos y serán intermitentes, según corresponda, una o

dos veces por semana. Se espera que los cambios de turno sean espaciados para que en circunstancias normales existan 3 a 4 buses viajando en convoy, separados de los camiones de transporte.

Para los meses de verano, el titular implementará las siguientes medidas de seguridad que permitirán compatibilizar el flujo vehicular del Proyecto con el de las cosechas agrícolas valle abajo. Estas, según lo comprometido en la Adenda 2, se mantendrán a lo largo de todo el año. Las medidas son:

- Se entregará una apropiada notificación del movimiento de todos los convoyes y la carga especial / cargas sobredimensionadas serán coordinadas con las autoridades correspondientes considerando los permisos requeridos.

- Todos los convoyes serán escoltados con vehículos antecediéndolos y aquellos que los precedan estarán en comunicación con personal de operación constantemente, y consecuentemente podrán estar en contacto con carabineros.

- Todos los camiones de transporte y buses que viajan entre los centros de logística y el sitio serán contratados exclusivamente para este propósito. Se especificarán las condiciones particulares requeridas, no tendrán más de 5 años, deberán ser mantenidos e inspeccionados regularmente, incluyendo una inspección funcional de mecanismos de seguridad antes de cada viaje.

- Todos los chóferes serán contratados, entrenados y calificarán especialmente y exclusivamente para estos vehículos. El horario de trabajo será regulado y constantemente serán chequeados y examinados. Se dará preferencia a la contratación de personal que viva entre los centros de logística y el sitio.

- Los vehículos individuales que viajen entre los centros de logística y terreno se limitarán estrictamente a casos excepcionales y serán controlados por horas de salida y llegada.

- Los viajes entre los centros de logística y el sitio se realizarán de día. Los viajes en la noche quedarán estrictamente limitados a circunstancias excepcionales.

- Los convoyes de los camiones y las cargas sobredimensionadas están prohibidas durante los feriados y ocasiones de fiestas según se estipula en RCA No 039, 2001.

- Existirá un Comité formado y que incluye miembros de las autoridades y comunidades pertinentes que monitorearán las actividades y efectividad del transporte y planes de contingencia en el camino entre Vallenar y el sitio.

Es importante tener presente que los viajes por día representan sólo un aumento de aproximadamente 2 % del tráfico promedio entre Vallenar y Las Breas, según la información proporcionada por la Dirección de Vialidad del MOP (Ref. página web www.vialidad.cl/index.htm, puntos 0.326-001, 0.3.26-2002, y 0.3.26-003 de la 3° Región).

4.2 En relación a respuesta de pregunta N° 5.5, Adenda 2, se solicita especificar en cuanto a las medidas de mitigación, para minimizar los potenciales impactos que pueden generar situaciones de contingencia ambiental, a las referidas a rehabilitación de cultivos afectados a los agricultores, debido a que los rubros que principalmente se trabajan en la Comuna de Alto del Carmen son productos primores y de exportación con características organolépticas muy distintas a otras regiones de nuestro país y los que le siguen son en su mayoría frutales, donde los resultados de sus producciones son a mediano y largo plazo. Al respecto se consulta al titular por las medidas específicas de mitigación qué se proponen para estos casos.

Respuesta:

Si bien no se contemplan medidas específicas para mitigar contingencias ambientales que afecten a la agricultura, en las tablas de la sección 5, respuestas 5.5 y 5.6 de Adenda 2 se indican las medidas preventivas, de contingencia y mitigación a desarrollar para todo el transporte de insumos, materiales peligrosos y personal que se estimam suficientes para minimizar y mitigar cualquier potencial impacto tanto para la agricultura como cualquier otra actividad. Además CMN ha desarrollado e implementará un Plan de Operación Específico de Transporte y Contingencia que pretende abarcar todas las situaciones especiales y características que representa el transporte para desarrollar un proyecto minero que tiene que convivir con otras actividades productivas. De esta manera, se tendrá especial cuidado de no impactar de ninguna manera a las comunidades pues, si bien se comparte con la autoridad las características especiales de la producción de la zona, el titular entiende que también son particularmente sensibles las localidades, los recursos hídricos, los suelos, y en general todo el medio ambiente donde se desarrollará el proyecto.

4.3 Con relación a lo planteado en la respuesta 5.5.,Adenda 2, es posible señalar que no es concordante con lo que se plantea en el Plan de Contingencias, en el caso particular de derrames de agentes contaminantes de Hidrocarburos y Cianuro, ya que este tipo de sustancias no sería transportado por el lado chileno, sino que por Argentina.

Respuesta:

Los materiales consultados están incluidos tanto en el Plan de Transporte como en el Plan de Contingencia para que los Planes estén completos, incluyendo los escenarios extremos, según fue solicitado por las Autoridades (ver tabla 5-1 de la sección 5 del Adenda 2). Los combustibles e hidrocarburosserán transportados regularmente por el lado chileno, debido a

que en la mina existirá una demanda importante de estos insumos. En cambio, en condiciones normales, el cianuro de sodio será transportado por el lado Argentino. Sólo en situaciones de fuerza mayor provocadas por causas especiales de contingencia será transportado también por el lado chileno. Es importante destacar que el Proyecto contará en faena (lado argentino) con un stock suficiente de insumos de proceso que permita soportar una contingencia. Además, en el transporte de cianuro, los envases estarán diseñados para resistir condiciones de contingencia, evitando que este elemento entre en contacto con el medio ambiente ante un eventual accidente.

4.4 Se solicita al titular que defina las situaciones consideradas de contingencia y de fuerza mayor, las cuales requerirían que todos los insumos (mina y planta), sean trasladados desde Chile.

Respuesta:

El transporte que se realizará en condiciones normales por el lado chileno del Proyecto, es el presentado en la Tabla 5.1 antes referida, en tanto el transporte que se realizará en condiciones de fuerza mayor producto de contingencias, es el presentado en la Tabla 5.2 de dicha sección. Las situaciones de contingencia y de fuerza mayor que se pudieran presentar sólo actuarán en caso de ocurrir un desabastecimiento por consumo del stock y que tenga por riesgo detener la planta de beneficio por un tiempo prolongado. Las situaciones de fuerza mayor son en general las siguientes:

- Interrupción prolongada de logística o del camino de acceso del lado argentino por condiciones climáticas o por siniestros naturales.

- Interrupción prolongada debido a acciones de terceros no provocadas por el Titular, o situaciones fuera de su control como huelgas, disturbio civil, terrorismo, accion gubermental, u otras de similar naturaleza.

Es importante recalcar que el titular contará con un stock suficiente para cubrir las contingencias por un tiempo razonable y también existirá la posibilidad de traer estos productos desde el Proyecto Veladero de propiedad de Barrick, efectuando los trámites correspondiente de aduanas. Por lo tanto, la posibilidad de traer estos insumos de proceso por el lado chileno es remota, pero no se puede descartar, motivo por el cual CMN también ha sometido a evalaución el transporte de estos insumos.

5. RECURSO HIDRICO

5.1 Con relación a la línea base presentada por el titular es posible señalar que se considera inaceptable que el presente estudio no cuente con mediciones que alcancen las aguas subterráneas y se asuman los datos del pozo NEV-1 del año 2002, el cual además presenta distintas condiciones hídricas dado que se encuentra situado entre un dren principal y uno secundario (Vol. 5 Anexo II-O, Pág. 6). Por lo tanto y dado que se estima esta información como imprescindibles, se solicita al titular realice el estudio pertinente para estimar las características litológicas considerando la infraestructura que se espera desarrollar.

Respuesta:

El estudio cuenta con mediciones de aguas subterráneas. La información hidrogeológica de detalle del Proyecto se desarrolló en los 26 pozos del sector superior de la cuenca del Río del Estrecho, donde se ubicará el depósito de estériles y las obras de captación de drenajes. Allí se habilitaron numerosos pozos de monitoreo y observación. La consulta tiene relación con el cálculo de la vulnerabilidad del acuífero solicitado en el ICSARA N°2 para el área donde se ubicará la planta de tratamiento de aguas servidas del campamanto, por cuanto la Autoridad planteó la posibilidad de infiltrar el efluente tratado. En esta área, el Proyecto no contempla instalaciones industriales o de manejo de drenajes. Sin embargo, los pozos NEV 1-3 si cuentan con mediciones de aguas subterráneas en la forma de resultados de pruebas de bombeo.

5.2 En el Vol. 5. Anexo ¡II-A Pág. 120 se propone la cuenca Ortigas como un área natural protegida, por lo que se le consulta al titular aclare el sentido de esta acción cuando en el Anexo 111-E del mismo Vol. Pág. 23 declara que se instalarán paranieves que buscan recolectar nieve adicional sobre las crestas altas de la cuenca. Esta intervención invalidaría su aporte como cuenca testigo o de correlación para los procesos naturales.

Respuesta:

Previo al desarrollo del Adenda N°2 conceptualmente se hacía referencia genérica a la cuenca Las Ortigas; se incluían en ella a las zonas donde están ubicados los glaciares de la zona de Guanaco y Ortigas. Sin embargo, como parte de la ampliación de la línea base en Adenda N° 2, se separaron estas dos zonas, en la subcuenca Ortigas y el Guanaco (Adenda II, anexo III- A página 6). Como parte del plan para dejar a la cuenca Ortigas como área natural protegida, el Proyecto no considera instalar paranieves en esa cuenca pero sí en la subcuenca del Guanaco. El texto del Adenda N°2 a que hace referencia la Autoridad, en forma errónea no diferenció entre las dos sub-cuencas, en circunstancias que se hacía alusión únicamente a la subcuenca el Guanaco.

5.3 Es este mismo sentido se le solicita al titular entregan un informe sobre las alteraciones antrópicas dada la ejecución del proyecto en la Cuenca Ortigas, en el caso de que las hubiesen.

Respuesta:

Como se señaló en la respuesta 5.2 anterior, no se instalarán paranieves en la cuenca Las Ortigas, por lo que no se producirán alteraciones antrópicas de ningún tipo en dicha cuenca.

5.4 Respuesta N° 2.2. ; Gráfico de Concentraciones S04, en los punto NE-5, NE-4, NE-2A, NE-8, Se visualiza un gran variabilidad en las concentraciones de las muestras para diferentes años hidrológicos. Al respecto, se solicita al titular que entregue u análisis que explique las razones de esta condición de la cuenca.

Respuesta:

En la cuenca del Río Estrecho, se observa una gran variabilidad (tanto espacial como temporal) en las concentraciones de sulfato en las aguas superficiales. En todos los puntos de monitoreo de aguas superficiales, se observa una variación temporal de las concentraciones de sulfato y otros parámetros disueltos que responden principalmente a las fluctuaciones del caudal.

La variabilidad espacial refleja la geología de la cuenca. En la parte alta (representada por la estación NE-5) los niveles de sulfatos fluctúan en un rango relativamente alto (aproximadamente entre 200 y 1.500 mg/L). En esta zona, el agua que alimenta el flujo base del Río Estrecho proviene de una secuencia de rocas intrusivas, alterada por fluidos hidrotermales de característica acida-sulfurada. Este ensamblaje de rocas contiene sulfatos (alunita, jarosita etc.) y sulfuros (pirita) a concentraciones entre 5 – 20%. Las aguas que infiltran en esta zona, y que posteriormente alimentan el ´flujo base´ del Río Estrecho, están en equilibrio termodinámico con la masa química móvil meteorizadas de las alteradas, produciendo un pH bajo, concentraciones de sulfato típicamente controlado por saturación de yeso, y concentraciones elevadas de Fe, Al y algunos metales pesados.

En el punto NE-8, ubicado varios kilómetros aguas abajo, los niveles de sulfatos en el Río Estrecho fluctúan en un rango estrecho de 50 a 200 mg/l. Mientras, en los puntos intermedios NE-2A y NE-4 las variaciones de sulfatos son de 250 – 450 mg/L respectivamente. La disminución de sulfato en la parte baja de la cuenca se explica por los contrastes litológicos entre las varias sub-cuencas que descargan al lecho principal del Río Estrecho. En la parte baja, se observa especialmente una contribución al flujo base proveniente de sub-cuencas no mineralizadas con aguas característicamente de tipo Ca – HCO_3.

En todos los puntos de monitoreo de aguas superficiales, se observa una variación temporal de las concentraciones de sulfato y otros parámetros disueltos que responden principalmente a las fluctuaciones del caudal. Esta tendencia, se puede explicar en base a un modelo genérico de las contribuciones del ´flujo base´, ´interflow´ y escorrentía al caudal total del río. El flujo base lleva la mayoría de la masa química pero su volúmen es relativamente estable. Las masas químicas del interflow y escorrentía son relativamente bajas, pero sus volúmenes son más dinámicos. En la época de deshielo, la razón entre las contribuciones del flujo base y escorrentía baja profundamente, y por tanto se observa una dilución de la masa química total (*ie* disminución de concentraciones). Las mayores variaciones de sulfatos se observan en los meses de noviembre a enero, lo que se atribuye a que estos meses son los que presentan mayor variabilidad de caudal entre un año y otro, dependiendo de las precipitaciones nivales caídas en el respectivo invierno.

Es importante destacar que el comportamiento hidroquímico descrito anteriormente es normal en ambientes mineralógicos con generación natural de ácido.

5.5 Con relación a la Respuesta N° 2-15, de la Adenda 2. Se consulta al Titular si utilizó un criterio de Promedio para obtener la carga máxima de la cuenca, si es así se consulta si es el indicar más adecuado, para medir las concentraciones de Sulfatos. Se sugiere considerar la Moda de las muestras como un indicar y comparar las gráficas.

Respuesta:

Se entiende que la Autoridad se refiere a la consulta 2.2 y no 2.15 del Adenda N°2. En la respuesta 2.2 del Adenda N°2 se presentaron gráficos de concentración de sulfatos en los puntos NE-5, NE-2a, NE-4 y NE-8, incluyendo el valor promedio (barras), el máximo absoluto y mínimo absoluto. El objetivo de estos gráficos es solamente mostrar cómo varían estacionalmente (mensualmente) las concentraciones de este parámetro, ilustrando que en la parte alta de la cuenca (NE-5) existe una tendencia estacional más marcada (mayores niveles en invierno y menores niveles en el período de deshielo), en tanto hacia aguas abajo esta tendencia natural se pierde cada vez más (en NE-8 prácticamente no hay variación de sulfatos a lo largo del año). Este mismo ejercicio se podría haber ilustrado de igual forma con las concentraciones con 50% de probabilidad de excedencia. La única diferencia es que las concentraciones (barras en el gráfico) en general serían algo mayores que el promedio, debido a que se relacionarían también con un menor caudal en cada punto del río (los gráficos de correlación SO4 v/s caudal de la misma respuesta 2.2 muestra un aumento de concentraciones al disminuir el caudal.

5.6 Con relación a la respuesta N° 2-29 y 2-28 de la Adenda 2, se consulta al titular qué pasa con las descargas entre los punto NE-2 y NE-4, con respecto a la Norma Nch 1.333, considerando que esta zona es de Pastoreo, el agua continuará como agua para bebida para animales o crianceros.

Respuesta:

El compromiso original del Proyecto consideraba el cumplimiento de la norma NCh 1.333 en el punto NE-4 para aquellos parámetros cuya línea base se ubicaba bajo los límites establecidos en ella. En la Adenda N°2, el titular complementó el compromiso asociado al manejo de los drenajes ácidos, incorporando el objetivo de mantener los niveles de línea base de calidad de las aguas en la cuenca, aguas abajo del punto NE-5. Este compromiso incluye, por tanto, el tramo del Río del Estrecho entre los puntos NE-2 y NE-4, de modo que no se afectará la calidad de las aguas y sus actuales aptitudes de uso. Por su parte, las aguas servidas tratadas no alterarán sensiblemente la calidad de las aguas, dado su bajo caudal (<2 L/s) relativo al flujo del río y el cumplimiento del D.S. Nª90.

5.7 Con relación a las respuestas de las Pág. 2-36 / 2-90 / 2-9 1, Se reitera al Titular la necesidad de un compromiso explicito con respecto a respetar la Norma Nch 409 y Nch 1333 en el Punto NE-8, considerando que existen parámetros no regulados por el D.S: N° 90 ni por Nch .1.333 pero que si lo están Nch 409.

Respuesta:

Se acoge la observación de la Autoridad. CMN se compromete a mantener los niveles de línea base de la calidad de las aguas en la cuenca del Río del Estrecho aguas abajo del punto NE-5, incluyendo los parámetros regulados por la NCh 409.

5.8 En ANEXO VII-C, Página N° 40: Medidas de Mitigación y Compensación: «Recursos hídricos", solicita al Titular el compromiso de mantener la calidad de las aguas, principalmente en la localidad de Chollay, asentamiento humano más cercano al proyecto, respetando no solo las normas de agua para Riego, sino también las normas de agua potable. Como manera de monitorear esta variable se recomienda incluir en su red de monitoreo las estaciones de Agua Potable Rural más cercanas a este Punto, es decir, Estación Chollay, Estación Conay (abastece Conay y los Tambos), y estación la Pampa (La Pampa, La Angostura), de manera de poder monitorear la calidad de las aguas y los cambios en su flujo aguas abajo.

Respuesta

El compromiso del Proyecto es no alterar la calidad de línea base de las aguas, incluyendo las normas de agua potable, para lo cual materializará un conjunto de obras de captación, almacenamiento y tratamiento de los drenajes potencialmente ácidos, y operará plantas de tratamiento de aguas servidas. Este compromiso será verificado en las estaciones de monitoreo comprometidas en el Anexo II-D-2 del Adenda N°2, que incluye NE-8, aproximadamente 15 km aguas arriba de Conay, 3 puntos de monitoreo (CN-7, CN-8, y NE-9) entre NE-8 y Conay y 2 puntos (A-8 y A-10) inmediatamente aguas debajo de Conay.

El monitoreo de los puntos antes señalados, así como de los otros puntos incluídos en el plan de monitoreo, proporcionan una alerta, a tiempo, de potenciales cambios en la calidad de las aguas y permiten determinar sí éstos son atribuíbles al Proyecto. El monitoreo aguas abajo de A8 y A10 en el río Conay no proporciona ningún beneficio adicional.

5.9 Con relación a la respuesta pág. 2-37; El titular señala que las aguas de las Piscinas, no necesariamente serán devueltas al cauce después de tratarlas, dado que se considera dar uso Industrial a esta agua en el área de la mina presentándose la necesidad de descargar al río Estrecho en años húmedos, cuando los caudales de drenaje superen las posibilidades de uso. Al respecto, se consulta al titular qué caudal es el considerado ara uso industrial.

Respuesta:

En el lado chileno, el Proyecto tendrá un consumo industrial de agua de 40 L/s, y para su abastecimiento privilegiará el uso de aguas de contacto contenidas en las piscinas de almacenamiento, en el rajo abierto y en la piscina de los acopios transitorios de mineral. El consumo de agua industrial se distribuye de la siguiente forma: 6 L/s en el taller de la mina; 22 L/s en abatimiento de polvo de caminos internos; 3 L/s en la planta de tratamiento de drenajes ácidos; y 9 L/s en evaporación forzada de drenajes ácidos. A lo anterior, se agrega un consumo de agua de 2 L/s en la Quebrada Barriales para uso potable en el campamento, y 3 L/s promedio (10 L/s máximo) en la cuenca del Río El Toro. Para mayor detalle, revisar la información contenida en la sección 12 del Adenda N°2.

5.10 Con relación a la respuesta Pág. 2-38; se consulta si el Titular posee, antecedentes de años secos, como 1967, y qué medidas se tomarán si el caudal no alcanza ni siquiera un caudal ecológico.

Respuesta

Los antecedentes utilizados en el estudio hidrológico incluyen los registros de caudal de años secos como 1967, en las estaciones fluviométricas Río del Carmen en San Félix (1964-1988), Río del Carmen en Ramaditas (1954-2001), Río del Tránsito en Angostura de Pinte (1964 a la fecha), y Río del Tránsito antes de la junta con Río del Carmen (1948 a la fecha). Además, se realizaron cálculos de caudal mínimo para el área del Proyecto empleando el método DGA-AC (Adenda Nª1).

El Proyecto dispondrá de capacidad de almacenamiento de aguas en diversas instalaciones, que incluyen las piscinas de acumulación de drenajes ácidos, las depresiones al interior del rajo abierto, y la piscina de los acopios transitorios de mineral. Ello permitirá abastecer de agua los requerimientos de la mina e instalaciones auxiliares en años secos. En todo caso, el Proyecto respetará las disposiciones de la Junta de Vigilancia del Río Huasco y

sus Afluentes, y los caudales ecológicos que sean establecidos por la Dirección General de Aguas.

5.11 Se solicita precisar con ayuda de figuras o esquemas, la distribución de los niveles en cortes verticales, tanto en forma transversal como perpendicular al río del Estrecho.

Respuesta:

La información requerida se proporciona en Adenda Nª 2, Volumen 2, Anexo II-C "Informe Condiciones Hidrogeológicas de Línea Base Sector Superior del Río del Estrecho Proyecto Pascua-Lama", planos 5.2 y 5.3. En estos planos se indica el nivel de la napa en distintos cortes longitudinales y transversales al Rio del Estrecho. Se adjunta planos en Apéndice 5.1

5.12 En cuanto al balance hídrico se solicita al titular que explique el valor adoptado para el deshielo de glaciar constante para el período de simulación (período 1982-2004) e igual a 34 lis.

Respuesta:

Se debe aclarar que el caudal de 34 l/s no constituye un valor constante de deshielo del glaciar, sino un valor promedio. Mensualmente se produce una variación desde un caudal cero (período de congelamiento sin flujo desde el glaciar) hasta valores máximos en los meses del verano tardío. Este caudal promedio se estimó a partir de la Figura 2.2a. El análisis se amplificó en la Figura 2.2b para estimar la magnitud del caudal de escurrimiento del glaciar. El caudal del glaciar escurre superficialmente a través de las quebradas que bajan hasta el sector del acuífero, donde el agua se infiltra y alimenta el flujo subterráneo local. Cuando se alcanza la capacidad del acuífero, el aporte del glaciar sigue su recorrido superficialmente a través del cauce del Río del Estrecho superior.

En la Figura 2.2a se observa que los caudales de NE-2a siempre son mayores a los de NE-5, excepto en los períodos de enero a marzo, cuando los dos caudales son similares (ver los años 1997, 2001, 2004, 2005). En dichos períodos la cuenca superior aporta la mayoría del caudal que se observa en la cuenca aportante al punto NE-2a. El período ocurre después de la desaparición de la nieve del invierno inmediatamente anterior, por lo que se estima que el caudal representa básicamente el aporte del glaciar.

En la Figura 2.2b se presentan los caudales de NE-5 medidos en el período comprendido entre el 1 de abril de 2003 y el 1 de abril de 2004, que representa un año muy seco que refleja la contribución del caudal del glaciar.

Figura 2.2a Caudales Medidos, Estaciones NE-2a y NE-5.

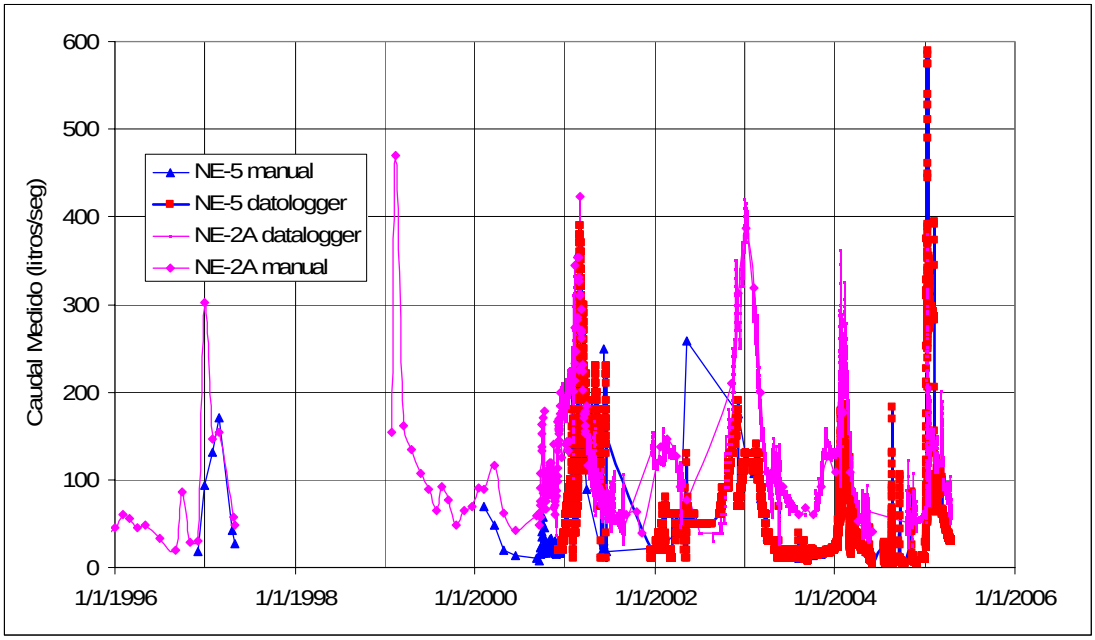
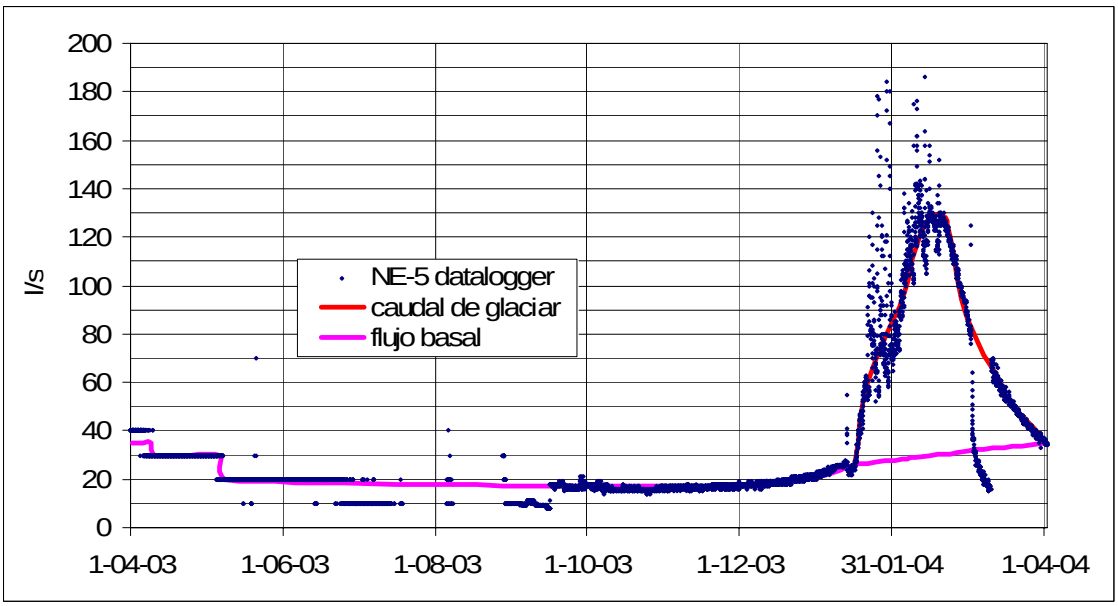


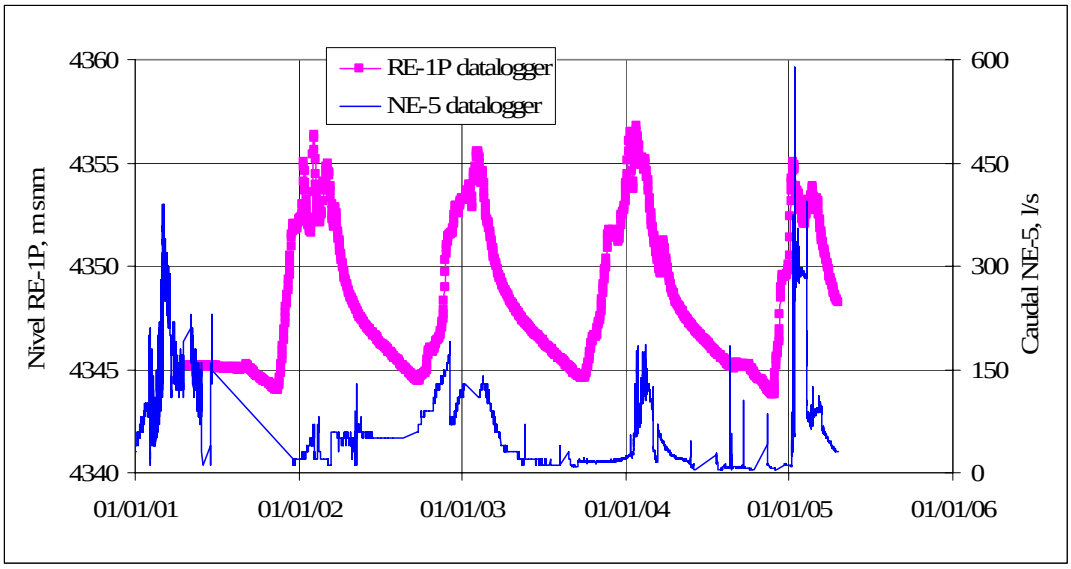
Figura 2.2b Caudales Medidos, Estaciones NE-5, 2003-2004.



En la Figura 2.4 se presenta la variación de los niveles de napa medidos en el pozo de monitoreo RE-1P y la variación de los caudales medidos en la estación NE-5. El pozo RE-1P está ubicado en la quebrada principal de la cuenca superior del Río del Estrecho, inmediatamente aguas abajo del glaciar. El nivel de RE-1P indica un efecto de regulación por el deshielo del glaciar; se hace notar la poca diferencia entre el año húmedo de 2002-03 y los otros años más secos.

Los niveles de RE-1P empiezan a subir en octubre-noviembre, alcanzando su máximo de 4.355 m snm en enero. Los caudales de NE-5, en los años secos, empiezan a subir en enero, coincidente con los niveles máximos de RE-1P (ver los años de 2003-04 y 2004-05 en la Figura 2.4). Como se ha señalado, antes de enero prácticamente todo el deshielo glaciar se infiltra al acuífero de roca fracturada de la cuenca superior. Cuando el acuífero llega a su capacidad (identificada con el nivel 4.355 m snm en RE-1P), el deshielo glaciar aparece como escurrimiento superficial en NE-5.

Figura 2.4. Niveles de agua de RE-1P con caudales de NE-5.



Basado en el modelo hidrológico del Río del Estrecho, se determinó el flujo total que aporta el glaciar hacia el sector de NE-5, es decir, el caudal que escurre subterráneamente como flujo basal a través de las unidades acuíferas, más el caudal superficial que ocurre después de alcanzarse la capacidad del acuífero. Este caudal totaliza un promedio de 34 l/s, que es el valor empleado en los balances hídricos anuales presentados en el Adenda N°2.

5.13 Con relación a los efectos del proyecto sobre la cantidad y calidad de los recursos hídricos, y en relación con el funcionamiento de los pozos de monitoreo y recolección ubicados aguas abajo del botadero (3 pares de pozos), se indica al

titular que deberá contar previamente con los correspondientes derechos de aprovechamiento de aguas subterráneas.

Respuesta:

CMN acoge lo solicitado por la Autoridad. Se tiene previsto solicitar el traslado de derechos de agua de CMN hacia el área del Proyecto, cubriendo todos los puntos superficiales y subterráneos en que el Proyecto considera efectuar captaciones consuntivas. Para ello se procederá sectorialmente según la normativa vigente.

5.14 Respecto a la línea base característica de las aguas del área del depósito de estériles se requiere que el titular defina explícitamente cuáles son las concentraciones límite de cada parámetro. Lo anterior se utilizará en el proceso de verificación continua de los resultados del monitoreo las posibles variaciones en la calidad debida al proyecto.

Respuesta:

La línea base característica de las aguas del área del depósito de estériles corresponde al punto de monitoreo NE-5. En el siguiente cuadro se señalan, para este punto, las concentraciones de línea base de los parámetros indicadores de acidificación que se emplearán como indicadores de impacto. Los valores corresponden al criterio de activación de planes de respuesta en el Río del Estrecho (Anexo II-E del Adenda N°2), es decir, "Niveles de Alerta" con probabilidad de excedencia de 3,3% (1 mes de cada 30 meses de invierno y 1 mes de cada 30 meses de verano). Esto significa que los valores de la Tabla son excedidos naturalmente cada cinco años. El seguimiento de los parámetros permitirá determinar si esta frecuencia promedio de excedencia natural se mantiene o modifica (aumenta) a causa del Proyecto. En este último caso se asumirá una afectación producida por el Proyecto y se procederá con el almacenamiento y tratamiento de los drenajes. Además, se indican las concentraciones máximas absolutas medidas en la línea base.

Niveles de Alerta y Niveles Máximos – Punto de Monitoreo NE-5

Parámetro	Unidad	Período Invierno (1/30) P.E 3,3%	Período Verano (1/30) P.E. 3,3%	Máximo Histórico
Aluminio	mg/L	83.3	85.7	89
Arsénico	mg/L	0.01	0.02	0.03
Cobre	mg/L	2.69	2.66	3.50
C. eléctrica	uS/cm	1890	1985	1995
Hierro Total	mg/L	5.03	5.47	5.50
Hierro dis.	mg/L	4.27	4.85	4.93
pH (*)	unidad	3.55	3.42	1.90
Manganeso	mg/L	31	32.9	35
Sulfato	mg/L	1195	1438	1484
Zinc	mg/L	15.1	16.3	16.6

(*) En la columna "Máximo Histórico" se presenta el valor mínimo de este parámetro.

Adicionalmente, CMN se compromete a generar información suficiente sobre la calidad del agua subterránea en pozos de monitoreo existentes y otros que se encuentran en construcción en el área del depósito, y a aplicar un método análogo para fijar límites permisibles con criterio estadístico. Los resultados de este análisis serán presentados a CONAMA antes de poner en marcha la construcción del depósito

5.15 En relación con la disminución de la concentración de sulfatos bajo 2000 mg/l, en caso de ser necesaria, se debe aclarar a la titular que ésta deberá llevarse a cabo en el evento de que en el efluente se sobrepasen los valores máximos establecidos para tales efectos y no se verificará tal condición en el cuerpo receptor, aguas abajo de la descarga.

Respuesta:

CMN acepta la observación de la Autoridad. La unidad de tratamiento complementario en la planta de tratamiento de drenajes ácidos se pondrá en operación en el evento que el efluente sobrepase los valores máximos establecidos en la norma de descarga (D.S. N°90/2001), teniendo presente que ello se verificará en la piscina de pulido, antes de verter al río.

5.16 Se debe señalar que el titular puede considerar trabajar con el mantenimiento de la línea base de calidad de las aguas del río, no obstante, para ello deberá contar con la correspondiente autorización de la autoridad correspondiente. Respecto de la comparación que se efectuará entre la calidad natural y la actual, se solicita a la titular que deberá, a partir de los datos existentes, presentar clara y resumidamente la calidad natural representativa de las aguas para todos los parámetros medidos.

Además deberá indicar el criterio utilizado para establecer los contenidos naturales representativos.

Respuesta:

CMN concuerda con la Autoridad respecto de la necesidad de contar con la autorización pertinente para trabajar en el mantenimiento de la línea base de calidad de as aguas.

Respecto de la calidad natural representativa de todos los parámetros medidos, es necesario distinguir dos conjuntos de parámetros: i) aquellos relacionados con drenaje ácido; y ii) aquellos no relacionados con acidificación. Los primeros pueden efectivamente variar como consecuencia del Proyecto, y para ello es necesario definir, a partir de los comportamientos de línea base, los Niveles de Alerta que permitan identificar situaciones de impacto aparente del Proyecto a objeto de adoptar medidas de contingencia. Estos Niveles de Alerta están desarrollados en el Anexo II-C del Adenda, y se presentan en el siguiente cuadro:

Niveles de Alerta de Calidad del Agua – Parámetros Indicadores de Drenaje Ácido

Parámetro	Unidad	NE-2A		NE-3		NE-4		NE-8	
		Invierno	Verano	Invierno	Verano	Invierno	Verano	Invierno	Verano
As total	mg/L	0,0066	0,0026	0,027	0,049	0,015	0,015	0,021	0,004
Al_total	mg/L	33,53	38,33	15,47	16,84	12,34	7,84	6,21	6,21
C. E.	µmho	1132	1152	518	632	405	410	452	464
Cu_total	mg/L	0,84	0,91	0,71	0,70	0,32	0,19	0,45	0,07
Fe_total	mg/L	3,45	3,20	10,92	13,85	1,09	2,31	2,56	1,27
pH	pH	3,93	4,00	4,46	3,30	4,94	4,56	6,97	5,65
Mn_total	mg/L	13,81	14,17	4,18	10,38	2,49	2,89	1,01	1,10
SO_4	mg/L	604	600	267	320	178	174	197	216
Zn_total	mg/L	6,31	6,86	1,96	2,64	1,92	1,64	0,87	0,52

Se debe aclarar que la significativa variabilidad natural de los parámetros anteriores no permite establecer un valor "máximo a no exceder" para cada uno de ellos, debido a que naturalmente pueden darse concentraciones puntualmente muy elevadas. Es por ello que se ha propuesto trabajar con Niveles de Alerta, los cuales representan una concentración o valor que se excede naturalmente con cierta frecuencia (cada 5 años en promedio para invierno y verano), y el objetivo del Proyecto es mantener este comportamiento (frecuencia de excedencia).

Para los parámetros no indicadores de acidificación no se esperan variaciones asociadas al Proyecto. Por tanto, para estos parámetros, la calidad representativa de línea base está dada por el valor promedio y el valor máximo, como valores referenciales que no debieran variar a causa del Proyecto. El siguiente cuadro resume los valores obtenidos de la línea base.

	Total Período NE-2A		Total Período NE-4		Total Período NE-8		Total Período NE-5	
Parámetros	Promedio	Máximo	Prom	Max	Prom	Max	Prom	Max
Ag, Tot_ mg/l	0,0025	0,032	0,0086	0,082	0,0006	0,002	0,0008	0,005
Alk, HCO3 mg/l			11,9	40				
Alk, Tot_ mg/l	1,23	10	15,09	42,5	22,95	71	0,33	2,5
B, Tot_ mg/l	0,21	0,25	0,28	0,9	0,29	0,9	0,58	10
Ba, Total mg/l	0,089	1	0,091	1,5	0,036	0,15	0,035	0,28
Be, Tot_ mg/l	0,0010	0,002	0,0009	0,009	0,0008	0,009	0,0021	0,01
Bi Tot mg/l	0,00075	0,001	0,0006	0,001	0,0004	0,001	0,0008	0,001
Ca, Tot_ mg/l	85,7	120	37,9	65	48,0	75	131,6	196
Cd, Tot_ mg/l	0,024	0,041	0,004	0,016	0,001	0,012	0,044	0,1
Cl Tot_ mg/l	3,93	9	3,49	24	3,58	35,5	4,16	28
CN_TOTAL, mg/l	0,0029	0,005	0,0304	0,1	0,0027	0,005	0,0032	0,025
Co, Tot_ mg/l	0,033	0,057	0,005	0,016	0,012	0,034	0,106	1
CO3 ion mg/l	0,053	0,3	0,077	1,5	0,068	1,5	0,026	0,3
COD, mg/l	5	5	5	5	6,75	12	5	5
Colif Fec NMP			1,9	14	2,3	12	1,1	2
Colif Tot NMP			4,3	21	9,3	60	1,4	4
Color, units			5,4	10	6,4	10	6,8	20
Cr, Tot_ mg/l	0,005	0,016	0,0131	0,239	0,0059	0,048	0,0064	0,076
Cr-hex T mg/l	0,01	0,015	0,005	0,025	0,004	0,025	0,006	0,025
DBO5, mg/l			7,6	11,2	7,3	16,4	5,6	6,5
Dureza mg/l			126,2	204	166,5	250	536,4	1060
F, Tot_ mg/l	0,48	1,12	0,21	1	0,44	1,07	0,48	1,23
FENOLES mg/l	0,0007	0,001	0,0010	0,001	0,0010	0,001	0,0010	0,001
HCO3 ion mg/l	1,11	12	18,17	51,9	30,63	86,6	0,03	0,3
Hg, Tot mg/l	0,0001	0,0005	0,0002	0,0008	0,00008	0,0005	0,00009	0,0005
K, Tot_ mg/l	2,45	3,25	1,97	19	0,92	1,8	3,61	5
Li, Tot_ mg/l	0,016	0,066	0,048	0,5	0,051	0,527	0,106	1
Mg, Tot_ mg/l	22,4	29,4	8,9	18,4	11,9	17,7	33,8	52
Mo, Tot_ mg/l	0,0012	0,009	0,006	0,015	0,007	0,019	0,084	2,9
N, Total mg/l			1,52	3,3	1,89	4	1,32	2
Na, Tot_ mg/l	8,97	14,1	5,13	9,71	5,77	9,83	9,72	13
Na,, %	5,60	7	8,01	10,9	7,25	9,57	4,12	5,03
Ni Tot_ mg/l	0,045	0,08	0,023	0,057	0,021	0,049	0,109	0,38
N-NH3+NH4,mg/l	0,042	0,05	0,177	2,1	0,131	0,76	0,248	2,1
NO2, Tot_ mg/l	0,0016	0,004	0,0071	0,19	0,0021	0,011	0,0065	0,12
NO3, Tot_ mg/l	0,71	1,06	0,91	16	1,06	12	0,83	1,7
Oil & Gr, mg/l	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,48	0,5
P, Total, mg/l	0,003	0,005	1,2	29	0,1	0,37	0,0	0,06
Pb, Tot_ mg/l	0,002	0,007	0,036	0,915	0,011	0,21	0,016	0,385
Pd Tot mg/l	0,023	0,05	0,030	0,05	0,040	0,05	0,028	0,05
PO4, mg/l	#¡DIV/0!	0	3,3	89	0,2	1,1	0,1	0,19
RAS	0,19	0,21	0,20	0,246	0,19	0,227	0,19	0,196
SAAM (Deterg)			0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Sb, Tot_ mg/l	0,0034	0,005	0,0017	0,0097	0,0029	0,018	0,0018	0,0063
SCN mg/l			0,25	0,25				
Se, Tot_ mg/l	0,0072	0,021	0,0015	0,009	0,0019	0,011	0,008	0,044
SiO, Tot_ mg/l	24,9	30,4	13,6	15	12,1	13,2	41,6	44,3
Sn, Tot_ mg/l	0,007	0,01	0,007	0,01	0,003	0,01	0,007	0,01
Sr, Tot_ mg/l	0,15	0,172	0,097	0,13	0,188	0,21	0,150	0,187
Sulfide, mg/l	0,042	0,05	0,073	0,5	0,070	0,5	0,159	0,5
TDS, mg/l	744	999	275	416	329	630	1106	2100
TDS, sum mg/l								
Ti Tot, mg/l	0,018	0,046	0,007	0,02	0,010	0,02	0,004	0,005
Tl, Tot_ mg/l	0,009	0,014	0,021	0,08	0,001	0,003	0,014	0,024
TPH, mg/l	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
TSS, mg/l	24,6	33,5	58,8	2130	34,5	206	25,5	234
Turb, Lab, FTU			16,7	385	16,7	70	16,2	79
U,Tot mg/l	0,043	0,09	0,021	0,035	0,013	0,035	0,063	0,15
V, Tot_ mg/l	0,0006	0,001	0,02	0,77	0,01	0,25	0,27	9,4

Anexo II-B. Recursos Hídricos

5.17 En la Pág. 6 de la Adenda 2, el titular indica que para el análisis regional de las precipitaciones se rellenaron los datos faltantes mediante correlaciones de precipitaciones mensuales de dos estaciones cercanas, sin embargo dado que se requiere estimar precipitaciones mensuales las correlaciones se debe abordar mes a mes y no todos juntos, lo anterior atendiendo a los distintos regímenes que se presentan a lo largo del año.

Respuesta:

CMN concuerda con la autoridad respecto de que un análisis mes a mes puede representar mejor los distintos regímenes a lo largo del año. Sin embargo, en el caso de la información disponible, el análisis mensual entrega coeficientes de correlación (R^2) inferiores a los coeficientes anuales. Por ejemplo, la relación entre la estación Conay y la estación El Indio, empleando todos los datos disponibles, proporciona un R^2 igual a 0,63; al elaborar las relaciones mes a mes se obtienen valores de R^2 entre 0,01 y 0,73, con la mayoría de los valores menores que 0,1. Es por ello que las relaciones utilizadas para transferir los datos entre las estaciones se desarrollaron usando todos los registros mensuales disponibles, como se muestra en los gráficos del Apéndice 1 del Anexo II-B "Informe de Línea Base de Hidrología". Esto se debe a que existían datos insuficientes para desarrollar relaciones mes a mes.

Adicionalmente, el método utilizado para estimar los datos faltantes de precipitación se seleccionó de los métodos contenidos en el documento "Análisis Hidrológico" (preparado por la Comisión Nacional de Riego por Arumi, Jara y Salgado, de la Universidad de Concepción, 2005). El método fue seleccionado como el método disponible más aplicable debido a la baja cantidad de estaciones cuando el régimen de precipitaciones es de tipo orográfico.

Sin perjuicio de ello, se debe considerar que la cantidad de datos faltantes era pequeña e involucraba solamente las estaciones DGA, cuyos datos de precipitación se presentaron para fines de caracterización meteorológica regional, y no se aplicaron en modelamientos, estimación de impactos ambientales o diseño de obras. Para ello se empleó específicamente la información de la estación El Indio, que presenta un registro completo de cerca de 24 años, y no requirió, por tanto, un proceso de relleno de datos faltantes.

5.18 En la Pág. 8 de la Adenda 2, el titular indica que las precipitaciones en la zona del campamento fueron determinadas sobre la base de la regresión lineal entre la información de las estaciones El Indio y Campamento, sin embargo de los datos presentados en las tablas respectivas dicho grafico no es reproducible si se grafican las precipitaciones del Indio con los equivalentes en agua de la estación campamento. Si se grafican las precipitaciones en El Indio junto con la nieve caída en el campamento (cm) el grafico sería mas o menos reproducible. Se solícita se aclare la redacción y los conceptos dados que de encontrarse malos la relación no

sería válida. Adicionalmente, en este caso también resulta pertinente lo señalado en el párrafo anterior.

Respuesta:

No existen errores de unidades o conceptuales en la construcción del Gráfico 2-a. Respecto de la construcción de gráficos mensuales, si bien se concuerda con la autoridad (ver respuesta 5.17) la información simultánea de sólo tres años (2001 a 2003) no proporciona datos suficientes, por lo cuál se empleó el registro completo.

El Gráfico 2-a del Apéndice 2 del Anexo II-B del Adenda Nº2 está construido con los datos mensuales de "equivalente de agua" tanto de la estación Campamento Pascua como de la estación El Indio. A modo de ejemplo, el valor máximo en Campamento es de 196,4 mm (mayo de 2002), y corresponde a un valor de 126,3 mm en El Indio, tal como se puede observar en el Gràfico 2-a y en las Tablas 2-a (Campamento) y 1-f (El Indio).

Los valores de "equivalente de agua" se obtuvieron en cada caso a partir de la densidad de nieve, cuyos valores en general inferiores a 0,10, representan nieve fresca. En el caso de El Indio se agregó, cuando correspondía, las precipitaciones de lluvia (agua líquida). Se debe notar que el valor de densidad cercano a 0,1 hace que los datos de altura de nieve (medida en cm) sea similar al "equivalente de agua" (expresado en mm).

A. La regresión lineal entre las estaciones El Indio y Campamento Pascua se desarrolló utilizando los siguientes pasos:

1. Las cifras totales de caída de lluvia anual fueron restadas de las cifras de equivalente de agua anuales, donde el resultado fue la nieve caída anual expresada como equivalente de agua.

2. Suponiendo que la densidad de nieve anual fue constante a lo largo de todos los meses del año, se calcularon mes a mes las cifras de nieve caída como equivalente de agua, aplicando el equivalente de agua (de nieve caída) de cada año calculado en el Paso 1 a los datos de acumulación de nieve caída mes a mes.

3. Para completar el cálculo, el equivalente de agua de nieve caída mes a mes calculado en el Paso 2 se agregó a los totales de agua caída mes a mes, para determinar la precipitación total como equivalente de agua para cada mes.

B. Los datos mensuales de nieve caída y densidad de nieve se transformaron en precipitación total expresada como equivalente de agua para la estación Campamento Pascua (ver datos en Apéndice 2, Tabla 2-a del Anexo II-B del Adenda N°2).

C. Los datos concurrentes de precipitación total de las estaciones El Indio y Campamento Pascua, expresados en equivalente de agua, se graficaron según se muestra en el Gráfico 2-a del Apéndice 2, determinándose la relación lineal de mejor ajuste.

Por lo anterior, no existen errores de unidades o conceptuales en la construcción del Gráfico 2-a. Respecto de la construcción de gráficos mensuales, si bien se concuerda con la autoridad (ver respuesta 5.17) la información simultánea de sólo tres años (2001 a 2003) no proporciona datos suficientes, por lo cuál se empleó el registro completo.

5.19 Con relación a la respuesta entregada en la pág.8 de la Adenda 2, se solicita al titular que indique donde se muestran las correlaciones entre las estaciones pluviométricas de la Tabla 2.2 con las cuatro estaciones regionales con períodos de registro más largos y más cercanas al sitio del proyecto. Además se solicita indicar explícitamente las relaciones utilizadas para obtener los valores de precipitación a partir de profundidad de nieve que se muestran en la Tabla 2-a.

Respuesta:

La comparación entre los datos de precipitación de la estación Campamento Pascua y la estación El Indio se incluye en el Gráfico 2-a del Apéndice 2 del Anexo II-B "Informe de Línea Base de Hidrología". Las comparaciones entre el Campamento Pascua y las tres estaciones de la DGA ubicadas a elevaciones más bajas (Junta del Carmen, San Félix y Conay) no se incluyeron en el Apéndice 2 debido a que las correlaciones encontradas eran inferiores a las de El Indio. Como referencia, las comparaciones entre la estación Campamento Pascua y las tres estaciones DGA se proporcionan en el Anexo 5-2 de este Adenda. Se estima que este nivel de detalle no es necesario de adjuntar, considerando que las evaluaciones y modelamientos están basados en los registros de la estación El Indio, cuya precipitación se asemeja a la del Campamento.

En la Tabla 2-a del Apéndice 2 del Anexo II-B se utiliza el promedio de las mediciones de densidad de nieve del año 2001 (84,3 kg/m3 o 0,084) para estimar la precipitación como equivalente de agua para los demás años del registro. El rango de variación de la densidad de nieve medida el año 2001 es de 68,5 a 97,0 kg/m3 (diferencia de hasta 19% respecto del valor promedio).

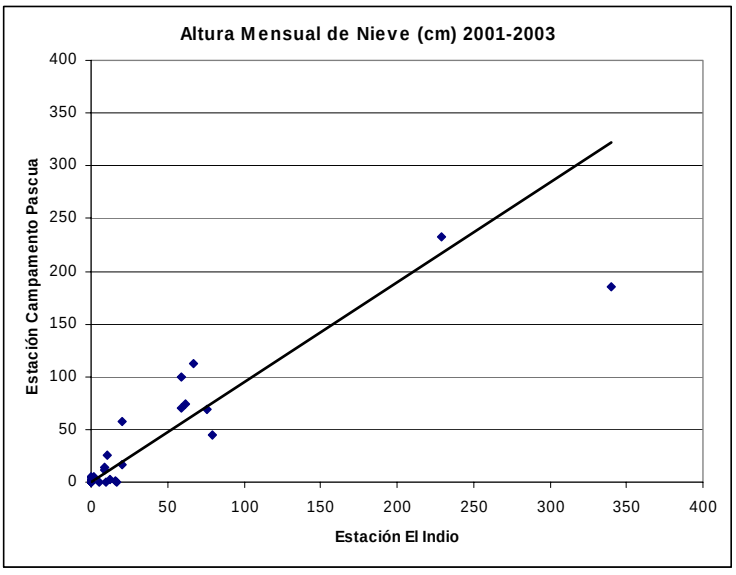
5.20 Se considera que los datos de nieve de la estación Campamento Pascua deben correlacionarse con los datos de nieve de la estación El Indio, y no transformar la nieve del Campamento Pascua a precipitación para luego establecer una correlación entre dicha precipitación y la precipitación de la estación El Indio. Según lo anterior, se solicita recalcular los valores de precipitación y sus correlaciones.

Respuesta:

Los datos de altura de nieve de las estaciones El Indio y Campamento Pascua podrían haber sido correlacionados en la ausencia de información de densidad de nieve. A diferencia de estaciones que miden altura de nieve, la información de densidad de nieve se disponía para ambas estaciones (El Indio y Campamento Pascua). Como resultado de ello, se desarrolló la correlación entre las dos estaciones (equivalente de agua), eliminando el efecto de la densidad de nieve.

La variabilidad en la densidad de la nieve es típica entre estaciones, particularmente en áreas con alta variabilidad de nieve y temperatura. La variabilidad de la densidad de nieve entre El Indio y Pascua no se conoce actualmente debido a la limitada información simultánea de datos de densidad. Sin embargo, la relación entre los promedios anuales de densidad de nieve en El Indio varía de 0,02 a 0,09 (ver Tabla 1-f del Apéndice 1 del Anexo II-B del Adenda N°2), y por lo tanto la variabilidad entre El Indio y Pascua tambié puede ser significativa.

En el siguiente gráfico se muestra la información expresada en altura de nieve para las estaciones El Indio y Campamento Pascua. Se observa que es esencialmente similar al Gráfico 2-a del Apéndice 2 del Anexo II-C del Adenda Nª2 (expresado en equivalente de agua). Se puede observar que la pendiente de la línea es menor que 1, en tanto la relación en el Gráfico 2-a (Adenda N°2) tiene una pendiente mayor que 1. Esta observación confirma que el efecto de la densidad de nieve en la correlación es importante, y proporciona justificación para el uso de precipitación expresada como agua equivalente en reemplazo de nieve caída.



Se hace notar que la curva de relación de precipitación entre ambas estaciones tiene un objetivo descriptivo o de caracterización de las precipitaciones, y no es utilizada en el modelo de simulación, donde se utiliza directamente la información de El Indio, escalada por factores de altura y condición húmeda/seca de cada sector modelado de la cuenca alta del Río del Estrecho. Estos factores son ajustados en el proceso de calibración del modelo.

5.21 De acuerdo a la respuesta entregada en la Pág. 9 de la Adenda, se solicita al titular aclare lo presentado en el numeral 2.3.2, por cuanto de la lectura se desprende que existen errores conceptuales que invalidan los resultados y conclusiones obtenidas a partir de estos análisis, como por ejemplo el concepto de años de retorno- bajo o alto.

Respuesta:

El método descrito en la Sección 2.3.2 del Anexo II-B "Informe de Línea Base de Hidrología" es un método estándar de uso internacional para realizar análisis de frecuencia,(Elementos de Hidrologia por Espilidora, 1975 y Hidrología Aplicada por Chow, Maidment y Mays, 1988). Los conceptos de probabilidad de excedencia expresados como "años de retorno-alto" y "años de retorno-bajo" se incluyeron para ofrecer mayor claridad a lectores que puedan no estar familiarizados con las probabilidades de excedencia. Los "años de retorno-alto" se refieren a años húmedos, en tanto los "años de retorno-bajo" se refieren a años secos.

5.22 Se requiere que el titular, previo al relleno de estadística se proceda a realizar un análisis de consistencia de la información. Sólo una vez finalizado todo ese proceso, y en el evento de que sea satisfactorio, se debe realizar los análisis de frecuencia respectivos. Además, en este anexo se debe diferenciar en todo momento, la precipitación líquida (lluvia) de la precipitación sólida (nieve), pues en este anexo se produce confusión entre ambos términos.

Respuesta:

Se debe señalar que los datos de precipitación obtenidos de estaciones DGA se emplearon sólo con fines descriptivos o de caracterización meteorológica regional, y no con propósitos de diseño o simulación. El metodo de las curvas doble-accumuladas o curvas "masicas" como se describe en Espilidora, 1975 y Searcy and Hardison, 1960 se utilizó para completar un análisis de consistencia de los datos de precipitación anual. El análisis mostró que todas las estaciones analizadas (Junta del Carment, San Felix, Conay, y El Indio) no tienen inconsistencias aparentes en los períodos de registro común desde 1981 que no puedan ser explicadas por la variabilidad de la precipitación típica de áreas montañosas. Se hace notar que la aplicación del método de las curvas doble-acumuladas es típicamente hecha con al menos 10 estacionesy normalmente no es recomendado en áreas montañosascon imortantes diferencias de elevación entre estaciones. En Anexo 5-2 del presente Adenda, se

adjuntan los gráficos mostrando el metodo de las curvas doble-accumuladas o curvas "masicas".

5.23 El modelo hidrológico de la cuenca del río Estrecho debe tomar la información pluviométrica definida en el Anexo II-B de Línea Base hidrológica, y no generarla en forma independiente. Por lo tanto se solicita recalcular lo que corresponda.

Respuesta:

El modelo fue construido empleando directamente los registros mensuales de nieve de la estación El Indio (en su equivalente de agua) para el período de 24 años disponible. Estos datos fueron aplicados como recarga en el modelo de derretimiento, previo escalamiento para tomar en consideración las variaciones de precipitación con la elevación del terreno, y la condición de mayor/menor humedad que se observa en los diversos sectores simulados de la cuenca alta del Río del Estrecho. La curva de precipitación-elevación empleada corresponde a aquella construida en el informe hidrológico del Anexo II-B del Adenda N°2, en tanto los factores de escalamiento de condición de humedad de cada sector se obtuvieron del proceso de calibración del modelo, el cuál consideró los datos de caudal del río y los niveles de agua subterránea en el área. La última versión del modelo incorpora los datos hasta el año 2004 e incluye 5 años de datos de la parte superior del Río del Estrecho.

La información pluviométrica contenida en el Anexo II-B del Adenda Nª2 tiene esencialmente el propósito de caracterizar las condiciones meteorológicas (precipitaciones) del área del Proyecto y zonas aledañas, por ejemplo en términos de eventos con diversas probabilidades de excedencia, variación de la precipitación con la altura, etc.

5.24 Con relación a lo señalado en la Pág. 10, Apéndice 3, tablas 3-e a 3-h, es posible señalar que éstos presentan problemas conceptuales que debe ser corregidos, en especial lo relacionado con las probabilidades (se debe aclarar como se asigna el valor entregado en la columna "cuenta"). Se hace se suma importancia corregir y/o explicar las probabilidades las que sin duda alguna determinan los valores de agua disponibles.

Respuesta:

El método descrito en el Apéndice 3 del Anexo II B – "Informe de Línea Base de Hidrología" de Adenda N°2, es el método de histograma o "frecuencia de distribución" (como se describe en Hidrología Aplicada por Chow, Maidment y Mays, 1988), que es un método utilizado cuando existen valores "cero" en el conjunto de registros. Este método fue utilizado para el desarrollo de estimaciones de precipitación mensual.

Las tablas del Apéndice 3 se pueden explicar de la siguiente manera:

- El número de la columna "cuenta" corresponde al número de los puntos de registros medidos que se encuentran en el primer intervalo del histograma. Para este análisis, cada intervalo tiene un tamaño de 5mm y, por lo tanto, el primer valor en la columna "cuenta" corresponde al número total de puntos de registros que poseen un valor entre 0 y 5mm.

- El número en la columna "cuenta" luego se divide por el número total de puntos de registros para determinar una probabilidad, según se indica en la columna "prob".

- Luego, las probabilidades se suman acumulativamente en la columna siguiente "prob. acumulada". Esta probabilidad acumulada es igual a (1 - probabilidad de excedencia) para ese intervalo del histograma.

- Los valores informados en el Anexo IIB del Adenda N°2 fueron determinados asumiendo una distribución lineal entre cada intervalo y mediante la interpolación de valores asociados con cada probabilidad de excedencia al 0.5 mm más próximo.

De esta manera, las tablas referidas no presentan problemas conceptuales, sino que constituyen el resultado de un modelo estándar en materia hidrológica.

5.25 Pág. 10 es de importancia que se realice un esfuerzo por adecuar la redacción, por cuanto no es clara y no permite seguir los cálculos y consideraciones presentadas.

Respuesta:

Las consideraciones presentadas en el texto de la página 10 del Adenda N°2 a que hace referencia la Autoridad, lo que se expresa es lo siguiente (referido al método del histograma): el método proporciona estimaciones confiables de escenarios húmedos para períodos de retorno iguales a la cantidad de años de registro en cada estación (20 años en el caso de Conay, San Félix y El Indio; y 50 años en el caso de Junta del Carmen); para períodos mayores de tiempo este método pierde confiabilidad. En tanto, las estimaciones de escenarios secos son confiables para probabilidades de excedencia del tipo 99% debido a la gran cantidad de mediciones con precipitación cero en los registros.

En la respuesta 5.24 anterior se presenta un detalle del método del histograma aplicado para el desarrollo de estimaciones de precipitación mensual.

5.26 Con relación a lo señalado en la Pág. 12 se solicita al titular que incorpore los ajustes realizados para la determinación de la precipitación anual para las distintas probabilidad de excedencia, considerando que se menciona que se hicieron evaluaciones visuales. No se presenta respaldo de los valores entregados en la tabla 2-5.

Respuesta:

En Anexo 5-2 del presente Adenda, se adjuntan los gráficos de ajuste de las funciones de distribución de probabilidad a los valores de precipitación anual indicados en la Tabla 3-m del Apéndice 3 del Anexo II-B del Adenda N°2. Las curvas seleccionadas como mejor ajuste corresponden a aquellas que entregan el menor valor del Test Chi-Cuadrado señalado en la Tabla 3-m.

5.27 Con relación a lo respondido en la Pág. 12 se señala al titular que al parecer la relación establecida para rellenar la precipitación de la estación campamento podría estar incorrecta,de acuerdo a lo señalado anteriormente. Razón por la cual se solicita sea corroborada, y corregida de ser necesario y explicado de mejor forma. Adicionalmente, se solicitan las figuras que sustenta la evaluación visual, señalada en el numeral 2.3.3.

Respuesta:

La relación establecida para rellenar la precipitación de la estación campamento no está incorrecta tal como se señaló en las respuestas 5.24, 5.25 y 5.26 precedentes se describen los métodos utilizados para el desarrollo de las estimaciones de precipitación anual, que incluye la estación Campamento Pascua. En Anexo 5-2 del presente Adenda se adjuntan los gráficos de ajuste de las funciones de distribución de probabilida a los valores de precipitación anual indicados en la Tabla 4-c del Apéndice 3 del Anexo II-B del Adenda N°2 (estación Campamento Pascua).

5.28 Con relación a lo respondido en la Pág. 13 se reitera la observación en relación a la forma de determinar las probabilidades entregadas en las tablas del Apéndice 4, vale decir al parecer existen errores conceptuales que corregir.

Respuesta:

De acuerdo a lo señalado en las respuestas 5.21 y 5.24, se puede establecer que no existen errores conceptuales en los cálculos de precipitación para diferentes escenarios de años húmedos y secos.

5.29 Con relación a lo señalado en la Pág. 18, Adenda 2, donde el titular menciona que las regresiones lineales con la estación Río del carmen en Ramadillas son "esencialmente idénticas" (Apendicl 5.1), sin embargo se mencionar que presentan R2 muy diferentes, además que uno de ellos es bastante bajo, por lo anteriormente mencionado se debe analizar lo planteado.

Respuesta:

El Gráfico 5-a del Apéndice 5 del Anexo II-B "Informe de Línea Base de Hidrología" muestra que los valores R^2 fueron diferentes para las dos regresiones lineares realizadas (Ramadillas con La Majada y Ramadillas con San Félix). Además, el Gráfico 5-a permite observar que esta diferencia se debe a la dispersión presente en el conjunto más pequeño de registros (La Majada), que da como resultado un bajo valor R^2 (0,26) para la correspondiente correlación con Ramadillas. Si dicho conjunto de datos tuviera más valores, se estima que el impacto de los puntos que no se encuentran dentro de la tendencia general se reduciría y el valor R^2 aumentaría, tal como se observa en la correlación obtenida entre Ramadillas y San Félix (R^2=0,87).

5.30 Con relación a lo señalado en la Pág. 22 el titular indica que se realizó una evaluación visual del ajuste de las funciones de distribución, se solicita que se entreguen dichas figuras. Además todos los ajustes deben contar con el resultado del test Chi-cuadrado que indica cual es mejor ajuste de funciones de distribución.

Respuesta:

En Anexo 5-2 se adjuntan los gráficos de ajuste de las funciones de distribución de probabilidad a los valores de caudales anual. Las curvas seleccionadas como mejor ajuste corresponden a aquellas que entregan el menor valor del Test Chi-Cuadrado señalado en las Tablas del Apéndice 7-2 del Anexo II-B del Adenda N°2.

5.31 Con relación a lo señalado en la Pág. 22 se solicita al titular que indique cual es el sentido de analizar los datos de ordenados de menor a mayor, dado que el método de Weibull indica que los análisis se realizan con la información de mayor a menor y las funciones de distribución también lo indican.

Respuesta:

El ordenamiento de los datos se realizó conforme a los escenarios hidrológicos evaluados. Así, el ordenamiento de los flujos de mayor a menor se utilizó para desarrollar las estimaciones de flujos altos (escenarios húmedos), mientras que el ordenamiento de menor a mayor se utilizó para llevar a cabo el análisis de frecuencia de las estimaciones de flujos bajos (escenarios secos).

Plan de Contingencia

5.32 Respecto de los niveles de respuesta establecidos, en el Plan de Contingencia, se solicita al titular que se modifiquen ambos en cuanto a que el nivel sea activado en tanto cualquiera de los 9 parámetros hayan excedido el nivel de alerta en alguna de las estaciones de monitoreo de control aguas debajo de NE-5.

Respuesta:

Teniendo presente la alta variabilidad natural de las concentraciones de parámetros de interés en las aguas y la ocurrencia natural de drenajes ácidos en el área del Proyecto, CMN estima que un solo parámetro puede conducir a interpretaciones equívocas sobre la ocurrencia de un efecto por dranejes ácidos a causa del Proyecto. En tal sentido, y acogiendo lo solicitado, CMN propone que el Plan de Respuesta de calidad de aguas se active cuando al menos dos (2) parámetros indicadores de drenaje ácido excedan sus respectivos Niveles de Alerta (no tres parámetros como se propuso originalmente en el Adenda N°2).

5.33 En relación con las medidas de mitigación en el evento de que se produzcan desviaciones de la quimica natural de las aguas se solicita a la titular que éstas sean complementadas con medidas tendientes a eliminar las fuentes u origen de tales desviaciones, en el largo plazo. Estas medidas deberán ser indirectamente y periódicamente evaluadas por la autoridad a través del análisis de los monitoreos. Por otra parte se considera que el cese de faenas no constituye una acción correctiva ni mitigatoria.

Respuesta:

CMN está de acuerdo en que el cese de las faenas no constituye una acción correctiva ni mitigatoria. Por otra parte, tal como está señalado en el Plan de Respuesta adjunto en el Anexo II-C del Adenda N°2, a través de los monitoreos e investigación de un evento de desviación de la química natural de las aguas, se definirán, planificarán y ejecutarán las soluciones correctivas en los ámbitos de la captura de los drenajes, desvío de aguas de no contacto, y en general cualquier causa que requiera una solución basada en la investigación que se lleve a cabo. Todas ellas estarán claramente enfocadas a resolver un eventual problema como objetivo de largo plazo. La efectividad de las soluciones se verificará a través de la información de los monitoreos en línea y los informes periódicos que se entregarán a las Autoridades.

6. MODELO HIDROGEOLÓGICO

Se actualizó y complementó el Anexo II-F de Adenda N°2 en respuesta a las preguntas y comentarios de la DGA. Se entrega el nuevo informe como Anexo 6-1 del presente Adenda. Las respuestas siguientes están basadas en el nuevo informe.

En relación al modelo actual se compromete entregar un CD con el modelo completo con demostración e instructivo de Sr. Michael Jones (autor Anexo 6-1) para su uso.

6.1 El modelo hidrogeológico no puede ser considerado representativo en un grado razonable del funcionamiento del sistema modelado, por cuanto, no se entregan indicadores de bondad de ajuste y una validación visual. Si bien el modelo entrega antecedentes necesarios para mejorar la calibración, esta no puede ser el único método para realizar la calibración de cualquier modelo.. Esto tiene implicancias en las conclusiones que se puedan obtener a partir de él, por lo tanto, dado que no se tiene una análisis objetivo de la representatividad del modelo éstas deben ser consideradas sólo como aproximadas.

Respuesta:

Calibración del Modelo

En el nuevo informe del modelo hidrogeológico se ha complementado el proceso de calibración, incluyendo las siguientes variables: caudal superficial en los puntos NE-5, NE-2A y NE-4; y niveles en los pozos de observación con información disponible en la parte alta de la cuenca. La calibración se presenta gráficamente para el conjunto de datos de caudal superficial y para el conjunto de datos de nivel piezométrico. En cada caso se empleó la información histórica disponible hasta abril de 2004 (los datos sucesivos hasta abril de 2005 se emplearon en el proceso de validación del modelo). Se empleó el método MRS relativo para expresar numéricamente la bondad del ajuste. En las siguientes figuras se muestran los resultados del proceso de calibración:

Figura 6.1. Resumen de la calibración de caudales de agua superficial

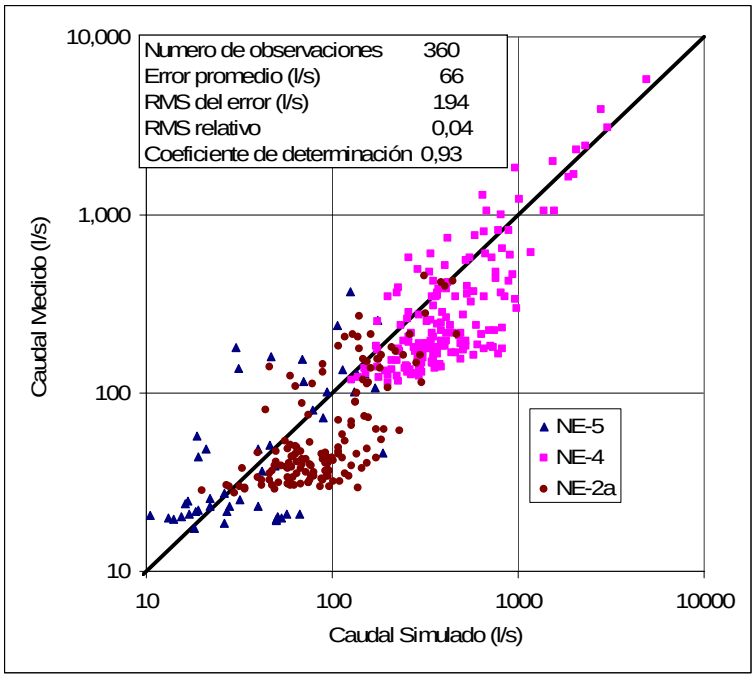
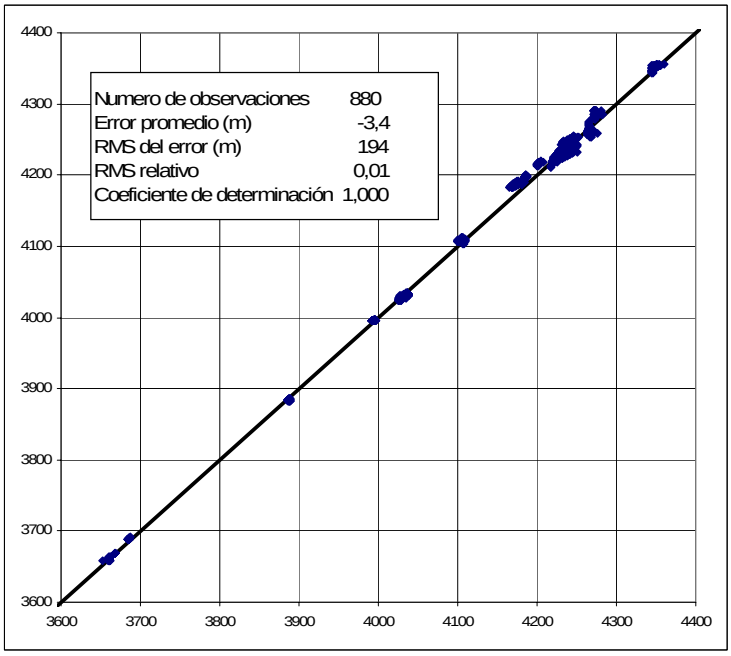


Figura 6.2. Resumen de la calibración de los niveles de agua subterránea



Después de la calibración del modelo usando los datos hasta abril 2004, se actualizó el modelo hasta abril de 2005 para validarlo. En la Figura 6.3 se presentan los caudales medidos y simulados en los puntos NE-5, NE-2a y NE-4, en tanto la Figura 6.4 muestra los niveles de agua subterránea, medidos y simulados, desde mayo de 2004 hasta abril de 2005.

Figura 6.3. Niveles Medidos y Simulados de agua subterránea – Período de Validación

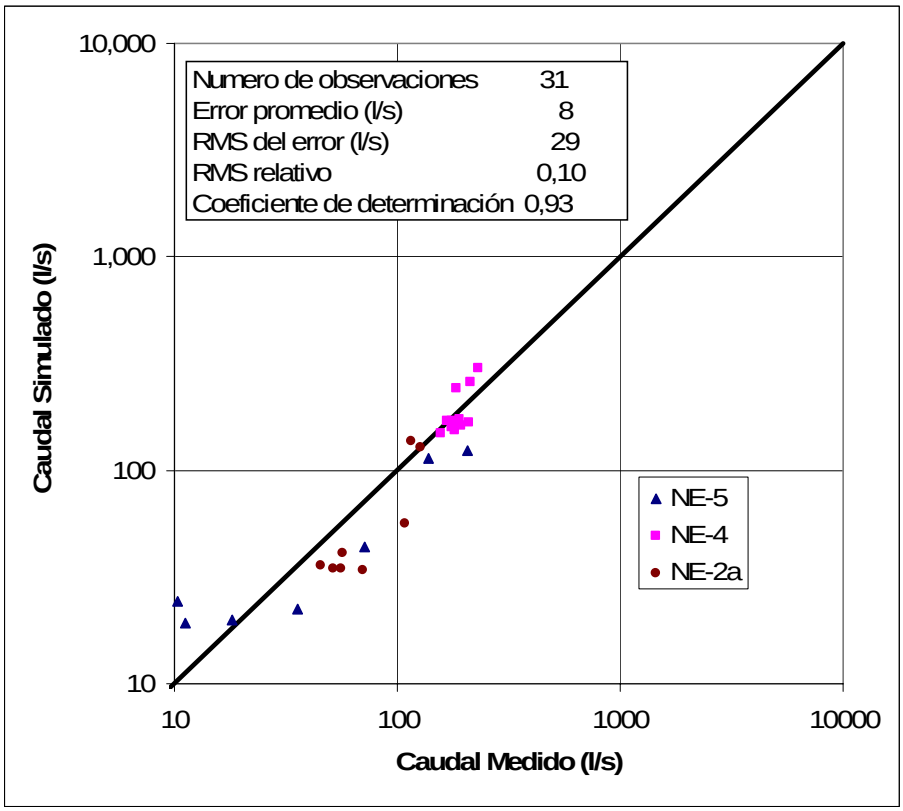
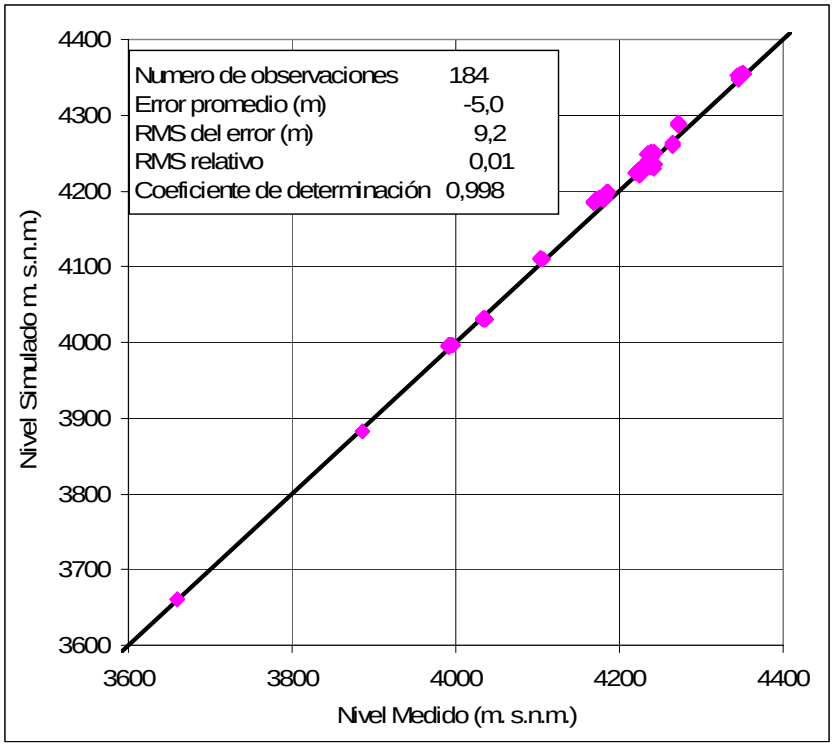


Figura 6.4. Caudales Medidos y Simulados – Período de Validación



6.2 ***Se requiere que respecto del modelo hidrológico de la cuenca del río del Estrecho, el titular fundamente o justifique la afirmación de que la precipitación de la estación El Indio se caracteriza por una secuencia de 5 años secos, interrumpidos por años húmedos, en promedio una vez cada 5 años. No es equivalente decir que cada 5 años secos hay uno húmedo a decir que por cada 5 años secos hay uno húmedo. Lo anterior se debe que la primera aseveración implica un análisis de frecuencia de los años húmedos por sobre los secos y no un simple promedio. Además, en la Pág. 21 de la Adenda 2, donde el titular en varias pasajes de este y otros anexos indica que "las series de precipitaciones muestra que un año de latas precipitaciones es seguido por varios años de bajas precipitaciones", no encontrándose el sustento para dicha afirmación. Al respecto se solicita al titular indicar lafuente de antecedentes para concluir dicha afirmación.***

Respuesta:

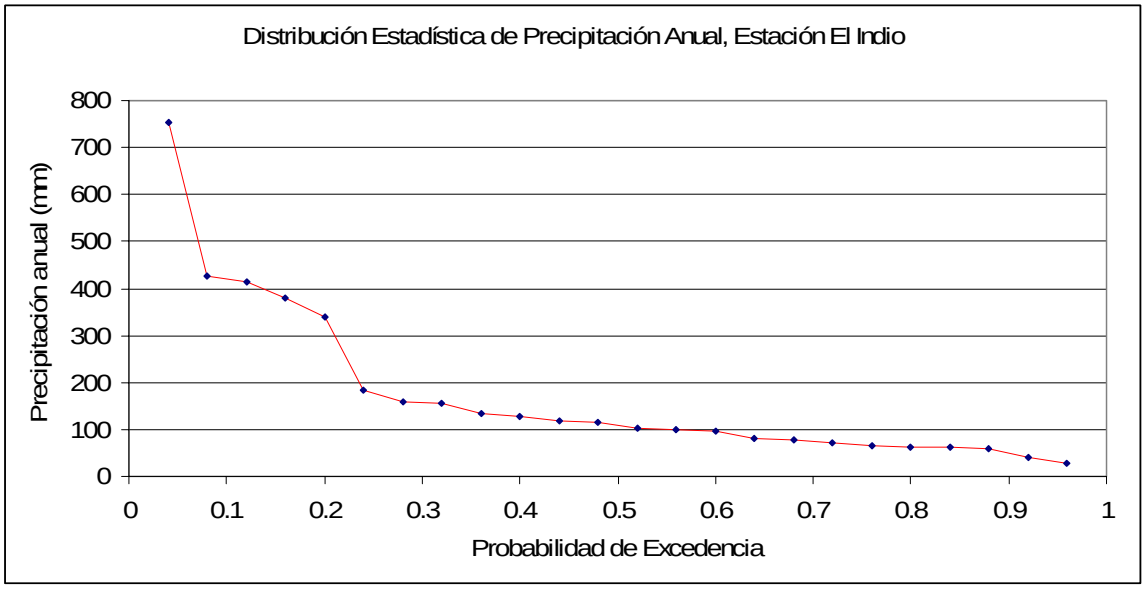
El Anexo II B - Informe de Línea Base de Hidrología de Adenda N° 2, incluye el enunciado "un año de alta precipitación seguido por varios años de baja precipitación", cita tomada de Concha, 2004. Esta aseveración constituye simplemente una observación de la historia reciente de Pascua y de la historia de más largo plazo de El Indio; pero no se usa en el análisis estadístico del Informe de Línea Base de Hidrología ni en el modelamiento

hidrológico; su empleo es sólo descriptivo, a nivel general, de la tendencia de las precipitaciones registradas.

Con los datos de El Indio se identifican como húmedos, por ejemplo, los años 1987, 1997 y 2002, con un año menos húmedo en 1992.

En la Figura 6.5 se presenta la distribución de la precipitación anual de El Indio. Se muestra un grupo de 19 años secos, con precipitación menor que 190 mm equivalente de agua, y un grupo de 5 años húmedos, con precipitación mayor que 340 mm equivalente de agua. En el registro no hay año intermedio con precipitación entre 190 mm y 340 mm.

Figura 6.5. Distribución de la Precipitación Anual – El Indio



De la figura se desprende que bajo una probabilidad de excedencia de aproximadamente 0,2 las precipitaciones anuales experimentan un aumento sobre los 300 mm; esto equivale en promedio a una recurrencia de 5 años.

6.3 Se debe indicar en base a qué criterios y estaciones se ajustó la razón calculada de PMA correspondiente al sector de glaciares.

Respuesta:

En el Anexo 6-1 del presente Adenda se amplía la discusión sobre la precipitación acumulada en el sector de glaciares (Sección 2.3.4, Pág. 24). La razón calculada para el valor de PMA correspondiente al sector del glaciar se ajustó durante el desarrollo del modelo, para obtener un nivel de precipitación que concuerde con el aporte glaciar observado (Figura 2.2b) y con una pérdida de masa de hielo razonable para el período

1981-2004, considerando datos de otros glaciares regionales (Ginot et al, 2001, Escobar y Garin, 2005) y los glaciares de la cuenca vecina del Río El Toro (Golder, Agosto de 2005c).

En general, los valores de PMA de todos los sectores modelados se ajustaron hasta reproducir adecuadamente el flujo total en la sección de salida de la cuenca alta del Río del Estrecho (punto NE.5). Si bien se podría haber trabajado con un valor único y uniforme de PMA, la inclusión de valores diferenciados por sector incorpora una condición natural que se observa en el área del Proyecto (sectores más húmedos en el lado norte y más secos en el lado sur de la cuenca).

6.4 Con relación a lo señalado en la Pág. 17 el titular debe justificar en forma clara la utilización de la estación El Indio, como representativa de la cuenca del río Estrecho. Además, se debe indicar la metodología que se utilizó para ajustar la razón de PMA además de entregar las precipitaciones anuales para dichas razones.

Respuesta:

El modelo fue construido empleando directamente los registros mensuales de nieve de la estación El Indio (en su equivalente de agua) para el período de 24 años disponible. Estos datos fueron aplicados como recarga en el modelo de derretimiento, previo escalamiento para tomar en consideración las variaciones de precipitación con la elevación del terreno, y la condición de mayor/menor humedad que se observa en los diversos sectores simulados de la cuenca alta del Río del Estrecho. La curva de precipitación-elevación empleada corresponde a aquella construida en el informe hidrológico del Anexo II-B del Adenda N°2, en tanto los factores de escalamiento de condición de humedad de cada sector se obtuvieron del proceso de calibración del modelo, el cuál consideró los datos de caudal del río y los niveles de agua subterránea en el área. La última versión del modelo incorpora los datos hasta el año 2004 e incluye 5 años de datos de la parte superior del Río del Estrecho

Se reconoce que la precipitación aumenta con la altura. Se ha estimado la siguiente relación, desarrollada a partir de datos de precipitaciones regionales (Golder, noviembre de 2005b):

Precipitación Media Anual = 0,041*Altura + 30 mm (1)

Usando la altura promedio de cada parte o sector modelado, con la ecuación (1) se ha calculado la Precipitación Media Anual (PMA) de las hoyas de la Cuenca del Estrecho (Figura 1.1a) y de las unidades hidrológicas de la hoya del Estrecho Superior (Figura 1.3). Las PMA calculadas a partir de la ecuación (1) se presentan en la Tabla 2.4 Anexo 6-1 del presente Adenda, junto con las razones entre PMA y PMA de El Indio.

Se ajustaron las razones de PMA para representar la variabilidad espacial en la acumulación de nieve, debido a los efectos de sol y viento. A continuación se describe los ajustes a las

razones de PMA para las unidades hidrológicas de la hoya del Estrecho Superior (Figura 1.3 Anexo 6-1) que se identifican como relativamente secos o húmedos.

Los sectores de glaciares representan lugares preferentes para la acumulación de nieve (Golder, noviembre de 2005c). En consecuencia, la razón calculada para el valor de PMA correspondiente al sector del glaciar se ajustó durante el desarrollo del modelo, para obtener un nivel de precipitación que concuerde con el aporte glaciar observado (Figura 2.2b) y con una pérdida de masa de hielo razonable por el período 1981-2004, considerando datos de otros glaciares regionales (Ginot et al, 2001, Escobar y Garin, 2005) y los glaciares de la cuenca vecina del Río El Toro (Golder, noviembre de 2005c).

Cabe señalar que no existen actualmente datos para uso en la elaboración de una estimación más detallada del balance hídrico del glaciar Estrecho. No obstante, el valor de PMA no influye en la simulación de los caudales que aporta el glaciar (sólo de la acumulación y pérdida de masa de hielo almacenado), por cuanto se asume que el glaciar siempre tiene hielo disponible para el derretimiento.

La Unidad de Canal Sur (Figura 1.3) está conformada de una ladera con exposición hacia el norte en donde las acumulaciones de nieve se producen en cantidades mucho menores que en otras laderas con exposición orientada hacia el sur.

La Unidad de Rajo (Figura 1.3) también consiste en una ladera con exposición hacia el norte, en donde las acumulaciones de nieve se producen en cantidades mucho menores que en otras laderas con exposición orientada hacia el sur.

La Unidad de Aguas Arriba (Figura 1.3) abarca un portezuelo ubicado en la divisora internacional, en donde la nieve se acumula en cantidades más reducidas a causa de los efectos del viento fuerte.

En consecuencia, se disminuyó la razón PMA para los casos de las Unidades de Canal Sur, Rajo y Aguas Arriba, con el fin de simular el contraste observado entre los sectores más húmedos y los más secos dentro de la cuenca. Dado que el contraste no está cuantificado, se especificó una disminución razonable, que represente un contraste, pero conservador, que asume un aporte significativo de las áreas secas (generadoras de drenajes ácidos). También se guió la especificación realizando una calibración con los caudales medidos de agua superficial y con los niveles medidos de agua subterránea. En el modelo calibrado se especificó una disminución de 1/3, como se presenta en la Tabla 2.4.

En Anexo 6-1, Sección 2.3.3 (Pág. 24) se clarifica el uso de los datos de El Indio. En las Secciones 2.3.4 y 2.3.5 (Pág. 24-25) se explica los ajustes de la razón de PMA.

6.5 Con relación a lo señalado en la Pág. 18 el titular debe respaldar e indicar la metodología utilizada para los valores dados para la Razón de PMA (ajustada), por

cuanto si bien se reconoce que pudiera existir más precipitación sobre unas ladera que en otras, estos ajusten deben tener respaldos.

Respuesta:

La metodología utilizada para los valores dados para la Razón de PMA está descrita en la Respuesta 6.4. anterior.

6.6 Se debe indicar con qué información real se calibró o validó el modelo para deshielos o fusión de nieve y hielo.

Respuesta:

El modelo de fusión se calibró a la magnitud y variación estacional de los caudales medidos, considerando los componentes de flujo basal y escurrimiento estacional. En esta cuenca tan pequeña y empinada, los caudales de fusión escurren rápidamente al río y corresponden fuertemente con los caudales medidos.

6.7 En relación con el modelo numérico se consulta al titular respecto de los criterios que se utilizaron en la definición de los tres niveles y sus profundidades, y su correspondencia con unidades hidrogeológicas presentes en el área de estudio, especialmente respecto de los niveles 1 y 2.

Respuesta:

La observación planteada por la Autoridad se explica en la Sección 3.2 del Anexo 6-1. El nivel 1 representa los sedimentos saturados, con el fondo del nivel definido por la superficie de roca indicado en los datos de perforación. La potencia del nivel 1 varía entonces desde cero hasta algunas decenas de metros. El nivel 2 representa la parte superior de la roca, que es más fracturada que la parte inferior, representado por el nivel 3. Los niveles 2 y 3 son definidos sin la especificación de potencia. Se considera una potencia nominal de los niveles 2 y 3 del orden de 50 m y 200 m, respectivamente. En estos casos la asignación de transmisibilidades de hace cargo de proporcionar flujos coherentes con los aportes subterráneos del sistema (ajustados en el proceso de calibración).

Anexo II-F

6.8 Con relación a la respuesta entregada en la Pág. 5. Se solicita al titular que se identifique con coordenadas geográficas además del nombre de todas las estaciones mencionadas o de relevancia para el estudio. Por ejemplo el punto NE-4.

Respuesta:

Las coordenadas de los puntos de monitoreo se incluyeron en el Anexo II-B-1 del Adenda N°2. Para mayor facilidad se resumen en la siguiente Tabla 6.1:

Tabla 6.1. Coordenadas de Puntos de Monitoreo

Nombre	Tipo de Monitoreo	Dato-loger	UTM Este	UTM Norte	Nivel de punto de medición de profundidad de agua subterranea (m snm)	Período de medición	No. de muestras de calidad
NE-1A	Hidrométrica	Geokon	396907	6762154	3750	2001 - 2005	37
NE-2A	Hidrométrica	Geokon	397040	6760275	3825	1981 - 2005	37
NE-4	Hidrométrica	Geokon	389672	6769819	2969	1981 - 2005	187
NE-5	Hidrométrica	Geokon	398061	6758496	3978	1996 - 2005	137
BT-1	Piezómetro		397854	6758650	3959	2000 - 2000	81
BT-3	Piezómetro		397910	6759069	3936	2000 - 2000	84
BT-4	Piezómetro		397370	6759461	3890	2000 - 2004	14
NEV-1	Piezómetro		396250	6761921	3693	1998 - 2002	13
NEV-2	Piezómetro		396041	6761987	3679	1998 - 2002	9
NEV-3	Piezómetro		395642	6761970	3662	1998 - 2004	46
RE-10P	Piezómetro	Geokon	398950	6757899	4115	2000 - 2005	
RE-10S	Piezómetro	Geokon	398950	6757899	4115	2000 - 2005	
RE-11BS	Piezómetro		398895	6757745	4111	2000 - 2001	
RE-12P	Piezómetro	Geokon	398501	6758071	4041	2000 - 2005	
RE-12S	Piezómetro	Geokon	398501	6758071	4041	2000 - 2005	
RE-13P	Piezómetro		398422	6757955	4042	2000 - 2001	1
RE-13S	Piezómetro		398422	6757955	4042	2000 - 2001	1
RE-14P	Piezómetro		398865	6757797	4103	2000 - 2001	2
RE-14S	Piezómetro		398865	6757797	4103	2000 - 2001	
RE-16	Piezómetro	Geokon	400080	6757340	4338	2000 - 2005	
RE-17P	Piezómetro	Geokon	398270	6758370	3996	2000 - 2005	
RE-17S	Piezómetro	Geokon	398270	6758370	3996	2000 - 2005	
RE-1P	Piezómetro	Geokon	400390	6757715	4371	2000 - 2005	
RE-2P	Piezómetro	Geokon	400315	6757353	4352	2000 - 2005	1
RE-3P	Piezómetro		400039	6757653	4310	2000 - 2001	1
RE-4A1S	Piezómetro		400100	6757495	4307	2000 - 2000	
RE-4A2P	Piezómetro	Geokon	400105	6757497	4307	2000 - 2005	
RE-4BS	Piezómetro		399656	6757551	4231	2000 - 2001	
RE-5P	Piezómetro	Geokon	399794	6757813	4305	2000 - 2005	1
RE-6P	Piezómetro		399840	6757320	4290	2000 - 2004	11
RE-7P	Piezómetro	Geokon	399405	6757872	4223	2000 - 2005	
RE-7S	Piezómetro	Geokon	399405	6757872	4223	2000 - 2005	
RE-8AP	Piezómetro	Geokon	399486	6757692	4199	2000 - 2005	
RE-8AS	Piezómetro	Geokon	399486	6757692	4199	2000 - 2005	
RE-9P	Piezómetro	Geokon	399324	6757430	4245	2000 - 2005	
WELL-1	Piezómetro		398911	6757788	4110	2000 - 2001	

WELL-2	Piezómetro	398487	6758007	4044	2000 - 2001
El Indio	Meteorológico	406716	6708870	3869	1981 - 2004
Pascua	Meteorológico	396355	6763845	3700	2001 - 2004
La Olla	Meteorológico	397267	6758661	3700	2000 - 2005
El Toro	Meteorológico	392653	6754823	3950	1999 - 2005
Frontera	Meteorológico	401775	6757024	4927	1999 - 2005
Lama	Meteorológico	407238	6754708	3958	2000 - 2003
Veladero	Meteorológico	413491	6746586	3860	2001 - 2002
Potrerillos	Meteorológico	410036	6747533	4200	2001 - 2003

6.9 Con relación a la respuesta entregada en la Pág. 8 en lo referido a la figura 1.1.b donde se indican estaciones de monitoreo, se solicita al titular que aclare si corresponde a monitoreo de calidad y/o de niveles, se aclare si es monitoreo de calidad y de niveles. Por otra parte, se debe indicar el período temporal al que corresponden los niveles mostrados.

Respuesta:

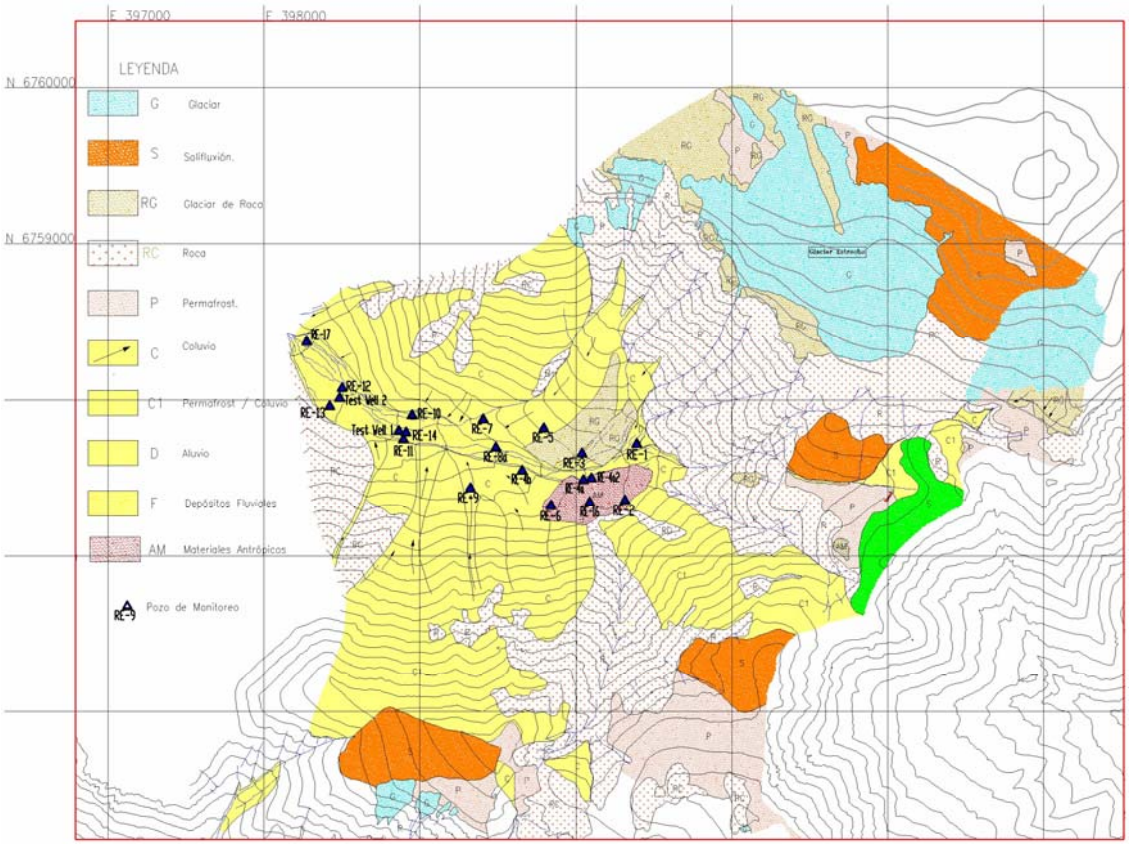
Se aclara que los datos en la Tabla 6.1 de la respuesta 6.8 corresponde a monitoreo de calidad y niveles, se especifica el tipo de monitoreo efectuado en cada estación y el período temporal al que corresponden los niveles mostrados.

6.10 Con relación a la respuesta entregada en la Pág. 9. La Figura 1.2 debe incluir los puntos de observación de niveles.

Respuesta:

En la siguiente Figura 6.6 se muestra la información solicitada sobre los puntos de observación de niveles.

Figura 6.6. Características Geomorfológicas de la Hoya Superior del Estrecho



6.11 Con relación a la respuesta entregada en la Pág. 12, el titular debe entregar toda la información de caudales medidos y que son resumidos en la tabla 2.1.

Respuesta:

En Anexo 6-3 de este Adenda se adjunta copia electrónica de los datos de caudales medidos.

6.12 Con relación a la respuesta entregada en la Pág. 13, el titular indica que estimará el caudal aportado por el glaciar, sin embargo solo se hace una comparación de los caudales de dos estaciones no entregando ningún valor.

Respuesta:

La respuesta a esta consulta está contenida en la respuesta 5.12 del presente Adenda, donde se señala que el aporte promedio anual del glaciar es de 34 l/s, incluyendo el aporte al flujo base de la cuenca alta del Río del Estrecho (flujo que se infiltra y experimenta

regulación estacional en las unidades acuíferas) y el aporte como flujo estacional que escurre superficialmente después de alcanzada la capacidad del acuífero.

6.13 Pág. 15, el titular debe entregar la ubicación con coordenadas geográficas de la estación pluviométrica El Indio. Además se afirma que esta estación representa bien el patrón de variabilidad, no entregando argumentos que sostengan dicha información, por lo que se solicita dicha información.

Respuesta:

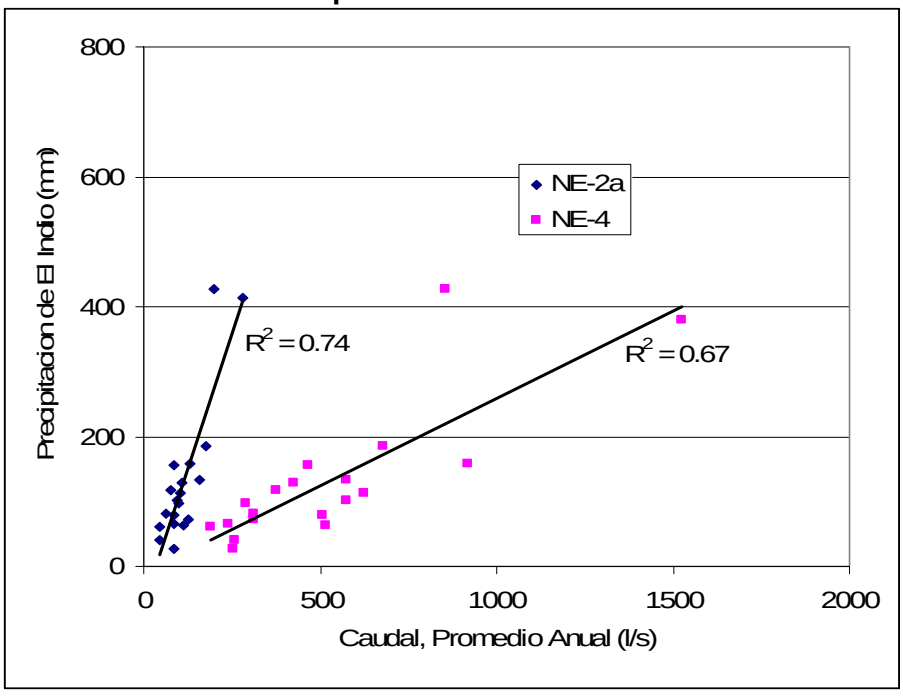
Las coordenadas UTM de la estación El Indio son: 6.708.870 N y 406.716 E, con una elevación de 3.869 msnm (ver Tabla 6.1). La representatividad de la estación El Indio se aborda en la Sección 2.3.1 del Anexo 6-1 del presente Adenda. A continuación se resumen los aspectos esenciales.

Representatividad del Registro de la Estación El Indio

Dada la corta distancia del área del estudio, y el marco andino similar, la estación de El Indio es considerada un sustituto apropiado para representar el patrón de precipitaciones en la Cuenca del Estrecho. El registro incluye tanto un período húmedo prolongado (1983-87), como uno seco (1988-1996).

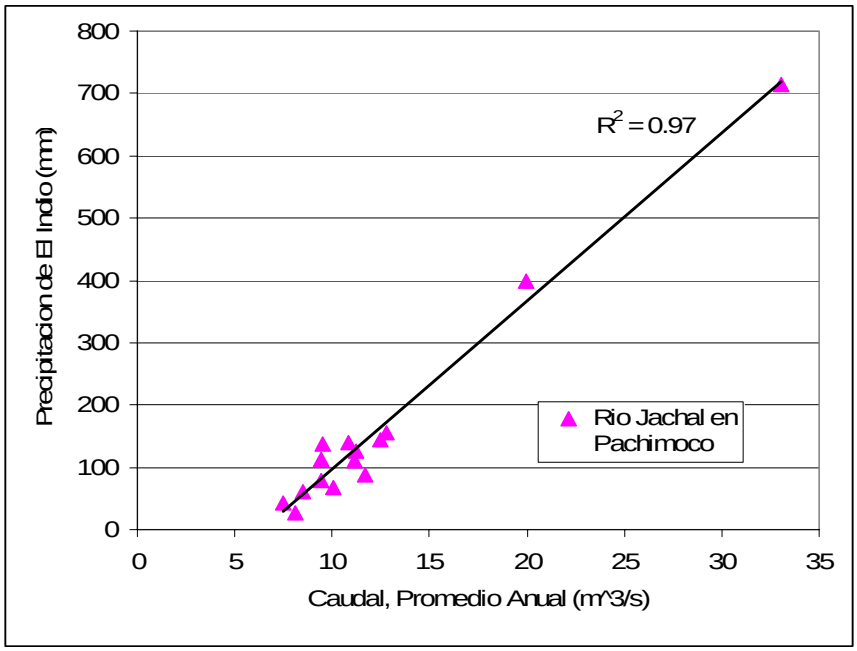
En la Figura 6.7 se presenta las correlaciones de la precipitación anual de El Indio con los caudales medidos en el Río del Estrecho.

Figura 6.7. Correlación de Precipitación Anual de El Indio con Caudal del Río del Estrecho



Además de la correlación con los caudales del Río del Estrecho, existe una correlación regional entre los caudales de agua superficial y la precipitación de la estación El Indio, reflejando la existencia de un patrón regional de precipitación. Esto se puede observar, por ejemplo, en el Balance Hídrico del Río El Toro (Jones, noviembre de 2005), que presenta buena correlación entre la historia del balance de masa del glaciar Echaurren (Escobar y Garin, 2005) y la historia de los glaciares del Río El Toro, simulada usando el registro de El Indio. Otro ejemplo de este patrón se ilustra en la Figura 6.8, donde se presenta la correlación de la precipitación de El Indio con el caudal de la estación Pachimoco, ubicada en el Río Jachal, aguas abajo del área argentina del Proyecto.

Figura 6.8. Correlación de Precipitación Anual de El Indio con Caudal del Río Jachal



6.14 Se solicita al titular que entregue la ubicación con coordenadas geográficas de la estación pluviométrica El Indio y Pascua.

Respuesta:

Las coordenadas UTM de la estación El Indio se muestran en la Tabla 1.1 del Anexo 6-1 y son las siguientes: 6.708.870 N y 406.716 E, con una elevación de 3.869 msnm. Las coordenadas UTM de la estación Pascua son: 6.763.845 N y 396.355 E, con una elevación de 3.700 msnm.

6.15 Con relación a la Figura 2.5, de la pág. 19, es posible señalar que esta no muestra el promedio mensual que se menciona en el estudio, lo cual se solicita sea corregido. Además, se pide entregar los valores el RMS y del RMSn que sustenten la afirmación

de que los datos modelados de evaporación se "comportan bien" con los datos medidos.

Respuesta:

En la ahora Figura 2.9 del Anexo 6-1 de este Adenda N°3 (Figura 2.5 en el Adenda N°2) la curva de evaporación promedio mensual se muestra como línea continua "modelo", y corresponde a una estimación basada en los datos de las diversas estaciones mostradas en la misma figura. No se puede comparar directamente los valores modelados con las mediciones de evaporación de batea, como se explica en la Pág. 20. La curva modelada representa los valores que se consideran los más representativos. En la siguiente tabla se presentan las estadísticas de RMS y RMSn, comparando el promedio de las mediciones de evaporación (excluyendo las mediciones que se consideran malas, como por ejemplo las mediciones en la Olla del verano 2003-2004):

	promedio de los datos (mm/mes)	modelo (mm/mes)	error (mm/mes)
enero	193	180	-13
febrero	161	140	-21
marzo	145	120	-25
abril	95	95	0
mayo	61	75	14
junio	84	50	-34
julio	50	50	0
agosto	58	70	12
septiembre	73	100	27
octubre	109	120	11
noviembre	145	140	-5
diciembre	158	170	12

Numero de observaciones	12
Error promedio (mm/mes)	-1.8
RMS del error (mm/mes)	17.8
RMS relativo	0.12
R2 de la correlación	0.92

6.16 En relación a la respuesta proporcionada por el titular en la Pág. 20, se solicita que e especifique la densidad de nieve considerada para transformar la profundidad de nieve en agua equivalente. Se quiere saber si se utilizó una media anual o la media mensual presentada en el Anexo de Hidrología.

Respuesta:

Los datos de precipitación nival de El Indio (profundidades mensuales de nieve) se transformaron en agua equivalente empleando la relación anual entre agua equivalente y altura de nieve de El Indio (Tabla 1-f, Apéndice 1, Anexo II-B).

En el modelo se trabaja solamente con agua equivalente, sin utilizar ninguna transformación de profundidad de nieve. A lo largo del Anexo II-B "Informe de Línea Base de Hidrología" del Adenda N° 2, la precipitación se define como la suma de lluvia y nieve, y se expresa en equivalente de agua para permitir una comparación directa entre las estaciones de distintas elevaciones y ubicaciones.

6.17 Con relación a la respuesta proporcionada por el titular en la Pág. 21, se solicita una tabla en donde se identifiquen todos los pozos de monitoreo de niveles, junto con las coordenadas geográficas. En relación a las aguas subterráneas y de acuerdo a lo presentado el titular solo ha considerado un número menor de pozos para el análisis del comportamiento del acuífero, se solicita que este análisis sea realizado con la totalidad de los pozos con información. Se solicita en forma especial revisar la redacción de los párrafos dado que no es posible identificar la idea principal de ellos, por ejemplo en el caso del último párrafo de esta página.

Respuesta:

La información de pozos de monitoreo de niveles y sus coordenadas se presenta en la Tabla 6.1 de la respuesta 6.8. El análisis presentado en las Figuras 4.2a – 4.2v del Anexo 6-1 es el resultado de todos los puntos subterráneos (22) con más de un solo dato. Los otros pozos que se presentan en las Figuras 1.1a y 1.1b son secos, no tienen datos o tienen un solo dato de nivel de agua, por lo que no se presentan los resultados. La nueva redacción de los párrafos consultados se presenta en el Anexo 6-1, Sección 2.2 de este Adenda.

6.18 Se solicita al titular que agregue una figura que compare los niveles observados en el pozo RE-4A2 con los caudales medidos en alguna estación superficial, de tal forma de respaldar la afirmación de la página 21, la cual indica que los niveles de agua subterránea varían en forma estacional siguiendo los mismos ciclos observados en el agua superficial.

Respuesta:

Cuenca Superior

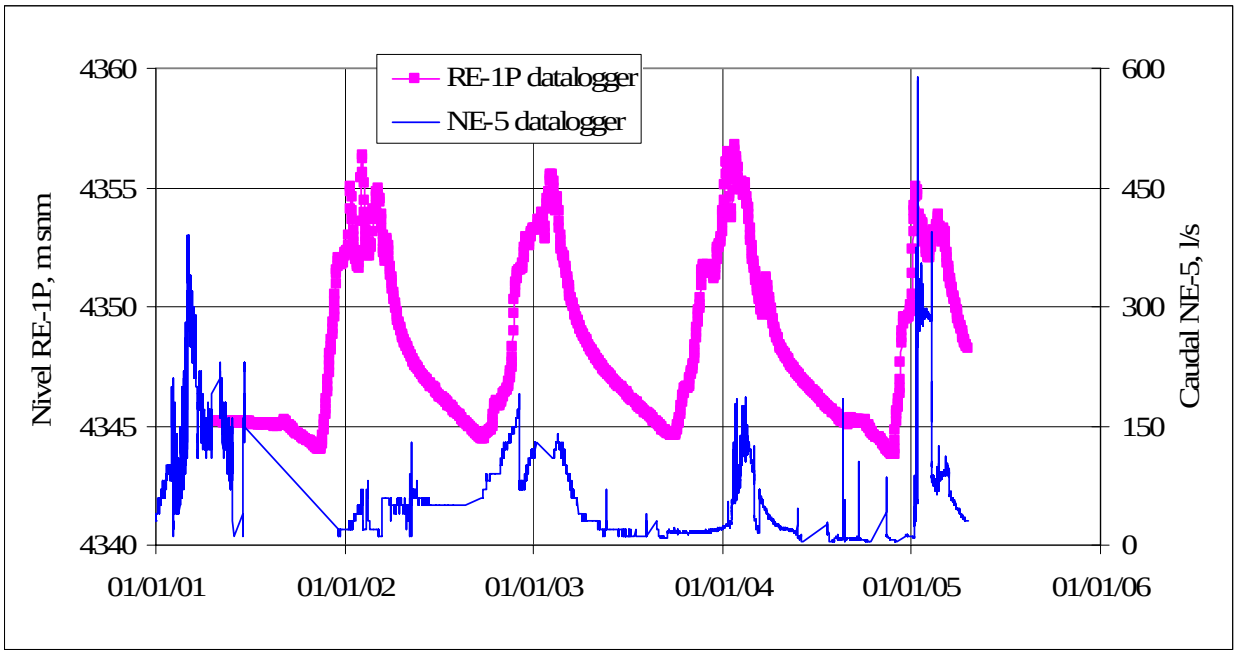
Se clarifica la afirmación utilizando los niveles observados en el pozo de monitoreo RE-1P, que ilustra el comportamiento de mejor manera que el pozo RE-4A2.

En la Figura 6.9 se presentan los niveles medidos en RE-1P con los caudales de la estación NE-5. El pozo RE-1P está ubicado en la quebrada principal de la cuenca superior del Río del

Estrecho, inmediatamente aguas abajo del glaciar (Figura 1.1b). El nivel de RE-1P indica una regulación por el deshielo glaciar; se hace notar la poca diferencia entre el año húmedo 2002-03 y los demás años (secos).

Los niveles en RE-1P empiezan a subir en octubre-noviembre, alcanzando su máximo de 4.355 m snm en enero. En los años secos los caudales de NE-5 empiezan a subir en enero, coincidente con los niveles máximos de RE-1P. Se interpreta que antes de enero, todo el deshielo glaciar infiltra al acuífero de roca fracturada de la cuenca superior. Cuando el acuífero llega a su capacidad (identificada con el nivel 4.355 m snm en RE-1P), el deshielo glaciar continúa directamente como escurrimiento superficial hacia NE-5.

Figura 6.9. Niveles de agua de RE-1P y Caudales de NE-5.



Ver la Sección 2.2.1 y la Figura 2.4 del Anexo 6-1 para mayor detalle.

6.19 Todas las figuras del Anexo del Modelo, deben incluir la grilla UTM de coordenadas de referencia.

Respuesta:

La inclusión de una grilla en coordenadas UTM se realizó en todas las figuras pertinentes del Anexo 6-1 del presente Adenda.

6.20 Con relación a la respuesta entregada en la Pág. 23 se solicita al titular que aclare a que llama pruebas de acuíferos y a qué modelo se refiere. Finalmente, se solicite al

titular que señale cual es la conclusión final en relación a las conductividades hidráulicas, según los valores en la Tabla 2.4.

Respuesta:

Las "Pruebas de acuífero" se refieren a pruebas de bombeo descritas en la Línea Base Hidrogeológico. El "modelo" se refiere al Modelo Hidrológico de la Cuenca del Estrecho, materia del informe.

Se concluye que la conductividad hidráulica presenta una alta variabilidad espacial, como se observa en la Tabla 2.2 del Anexo 6-1 de la presente Adenda N°3. La transmisividad de las unidades hidrogeológicas es más regular que la conductividad.

La conclusión final de los parámetros hidráulicos de las pruebas resumidas en la Tabla 2.2 y los demás datos, es que aguas arriba del punto NE-5 hay un acuífero con transmisividad sustantiva y que aguas abajo de NE-5 el sistema de agua subterránea tiene poca transmisividad.

6.21 La Fórmula 2, pág.25, utilizada para el cálculo del derretimiento de nieve se estima como incompleta, dado que falta considerar la influencia del viento, de la cobertura vegetal y de la temperatura de la nieve.

Respuesta:

Se utilizó una formula relativamente simplificada, que incluye los parámetros más confiables para representar el proceso de derretimiento sobre la cuenca entera. La alta variabilidad espacial del viento y de la temperatura de nieve no permite la estimación de valores representativos de toda la cuenca. Una ecuación con más parámetros tal vez podría mejorar la estimación de derretimiento en un solo punto, pero no aportaría significativamente al análisis de la cuenca entera.

Se usó el modelo de fusión para reproducir los datos y observaciones que existen. La influencia del viento se considera en las razones de PMA. La cobertura vegetal es baja a nula en el área de modelación. El modelo se estructuró de tal forma de permitir una actualización de la formula de derretimiento, cuando se disponga de más información a raíz de los monitoreos que realizará el Proyecto.

6.22 Para el cálculo del derretimiento de nieve (pág.26), se deben explicitar las fórmulas utilizadas para el cálculo de la radiación solar, albedo y temperatura del aire en función de la altura.

Respuesta:

Como se indica en la Figura 3.2, la radiación solar no varía significativamente con la altura. La temperatura se estimó en función de la altura, con disminuciones de 8,15°C por cada aumento de 1.000 m de altura. Se presentan las temperaturas promedios mensuales estimadas para cada sector de la cuenca de estudio (Tabla 3.1b). El albedo, que no es una función de altura, se ajustó dentro de un rango razonable para reproducir los patrones observados de deshielo. Todos los parámetros mensuales que se entregó al modelo se presentan en las Tablas 3.1a y 3.1b.

Tabla 3.1a. Parámetros Climáticos Modelados

Mes	Evaporación Potencial (mm/mes)	Radiación Solar (MJ/m^2/mes)	Albedo ()	Nubosidad ()
may	75	420	0.84	0.35
jun	50	320	0.84	0.35
jul	50	420	0.84	0.35
ago	70	520	0.84	0.35
sep	100	660	0.84	0.30
oct	120	780	0.84	0.25
nov	140	950	0.84	0.25
dic	170	1020	0.75	0.25
ene	180	950	0.60	0.25
feb	140	780	0.50	0.25
mar	120	730	0.66	0.25
abr	95	570	0.80	0.25
Anual	1310	8120		

Tabla 3.1b. Valores Modelados de Temperatura y Fusión Potencial

	Estrecho Superior											
	Canal Norte		Canal Sur		Rajo		Aguas Arriba		Botadero		Aguas Abajo	
	Altura (m)	5200	Altura (m)	4600	Altura (m)	5000	Altura (m)	4800	Altura (m)	4450	Altura (m)	4300
Mes	temperatura (grados C)	deshielo potencial (mm)	temperatura (grados C)	deshielo potencial (mm)	temperatura (grados C)	deshielo potencial (mm)	temperatura (grados C)	deshielo potencial (mm)	temperatura (grados C)	deshielo potencial (mm)	temperatura (grados C)	deshielo potencial (mm)
may	-10	0	-5	0	-9	0	-7	0	-4	0	-3	0
jun	-12	0	-7	0	-11	0	-9	0	-6	0	-5	0
jul	-14	0	-9	0	-13	0	-11	0	-8	0	-7	0
ago	-12	0	-7	0	-11	0	-9	0	-6	0	-5	0
sep	-10	0	-5	0	-9	0	-7	0	-4	0	-3	23
oct	-7	0	-2	134	-6	11	-4	72	-1	180	0	226
nov	-5	109	0	293	-4	170	-2	232	1	339	2	385
dic	-4	306	1	648	-3	368	-1	587	2	537	3	740
ene	-2	924	3	816	-1	986	1	754	4	1155	5	908
feb	-3	917	2	1102	-2	979	0	1040	3	1148	4	1194
mar	-5	405	0	589	-4	466	-2	528	1	636	2	682
abr	-7	0	-2	101	-6	0	-4	39	-1	147	0	193

	Estrecho Intermedio		Barriales		Estrecho Inferior		La Falda		Estrecho Inferior Extremo	
	Altura (m)	4300	Altura (m)	4550	Altura (m)	4000	Altura (m)	4200	Altura (m)	4000
Mes	temperatura (grados C)	deshielo potencial (mm)	temperatura (grados C)	deshielo potencial (mm)	temperatura (grados C)	deshielo potencial (mm)	temperatura (grados C)	deshielo potencial (mm)	temperatura (grados C)	deshielo potencial (mm)
may	-3	0	-5	0	0	0	-2	0	0	0
jun	-5	0	-7	0	-2	0	-4	0	-2	0
jul	-7	0	-9	0	-4	0	-6	0	-4	0
ago	-5	0	-7	0	-2	0	-4	0	-2	0
sep	-3	23	-5	0	0	114	-2	53	0	114
oct	0	226	-2	149	3	318	1	257	3	318
nov	2	385	0	308	5	478	3	416	5	478
dic	3	740	1	506	6	833	4	771	6	833
ene	5	908	3	1124	8	1001	6	939	8	1001
feb	4	1194	2	1117	7	1286	5	1225	7	1286
mar	2	682	0	605	5	774	3	712	5	774
abr	0	193	-2	116	3	285	1	224	3	285

6.23 Se solicita al titular que cambie el planteamiento actual de Balances Hídricos de Nieve y Glaciares, por un modelo hidrológico nival a nivel mensual que incorpore los datos de precipitaciones aportados por las estaciones El indio y Campamento Pascua y los datos de altura de nieve aportados por la estación Campamento Pascua. Luego, se solicita que compare, mediante estimadores de bondad de ajuste apropiados, la escorrentía generada por el modelo con los valores de caudales medidos en las estaciones NE-4 y NE-5, para el un período de tiempo no inferior al 1980-2004.

Respuesta:

El modelo presentado en Adenda N° 2, que es de nivel mensual, se estima suficientemente adecuado para efectos de evaluar impactos, y reproduce satisfactoriamente los datos de caudal medidos en las diversas estaciones (ver respuesta 6.1 más arriba). Se estima que el empleo de métodos alternativos no aportará resultados significativamente distintos de los presentados, para efectos de la evaluación ambiental.

6.24 Pág. 30. En relación con el modelo numérico, presentado en la pág. 30, se solicita al titular que justifique los espesores y profundidades adoptados para los tres niveles establecidos.

Respuesta:

La respuesta a esta consulta está contenida en la respuesta 6.7 de este Adenda N°3.

6.25 Se consulta si los valores de fusión de nieve y de hielo fueron calibrados previamente a ser ingresadas al modelo numérico, presentado en la pág. 30.

Respuesta:

La información disponible para la calibración del modelo de fusión es la magnitud y variación estacional de los caudales superficiales medidos en las estaciones NE-5, NE-2a y NE-4, considerando los componentes de flujo basal y escurrimiento estacional. Por tanto, estos caudales fueron calibrados a través del propio modelo numérico MODFLOW.

6.26 Pág. 41 las figuras 4.la a 4.ld no permiten comprobar lo señalado por el titular en relación a la reproducción de los caudales simulados tanto en términos de cantidad y como de oportunidad. Se deben cambiar las escalas y los colores.

Respuesta:

La respuesta a esta consulta está contenida en la respuesta 6.1 del presente Adenda N°3.

Sin perjuicio de lo anterior, en la respuesta se debería señalar sí se cambiaron las escalas y los colores de las figuras.

6.27 En relación a la reproducción de niveles de las aguas subterráneas presentada en la pág. 41, es posible señalar que si bien se ha reproducido la variabilidad temporal, no es posible afirmar lo mismo en relación a los niveles propiamente tales. Por lo anteriormente expuesto resulta necesario identificar cuales son los factores que se encuentran condicionando los niveles y trabajar sobre ellos.

Respuesta:

La respuesta a esta consulta está contenida en la respuesta 6.1 del presente Adenda N°3. A este respecto, se hace notar la significativa pendiente de la cuenca alta del Río del Estrecho, que incide en variaciones drásticas de nivel de agua subterránea en tramos relativamente cortos. Así por ejemplo, existen sectores en que la variación de nivel alcanza 10 metros en trayectos de sólo 100 metros horizontales.

6.28 Pág. 56 se debe incorporar como parte del anexo la información y metodología utilizada para la generación de los 100 años de estadística pluviométrica, además de lo relacionado con los datos de Golder.

Respuesta:

La información solicitada corresponde a una memoria de cálculo a que se hace referencia al principio de la sección 5 del Anexo 6-1 del presente Adenda. Esta memoria se adjunta en Anexo 6-2 del presente Adenda.

6.29 Pág. 58 en la figura 5.4 se indica que se entrega la distribución de caudales mensuales, sin embargo se hace necesario indicar a que mes corresponde y la razón por la cual se entregó sólo un mes. Se solicita que se entrega una Curva de Variación Estación, en un punto determinado, para distintas probabilidades de excedencia. Que relación tienen estos valores simulados con los generados con algún método hidrológico. Se solicita se entreguen las series estadísticas utilizadas para la generación de las Figuras 5.4, 5.5 y 5.6. Especial atención se debe prestar a lo indicado en el párrafo que comenta la figura 5.5, dado que se indica información que no es directa de la figura en comento, además dado ésta, es imposible, de acuerdo a lo señalado en ella, que dos caudales (135 y 740 l/s, para el caso de la estación NE5) tengan el mismo período de retorno. Se solicita sea corregida y fundamentado el análisis presentado.

Respuesta:

En las Figuras 6.10, 6.11 y 6.12 se presentan los caudales simulados por el modelo en la forma de Curvas de Variación Estacional, según lo solicitado por la Autoridad. Las figuras incluyen probabilidades de excedencia de 5%, 50%, 85% y 95%.

Figura 6.10. Curvas de Variación Estacional - Punto NE-5

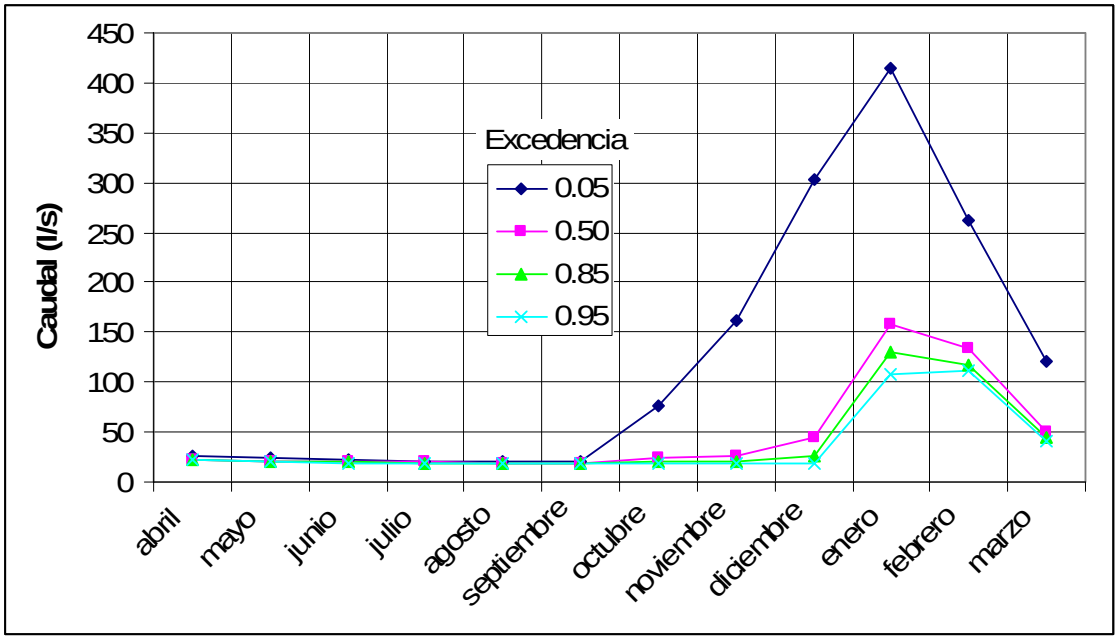


Figura 6.11. Curvas de Variación Estacional - Punto NE-2a

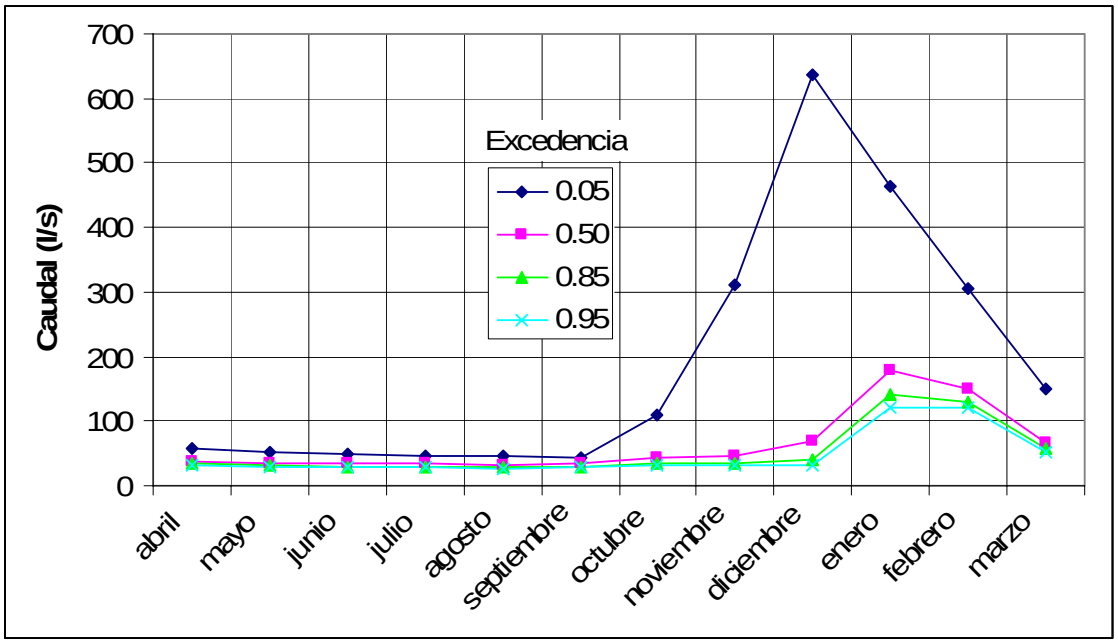
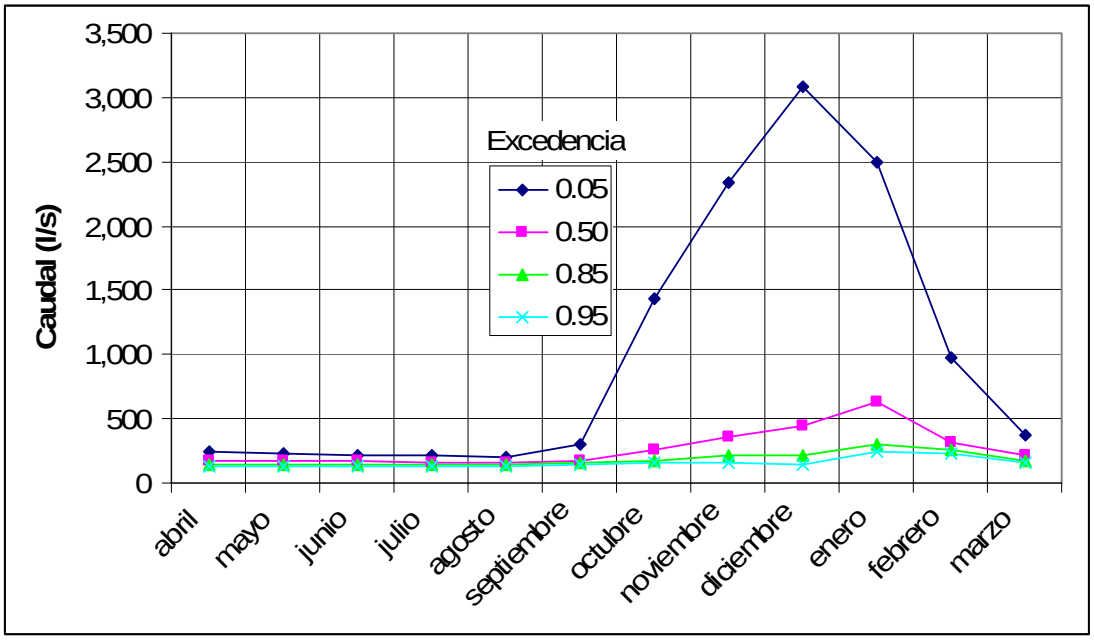


Figura 6.12. Curvas de Variación Estacional - Punto NE-4



En cuanto a la observación de la Autoridad respecto de los caudales, el valor 135 l/s corresponde al caudal promedio mensual máximo (Enero) del año más seco en 100 años, mientras el valor 740 l/s corresponde al caudal promedio mensual máximo (Enero) del año más húmedo de 100 años. Ambos tienen un período de retorno de 100 años.

6.30 Se solicita al titular que explique la procedencia de los valores entregados en el balance hídrico resumido y en el balance hídrico anual, entregado en la pág. 60, Adenda N°2.. En este punto se hace se suma importancia ligar los antecedentes presentados por el titular a lo largo del Anexo y que estos sean concordante, pues lleva a confusión, así por ejemplo:

• En el numeral 2.2 Precipitaciones, se analizó la variación de la precipitación con la altura y se determinó la precipitación media anual para cada una de las cuencas que conforman la parte alta del río El Estrecho, entregando incluso las correcciones necesarias.
• En el numeral 5 Distribución de caudales se menciona que se generó una estadística de precipitaciones mensuales de 100 años de longitud para ser utilizada en el modelo generado
• En el numeral 6.1 Balance Hídrico Resumido se entregan las precipitaciones anuales en el período 1982 a 2004; y

• Finalmente en el numeral 6.2 Balance Hídrico Anual se entrega otra serie de precipitaciones anuales en el período 1982 a 2004, no indicando si corresponde a la cuenca en su totalidad.

Respuesta:

Como se indica en la página 60, estos valores provienen del balance hídrico simulado, esto es, el modelo numérico Modflow. Se ha aumentado la descripción de las Tablas 6.1 y 6.2 en el Anexo 6-1.

- Las estimaciones de precipitación del ahora capítulo 2.3 definen una relación con los datos de precipitación de la estación El Indio, que se consideran representativos del patrón regional de precipitación.
- En el capítulo 5, la serie de precipitaciones de 100 años se basó en una extrapolación de los datos de El Indio, como se muestra en la Figura 5.1. Esta serie permite el análisis de condiciones futuras con un período de retorno de hasta 100 años.
- La precipitación que se presenta en las Tablas 6.1 y 6.2 es un resultado del modelo, incorporando las relaciones presentadas en el capítulo 2.3. Las tablas presentan la misma precipitación anual promedio de toda la cuenca superior del Estrecho. Se cambió las unidades de la Tabla 6.1, de l/s a mm/año, para clarificar.

6.31 Pág. 71, se mencionan piscinas de acumulación de una capacidad de 400.000 m3, se le indica al titular que deberá tramitar posteriormente a la obtención de la RCA los permisos sectoriales de la Dirección General de Aguas, asociados al artículo 294 del Código de Aguas.

Respuesta:

Se acoge lo solicitado por la Autoridad. CMN tiene previsto solicitar a la DGA los permisos sectoriales establecidos en el artículo 294 del Código de Aguas, que sean aplicables a las piscinas de acumulacón de drenajes del depósito de estériles Nevada Norte.

6.32 Pág. 72 se hace necesario que el titular entregue los antecedentes que sustentan los valores entregados para la disminución de caudales de estiaje en situación con y sin proyecto.

Respuesta:

En el Anexo 6-1 de este Adenda se presentan los resultados del modelo Modflow en las condiciones "sin" y "con" Proyecto, expresados como Curvas de Variación Estacional de caudales en los puntos NE-5, NE-2a y NE-4. El escenario "sin" Proyecto corresponde a la condición de línea base, sin instalaciones u obras del Proyecto que alteren los flujos de agua. Este escenario está calibrado y validado según lo descrito en la respuesta 6.1.

El escenario "con" Proyecto incluye una serie de modificaciones en las condiciones de borde, para representar los cambios que introducirán algunas obras e instalaciones del Proyecto. Dichas modificaciones incluyen lo siguiente:

- Efecto de los canales de contorno norte y sur, que desviarán los flujos provenientes del glaciar (lado norte) y escorrentía de la ladera sur. El efecto que ello produce es la interrupción de la infiltración de este flujo en la unidad acuífera, limitando significativamente la regulación que proporciona el reservorio subterráneo. En consecuencia, disminuyen los caudales de estiaje aguas abajo, y aumentan los flujos en períodos de alto caudal.

- Efecto de retención de agua producido por el depósito de estériles. Este efecto está cuantificado separadamente a través del modelo de flujo no saturado del depósito, cuyo caudal de drenaje resultante se incorpora como entrada al modelo Modflow. El efecto es una reducción del caudal aguas abajo del Proyecto por una disminución del área de recarga nival.

- Efecto de retención de agua en el rajo abierto. En el modelo se elimina el aporte que se genera en esta área para así representar el hecho que los volúmenes de agua quedarán retenidos al interior del rajo para ser consumidos y/o evaporados.

- Captación de agua en los pozos de intercepción de drenajes aguas abajo del pie del depósito de estériles. Este caudal es extraído del sistema acuífero (generando abatimientos del nivel freático, según se muestra en la Figura 7.5) y devuelto al cauce aguas abajo. Se ha supuesto un caudal de captación de 10 l/s, similar a la capacidad del acuífero.

El modelo Modflow no incorpora las captaciones de agua fresca que el Proyecto realizará para consumo industrial, según lo descrito en la sección 12 del Adenda N°2. Este consumo totalizará 42 l/s en períodos normales y húmedos, y se reducirá a 31 l/s en años secos. La definición de caudales ecológicos a respetar es materia que se abordará con la autoridad sectorial (DGA) al momento de solicitar el traslado de derechos de aprovechamiento de aguas hacia el área del Proyecto.

Por lo anterior, a las curvas de variación estacional que muestran el impacto de las obras del proyecto sobre los flujos de agua, se debe sumar la reducción de las captaciones que se efectuarán conforme a derechos. A este respecto, es importante destacar que CMN posee derechos suficientes para absorber tanto las demandas de agua industrial y potable (40 l/s y 2 l/s respectivamente), como el consumo inducido por las obras (del orden de 15 a 20 l/s en los períodos más secos).

6.33 Pág. 73 lo presentado por el titular en relación a los cambios del nivel freático deben ser respaldados, por cuanto en esta oportunidad solo se presentó el nivel del descenso no entregando los antecedentes que lo respalden.

Respuesta:

Los cambios de nivel freático presentados en la Figura 7.5 de la página 73 del Anexo II-F de Adenda N°2 (página 86 del documento actualizado que se adjunta) corresponden al resultado del modelo Modflow en la condición "con" Proyecto, es decir, aplicando las condiciones de borde modificadas según se describió en la respuesta anterior..

ANEXO II- J

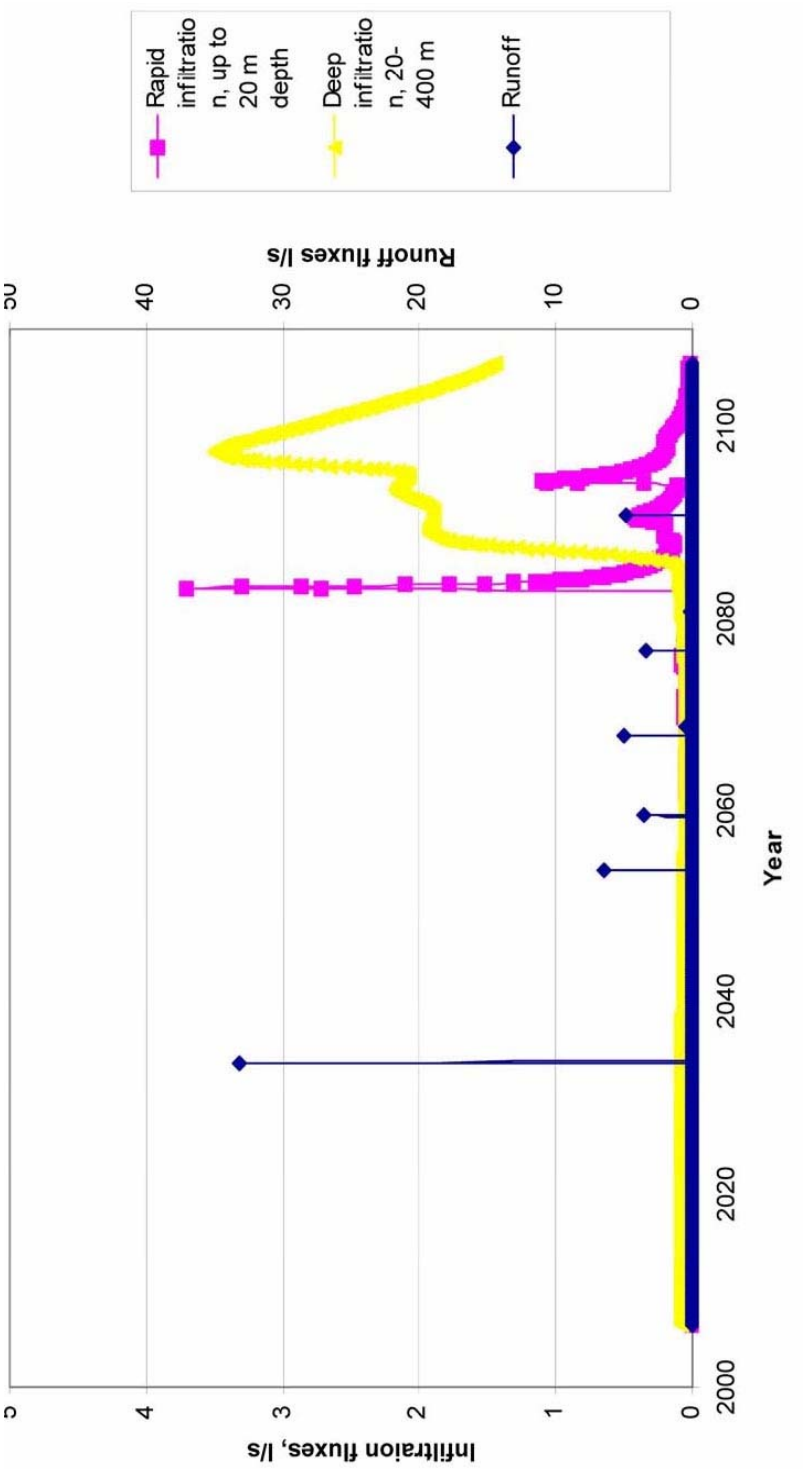
6.34 Pág. 16, punto 4.3. No se incluye la figura 4.7 donde se mostrarían los flujos pronosticados salientes de la escombrera.

Respuesta:

A continuación se presenta la figura solicitada

WATER MANAGEMENT CONSULTANTS

Figura 4.7 Flujos pronosticados para el escenario a 100 años. Las fechas se basan en un período de 100 años



7. EMBALSE DE REGULACIÓN

7.1 Con relación a la respuesta entregada en la Pág. N° 2-42; El titular concuerda con la Autoridad con respecto a que la mantención de un caudal ecológico responde a una obligación emanada de la Normativa de Aguas y no a una medida de mitigación ambiental, por lo que señala (el Titular) que aportará un fondo de 60 millones de dólares de Estados Unidos de América, como fondo compensatorio por un período de 20 años. A la Junta de Vigilancia del Río Huasco. Se consulta al Titular como responde a los déficit de recurso hidrico que podría causar el proyecto en año secos a los agricultores, se consulta ¿no será afectado también el abastecimiento de agua para beber, a través de los comités de Agua Potable Rural?, ¿que medidas de mitigación o compensación se consideran para ellos?

Respuesta:

Según el compromiso adquirido por el titular, se implementarán una serie de medidas de mitigación que permiten asegurar que no se afectará ni la cantidad ni calidad de las aguas tanto del Río del Estrecho como del Río del Carmen (ver sección 3 de este Adenda) por lo que no debería producirse déficit alguno en los recursos hídricos producto del desarrollo del Proyecto

Por otra parte, en cuanto a la compensación por potenciales impactos, el propósito de los fondos que se entregarán a la Junta de Vigilancia es la implementación de proyectos y/o programas de mejoramiento de los sistemas de riego, de mejoramiento, construcción, reparación y/o modernización de infraestructura hidráulica, de obtención de nuevas fuentes hídricas y, en general, de apoyo al desarrollo de Proyectos y/o programas que busquen lograr estos fines.

En consecuencia, la inversión de estos fondos redundará en una mayor disponibilidad de agua (especialmente en años secos) y una mejor calidad del recurso hídrico en la zona, no sólo para los agricultores, sino también para todos lo usuarios de estos recursos en la cuenca del Río Huasco, incluidos los Comité de Agua Rural.

7.2 Se le solicita la titula que el manejo de la instalación del reservorio artificial de 5.000.000 m3, este a cargo de tanto de aquellos que regulan el agua con características de riego del Valle Huasco (Junta de Vigilancia) como de los consumidores (Agua Potable Rural). (Vol. 5 Anexo 111-E Pág. 23).

Respuesta:

Según lo señalado anteriormente, tanto la entrega de los fondos para la inversión en obras de infraestructura para mejorar la disponibilidad y calidad de los recursos hídricos, como el embalse de regulación, pretenden beneficiar no sólo a los agricultores del Valle del Huasco sino que a todos los usuarios de la cuenca. En consecuencia, no pareciera ser necesario que

la administración del embalse sea compartida y se confía que la Junta de Vigilancia, en cumplimiento de sus funciones, velará por el mejor interés de todos los usuarios de las aguas.

7.3 En la página 7, sobre traslado de hielos, se menciona lo siguiente: "CMN ha comprometido el apoyo a la construcción de un embalse de agua con capacidad de regulación de 5 millones de metros cúbicos, muy superior a la necesaria para compensar una potencial reducción de caudal debido a la reubicación de los hielos en las nacientes del Río El Toro en caso que el plan de reubicación, no fuese completamente exitoso», posteriormente en la página 2-139 se indica que "CMN ha comprometido a aportar fondos necesarios para la realización de Estudios de Factibilidad, Ambientales, de Ingeniería de Diseño y otros que sean necesarios para el diseño y construcción de un embalse de capacidad mínima de regulación de cinco millones de metros cúbicos, en el sector alto del Río del Carmen. Además, CMN aportará los fondos necesarios para la construcción de este embalse. La suma máxima a desembolsar por CMN será de US$5.000.000"; por lo anterior, se solicita clarificar la propuesta compensatoria respecto a período, alcances, condiciones, y vida útil.

Respuesta:

Tal como se explica en la respuesta precedente 3.1, el titular ha comprometido la entrega de fondos para la construcción de un embalse de regulación con capacidad para 5,000,000 m3 el cual permitirá almacenar el equivalente a más de 70 años del promedio anual estimado por el Titular de la potencial pérdida en caso que la reubicación de los hielos y la acumulación de nieve no sea exitosa.

La ubicación, impacto ambiental, vida útil, alcances, eficiencia y efectividad de este embalse será analizada durante los estudios de ingeniería básica que se realizarán con posterioridad. Estos estudios se desarrollarán bajo la dirección del Directorio de la Junta de Vigilancia dentro de 1 año después que el Proyecto haya entrado en la etapa de producción.

8. AGUAS ACIDAS

8.1 En respuesta Pág. 2-29/ 2-97 / 2 -98; el Titular señala que instalará una pantalla cortafugas, entre otras medidas en un sistema redundante, que permitirán evitar la infiltración de aguas contaminadas. Se consulta si esta cortina llegara hasta la roca basal y su profundidad.

Respuesta:

Efectivamente, la pantalla cortafugas consistirá en una obra que alcanzará la roca basal. Se compone de una impermeabilización mediante geomembrana en toda la profundidad del relleno aluvial (el cual será excavado en forma de zanja para instalar la geomembrana en el talud aguas abajo), y de pozos de inyección de cemento en el estrato de roca fracturada para sellar las fisuras que pueden conducir agua. Los detalles del diseño están descritos en el Anexo II-M del Adenda N°2, donde se incluyen figuras esquemáticas del sistema de pantalla cortafugas.

8.2 En la respuesta 2.43, se menciona que el proyecto contará con la posibilidad de impulsar el drenaje tratado hacia el área de la mina para su uso industrial, como vía alternativa a la descarga al río; por lo cual, se solicita clarificar respecto a si existe el compromiso de recircular el agua hacia la mina en forma permanente o se tendrá este sistema de recirculación para situaciones en que la calidad del efluente impida su descarga al río.

Respuesta:

El compromiso de CMN es maximizar el uso de las aguas de contacto como agua industrial, y descargar al río el efluente tratado sólo en caso que la cantidad de drenaje generado supere la demanda de agua industrial en la mina e instalaciones de consumo, y no sea posible retener completamente el excedente en las piscinas. Tal como se señala en la respuesta 8.13 más adelante, el Proyecto tendrá la capacidad para dar uso industrial a los drenajes de manera permanente, en años hidrológicos secos, normales y húmedos hasta con 10% de probabilidad de excedencia.

8.3 En relación con la correlación entre los contaminantes vertidos y los mismos de manera natural se insiste en que se realice la simulación para una probabilidad de excedencia de 10%.

Respuesta:

La Respuesta 2.29 del Adenda II incluye una tabla que muestra el rango de concentraciones para los elementos requeridos en el ICSARA2 que se encontrarán en los efluentes de la planta de tratamiento del DAR bajo un rango seleccionado de escenarios de precipitación anual. La tabla también muestra el rango de concentraciones de los mismos elementos las

cuales han sido medidas en el punto de monitoreo NE-5 como parte del programa de monitoreo de línea base de calidad del agua de Pascua. Se muestra que las concentraciones de efluente anticipadas en la descarga de la planta de DAR se encuentran dentro de los rangos registrados en las aguas naturales de línea base en NE-5.

Los datos que se presentan en la Respuesta 2.29 es una sinopsis de un análisis de simulación más completo el cual se presenta en el Anexo II-K-2 del Adenda N° 2 (Predicción de la composición del efluente y lodos de la planta de tratamiento de aguas ácidas). Los datos de la Tabla 2 del Anexo II incluye calidades de efluentes para probabilidades de excedencia de 5% y 10% (equivalente a períodos de retorno húmedo de 20 años y de 10 años respectivamente). Estos datos se reproducen en la tabla abajo junto con el rango de concentraciones de línea base medidas para los mismos elementos en NE-5. Las concentraciones anticipadas de efluentes para ambos escenarios se encuentran dentro del rango de línea base.

Compuesto	D.S. No. 90/2000		Probabilidad de excedencia		Linea Base NE-5	
	Tabla 1	Tabla 2	5%	10%	Min.	Max.
Bario	0,75	3	0,002	0,003	0,001	0,28
Berilio			0,0005	0,0005	0,002	0,01
Cobalto					0,001	1,0
Litio			0,01	0,01	0,001	1,0
Plata			0,001	0,002	0,002	0,005
Vanadio			0,003	0,002	0,002	9,4

Los datos presentados se relacionan con el Año 6 de operación. Se seleccionó este año particular ya que en esta etapa la calidad del agua que entra a la planta de DAR será peor que cualquiera de las etapas posteriores de la vida de la mina. De esta manera, proporciona el indicio posible más conservador de las calidades de los efluentes provenientes de la planta de tratamiento de DAR.

La baja calidad del agua que ingresa a la planta en el Año 6 refleja una importante proporción de roca estéril "steam heated" la cual se encontrará en la Matriz de residuo general del botadero Nevada Norte para esta etapa. Como se muestra en el Anexo II-K-2 la calidad del DAR mejorará en el tiempo asociado a este escenario conservador de "vida precoz de la mina".

En la página 2.31 del Adenda N°2 (respuesta 2.5) se presenta una comparación entre las calidades del efluente tratado y la línea base en el sector NE-5, incluyendo el rango mínimo-máximo. Se observa que en todos los parámetros el efluente tratado tendrá menores concentraciones o niveles respecto de la línea base (excepto los sulfatos), por lo que su descarga al río no produciría deterioro de la calidad de las aguas. Los datos presentados se relacionan con el año 6 de operación. Se seleccionó este año particular ya que en esta etapa los drenajes que ingresen a la planta de DAR serán los de peor calidad comparada con cualquiera de las etapas posteriores de la vida de la mina, debido a la predominancia del material "steam-heated". De esta manera, proporciona el indicio posible más conservador de las calidades de los efluentes provenientes de la planta de tratamiento de DAR. Si bien el escenario de efluente mostrado en la respuesta 2.31 corresponde a un año medio (50% de excedencia), en años más húmedos la calidad del drenaje será mejor debido a un proceso natural de dilución, lo que permitirá obtener menores niveles en la planta de tratamiento.

Dado lo anterior, no se hace necesaria la simulación de dilución del efluente en el río para estimar el efecto en la calidad de las aguas. Por el contrario, dado que se obtendrá un drenaje tratado de mejor calidad que la línea base, y además se desviarán aguas de no-contacto fuera del área del Proyecto, es esperable una mejoría en la calidad de las aguas.

La excepción a lo anterior es el contenido de sulfatos en el efluente. El tratamiento en la planta HDS permitirá abatir los niveles hasta un valor de 2.000 mg/L, superior a la línea base, cuyo valor máximo es cercano a 1.500 mg/L en NE-5. Por tal motivo, en el Adenda N°2 se presentó un modelo de dilución (respuesta 2.53) que considera eventos mensuales por un período de tiempo de 100 años, es decir, cubre el escenario solicitado de 10% de excedencia (10 años). Los resultados muestran que la variación en contenidos de sulfatos en las aguas no variará significativamente debido a la descarga del efluente con 2.000 mg/L, especialmente en los puntos NE-4 y NE-8.

8.4 A lo anterior se debe agregar que el Proyecto operará un Plan de Respuesta que incorpora como parámetro de seguimiento los sulfatos (Niveles de Alerta definidos para los puntos NE-2a, NE-3, NE-4 y NE-5). En caso necesario podrá interrumpirse la descarga (si no se estuviera usando el drenaje tratado en la mina), iniciar la evaporación forzada, aplicar tratamiento complementario, etc. En cuanto a la planta de tratamiento de aguas ácidas se observa que, considerando los agentes oxidantes, reguladores y floculantes, se podría precipitar probablemente Fe(OH),

habiendo además presencia de aluminio. Se consulta por lo tanto, cuál será el tratamiento que se le dará a estos residuos, si es que lo hay.

Respuesta:

Los detalles de los procedimientos propuestos para el manejo de los lodos se resumen a continuación. El manejo de la disposición final del lodo generado por la planta de tratamiento de agua ácida del Estrecho se efectuará en concordancia directa con las especificaciones del DS 148 (Reglamento Sanitario Sobre *Manejo de Residuos Peligrosos*), el cual según el articulo 90, está caracterizado como un residuo peligroso tipo A4090, por ser residuos provenientes de soluciones ácidas o básicas, distintas de las especificadas en el apartado B2120 de la lista B del articulo 90. Por otro lado, debido a las potenciales características de estos lodos no debieran presentar características de toxicidad extrínseca cuando su eliminación pueda dar origen a una o más sustancias tóxicas crónicas en concentraciones que pongan en riesgo la salud de la población (Artículo 14 del DS 148), no obstante para demostrar esto una vez que entre en operación la planta de tratamiento del drenaje ácido, se procederá a realizar el "Test de toxicidad por lixiviación" y si èste no presentara la característica de toxicidad intrínseca, se solicitarà a la autoridad sanitaria sacarla de la lista de residuos peligrosos y manejarlos como residuos no peligrosos.

Sobre la base de la modelación geoquímica de las propiedades del lodo presentada anteriormente, se predice la generación de lodos que serán residuos no peligrosos de alta estabilidad durante la vida de la operación minera, y se recomienda la construcción de una serie de mono zanjas para la disposición final, en el sector del relleno sanitario. Esto se llevaría a cabo dependiendo de los trámites para la obtención de los permisos correspondientes y de la previa clasificación del lodo como apropiado para la contención en el sitio. Estas celdas ocuparían una sola zanja o terreno de relleno rectangular adecuado para contener un mínimo de 50.000 m^3. Este volumen excede el volumen considerado de acuerdo con las predicciones como probable de ser generado a lo largo de la vida operacional del proyecto de Pascua Lama. En caso de que al cierre de la mina se requiera la continuación post-cierre de la operación de la planta de tratamiento de agua ácida, se deberán hacer los arreglos correspondientes para el almacenamiento del lodo.

Cada celda para lodo se diseñaría con una base impermeable, y tendría una capacidad para contener un volumen máximo de alrededor de 10.000 m3. Las celdas se utilizarían y llenarían en forma secuencial y se sellarían conforme a la misma secuencia a lo largo de la vida de la mina.

Mayores detalles sobre este procedimiento se incluyen en incluyen en el Anexo II-K-2 de la Adenda Nº 2 (Predicción de la composición del efluente y lodos de la planta de tratamiento de aguas ácidas).

8.5 Se consulta al titular por las medidas que implementará en caso de obtener concentraciones de Fe2 y, principalmente Fe3, en puntos de monitoreo aguas abajo de la planta HDS, que puedan significar generación de aguas acidas.

Respuesta:

La presencia de aguas ácidas en el Río del Estrecho superior es una condición natural de la línea base, y por tanto continuará ocurriendo, reflejándose en parámetros como bajo pH, alto contenido de sulfatos y metales como Al, Cu, Mn, Zn. Además puede reflejarse naturalmente en contenidos de Fe2 y Fe3. Esto significa que la presencia de estos dos últimos parámetros en el río no representarán por sí solos una indicación de impacto del Proyecto.

Para identificar efectos en la calidad de las aguas atribuibles al Proyecto se han definido los Niveles de Alerta desarrollados en el Anexo II-E del Adenda N°2. Estos niveles representan concentraciones o contenidos de parámetros indicadores de acidez que son superados naturalmente con una determinada frecuencia promedio (cada 5 años). El Plan de Respuesta considera que si el monitoreo de calidad de aguas refleja una excedencia de estos niveles, se actuará en términos de medidas de contingencia, investigación y solución del eventual problema. El objetivo de estos procedimientos operacionales es identificar la causa de cualquier excedencia, la cual, si está asociada al sistema de tratamiento de DAR, pueda ser corregida con el fin de eliminar el impacto aguas abajo. El Anexo II – E del Adenda Nº2 proporciona detalles completos del régimen de monitoreo, niveles índice definidos y procedimientos de manejo ambiental.

El sitio de monitoreo NE-2A, el cual se ubica aguas abajo del punto de descarga de la planta de tratamiento, se usará para monitorear que el sistema de captura y tratamiento de DAR, el cual incluye los pozos de extracción, la pantalla cortafugas, la piscina de almacenamiento y la planta de tratamiento de HDS, esté operando según diseño y aprobación. La calidad del agua será monitoreada en términos de pH, conductividad, hierro total, terroso y férrico, así como otros metales disueltos.

Se han definido un conjunto de concentraciones de niveles índice de alerta temprana para ciertos parámetros, las cuales de ser excedidas en NE-2A resultará en una serie de chequeos y controles operacionales predefinidos del sistema de captura y tratamiento de DAR que se está implementando. El objetivo de estos procedimientos operacionales es identificar la causa de cualquier excedencia la cual, si está asociada al sistema de tratamiento del DAR, pueda ser corregida con el fin de eliminar el impacto aguas abajo. El Anexo II – E del Adenda Nº2 proporciona detalles completos del régimen de monitoreo, niveles índice definidos y procedimientos de manejo ambiental.

8.6 Con relación a la tabla de la respuesta 2.29, se observa que la concentración de Vanadio en el efluente de la Planta HDS, es considerablemente menor que la concentración de Línea Base en el punto NE-5, disminuyendo desde 94 a 0,005 ug/lt.

Se solicita al titular aclarar bajo que tratamiento fisico químico se obtiene dicha reducción e informar sobre el destino de los residuos que alojarían dicho metal.

Respuesta:

En el Anexo II-K-2 de la Adenda Nº 2 (Predicción de la composición del efluente y lodos de la planta de tratamiento de aguas ácidas) se presentan detalles del diseño propuesto de la planta, los cuales incluyen un diagrama de flujo del proceso. Este anexo también proporciona detalles de la metodología utilizada para predecir la calidad de los efluentes para un rango de escenarios de precipitación. En referencia específica al Vanadio, el DAR derivado del depósito de estériles al Año 6 bajo un rango de regímenes de precipitación será descargado con una concentración de vanadio que va desde los 0,002 mg/l hasta los 0,005 mg/l. Esto se compara con una concentración mediana de línea base de aproximadamente 0,005 mg/l en la estación NE-5 (basado en un total de 75 mediciones de terreno). Por lo tanto, la máxima concentración de línea base de vanadio registrada en NE-5 durante el programa de monitoreo de línea base, de 9.4 mg/l, se considera que constituye una anomalía presuntamente asociada con un error de muestreo o de laboratorio.

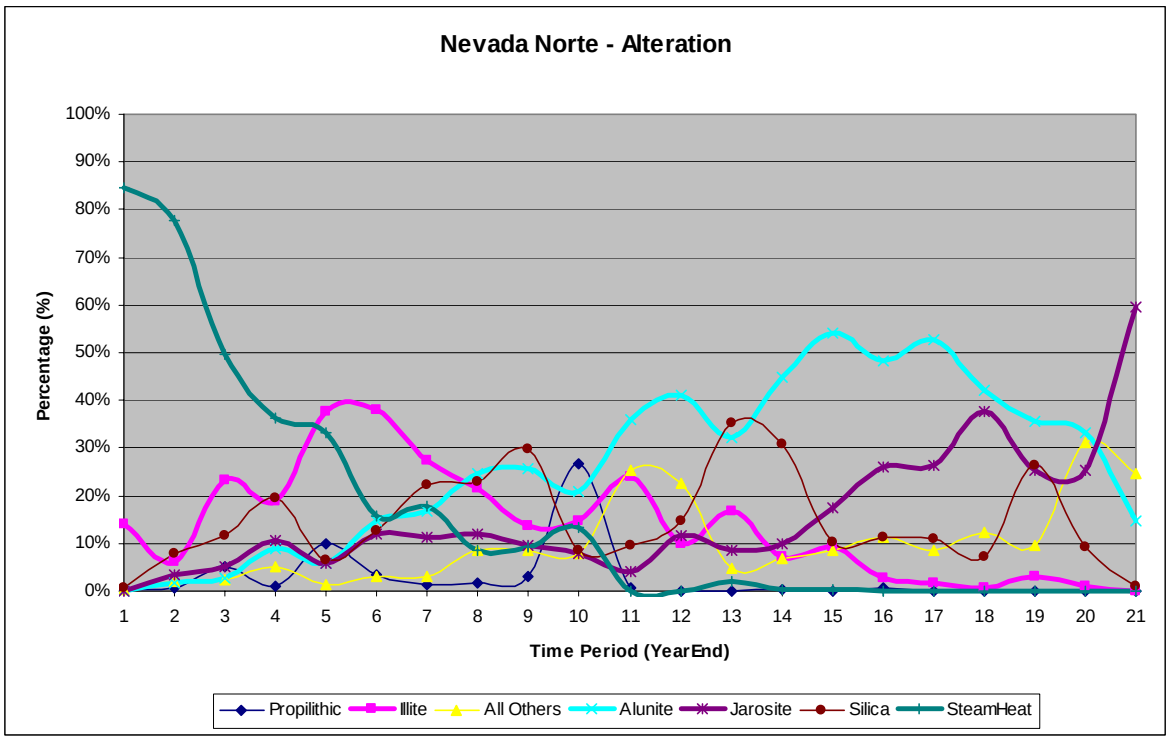
8.7 Dado el alto Ph observado en forma natural, es posible suponer una baja o nula presencia de minerales carbonatados, hidróxidos o neutralizantes en general que consuman ácido en la zona de mineralización del proyecto. Además, atendiendo a que los minerales alcalinos que pudiesen existir en las superficies lixiviadas (ganga o mena) se agotan o recubren en el tiempo, esto implicaría un aumento en la generación de DAR, por lo tanto se solicita al Titular explicar por qué a contar del año 6 mejora la calidad del afluente que ingresa a la planta HDS. Refiérase al efecto de la mineralogía en el proceso de generación de DAR en el tiempo y el comportamiento geoquímico de la roca.

Respuesta:

La química del Drenaje Ácido de Rocas (DAR) variará según el tipo de roca que lo esté generando. De este modo, ya que el material que se está depositando en el depósito de estériles Nevada Norte en un lapso de vida de 17 años va a cambiar en el tiempo, lo mismo hará la composición química del DAR que se esté generando. Con el fin de predecir estos cambios se ha llevado a cabo un programa de ensayos geoambientales, el cual incluye pruebas estáticas de lixiviación y pruebas de celdas de humedad en toda la gama de tipos de rocas que se dispondrán en el depósito. Estas pruebas caracterizan el potencial de generación de ácido de los diferentes tipos de rocas y determinan cómo cambiará la química del DAR con el tiempo. Los tipos de roca estéril en Pascua han sido agrupados en 5 ensamblajes distintos de roca-alteración-mineralización (RAM) basándose en el potencial de generación de ácido, y luego se ha calculado el porcentaje de cada uno de estos 5 ensamblajes que se está depositando en el depósito de estériles basándose en el plan minero propuesto. Después se ha llevado a cabo la modelación geoquímica para simular la

calidad del DAR para diferentes etapas de vida del depósito. Esta modelación ha mostrado que las rocas que contienen porcentajes elevados del ensamblaje RAM "steam heated" generarán DAR de la más baja calidad (mayor acidez y metales disueltos); este ensamblaje es rico en cuarzo que contiene azufre, alunita "relict" y posee poca capacidad de amortiguación o neutralización. El material "steam heated" constituye más del 40% del material estéril en los primeros 6 años de vida de la mina, luego de los cuales el porcentaje disminuirá al 12%. Esta disminución en el volumen relativo de material "steam heted" que se dispondrá en el depósito producirá una mejora paulatina en la calidad del DAR que se esté generando.

Una descripción completa de la caracterización de rocas residuos y de la modelación geoquímica del depósito de estériles se presenta en el Anexo II-I del Adenda N°2 (Modelo predictivo revisado de la geoquímica de las filtraciones para la escombrera de roca estéril Nevada Norte). A mayor abundamiento, el siguiente figura ilustra la variación (disminución) relativa que experimentará el material "steam heated" en el depósito. En cambio, el material "alunita", que presenta el mayor potencial de neutralización entre los materiales del depósito (aunque modesto en términos absolutos), aumentará su participación hacia el final de la vida de la mina.



Al inicio del sexto año de operaciones, la mayor parte del porcentaje del desecho de materiales es alunita que posee el mayor potencial neutralizador.

Al inicio del sexto año de operaciones, escencialmente no hay nuevo material "steam heated" agregado al botadero.

Consecuentemente, a comienzo del sexto año de operaciones la calidad del ARD debería empezar a mejorar para alcanzar niveles significativamente mejores después de 12 años.

8.8 Dado que la zona donde se emplazará el rajo es altamente fracturada, y que se observa una importante presencia de minerales sulfurados en la mena, el titular deberá considerar, dentro del caudal estimado en el área de captura que es enviado a las piscinas de acumulación, la infiltración de drenaje ácido producido en el rajo.

Respuesta:

El agua subterránea que será extraída de los pozos de captura incluye componentes derivados tanto del depósito de estériles como del área del rajo. La estrategia de manejo del agua en el rajo incluye el almacenamiento de las escorrentías dentro del mismo y la utilización de esta agua principalmente en supresión de polvo de caminos y uso industrial en el taller de la mina.

Se anticipa una tasa de infiltración de 1.1 l/s por el fondo del rajo, cuyos detalles se presentan en el Anexo II-I (Modelo predictivo revisado de la geoquímica de las filtraciones para la escombrera de roca estéril Nevada Norte). El modelo geoquímico y el tamaño de las piscinas de almacenamiento consideran flujos desde la cuenca alta del Río del Estrecho, incluyendo el rajo,; los caudales calculados fluctúan entre 9.22 l/s y 33.2 l/s según el período de retorno climático (ver Tabla 6.1 del Anexo II-I, Modelo predictivo revisado de la geoquímica de las filtraciones para la escombrera de roca estéril Nevada Norte). En el modelo geoquímico, a estos flujos se ha asignado una química basada en los datos de calidad de agua de línea base recolectados en esta área y que de este modo refleja la interacción agua-roca dentro de la roca fracturada presente en el área del rajo.

En síntesis, el potencial caudal de infiltración desde el rajo fluirá hacia el sistema de captura subsuperficial y subterránea que se instalará al pie del depósito de estériles, y está contabilizado dentro del flujo total de drenaje ácido a ser capturado para manejo y tratamiento.

El Anexo II-J (Modelo de balance hídrico de la escombrera de roca estéril Nevada Norte) y Anexo II-F (Modelo hidrológico de la cuenca del río Estrecho) de la Adenda Nº 2 presentan mayores detalles de cómo se determinaron estos flujos. El Anexo II-I (Modelo predictivo revisado de la geoquímica de las filtraciones para la escombrera de roca estéril Nevada

Norte) de la Adenda Nº2 proporciona detalles de la modelación geoquímica de la calidad del agua de DAR que se espera extraer en los pozos de captura y bombeada hacia las piscinas de almacenamiento previo al tratamiento.

8.9 Se consulta al titular por el eventual impacto en el Río El Toro, producido por el drenaje ácido generado en el rajo de la mina. Refiérase además a las medidas de mitigación consideradas.

Respuesta:

No se anticipa ningún efecto en la cuenca del Río El Toro a causa de drenajes ácidos, debido a que el depósito de estériles se ubicará completamente en la cuenca del Río del Estrecho, y el desarrollo del rajo abierto tendrá una geometría tal que los flujos de drenaje de nieve derretida quedarán contenidos en las depresiones que se generarán en el propio rajo. No existirán pendientes en el rajo que drenen hacia el Río El Toro.

8.10 Respecto de lo referido en la página 2.30 del vol.1 de la Adenda N°2 (respuesta 2.5), se consulta al titular por los datos de entrada utilizados en la simulación geoquimica, que permitan asegurar una calidad adecuada en el efluente del proceso de tratamiento en la planta HDS, respecto de metales y metaloides presentes en el afluente.

Respuesta:

El Anexo II-K-2 de la Adenda Nº 2 (Predicción de la composición del efluente y lodos de la planta de tratamiento de aguas ácidas) proporciona detalles de la metodología y de los datos de entrada utilizados para determinar la calidad de los efluentes de la planta de tratamiento.

En Anexo II-K-2 de la Adenda Nº 2, la modelación geoquímica del proceso de la planta de tratamiento de agua ácida se llevó a cabo considerando las composiciones del agua afluente previamente previstas por WMC como las que probablemente llegarían a los estanques de retención del sistema de manejo de agua superficial bajo numerosos escenarios climáticos diferentes y durante distintas etapas cronológicas de la vida de la mina (véase WMC 3447/R4, 2005). Bajo cualquier condición climática o etapa cronológica dada, esta agua constituye esencialmente una mezcla de:

1) La filtración proveniente de la base del botadero de roca estéril.

2) La recarga de agua subterránea no contacto que penetra en el acuífero aluvial en la zona comprendida entre la base del botadero de roca estéril y la cortina de intercepción.

La pérdida de agua por evaporación desde la superficie del estanque de almacenamiento se ajusta en las estimaciones del agua afluente (tanto con respecto al volumen como a la química).

Mayores detalles respecto a la determinación de la calidad de agua que dependerá de la planta de tratamiento también se presentan en el Anexo II-I (Modelo predictivo revisado de la geoquímica de las filtraciones para la escombrera de roca estéril Nevada Norte).

En Anexo II-I de la Adenda Nº 2, el modelo geoquímico predictivo aplicado a la geoquímica de las filtraciones para la escombrera de roca estéril Nevada Norte. Se desarrolló con el fin de simular la mezcla de cada uno de los miembros finales tanto hidrológicos como por ejemplo de la carga química. Los coeficientes de mezcla se definieron con el fin de simular las contribuciones relativas al caudal total (en la cortina de intercepción) de la descarga de la escombrera y de la recarga de agua no contactada al acuífero pendiente abajo en una diversidad de escenarios temporales y climáticos de la vida útil de la mina.

8.11 Se consulta al titular si alguna ubicación de las obras o instalaciones del proyecto en lado Argentino podrían afectar una cuenca del lado chileno. Al respecto se observa que el botadero El Morro es una fuente de DAR hacia territorio chileno y que el rajo desarrollado en el ladoArgentino podría generar DAM en la cuenca de territorio Chileno.

Respuesta:

Por la situación topográfica y condiciones geológicas y geomorfológicas, los drenajes del depósito de estériles El Morro escurrirán hacia el cauce del Arroyo Turbio en Argentina (no hacia el lado chileno). En efecto, en el área de emplazamiento de este depósito existen numerosas canalizaciones superficiales y subsuperficiales que generan drenaje aportante al Arroyo Turbio, tributario del Río de Las Taguas.

Respecto del rajo abierto, en las estimaciones de caudal de drenaje y en la determinación de las capacidades de almacenamiento para posterior uso industrial, se ha considerado que todas las aguas de derretimiento se concentrarán en sectores de depresión ubicados en el lado chileno. El desarrollo del rajo no permite un manejo diferenciado de las aguas.

8.12 Se consulta al titular por el impacto y su efecto en el Río El Toro, producido por el drenaje ácido generado en el rajo de la mina. Refiérase además a las medidas consideradas para hacerse cargo de lo anterior.

Respuesta:

No se anticipa ningún efecto en la cuenca del Río El Toro a causa de drenajes ácidos, debido a que el depósito de estériles se ubicará completamente en la cuenca del Río del

Estrecho, y el desarrollo del rajo abierto tendrá una geometría tal que los flujos de drenaje de nieve derretida quedarán contenidos en las depresiones que se generarán en el propio rajo. No existirán pendientes en el rajo que drenen hacia el Río El Toro.

8.13 Se solicita al titular que defina con que nivel de precipitaciones, en un año húmedo, se tiene estimado que el efluente de la Planta de Tratamiento de Drenaje ácido, comience a descargar al río del Estrecho.

Respuesta:

Las predicciones indican que en años hidrológicos secos, normales y húmedos hasta con probabilidad de excedencia de 10% (período de retorno de 10 años), el caudal de drenaje del depósito de estériles no superará los 19 L/s como promedio anual, que corresponde a la capacidad de la planta de tratamiento. Como la demanda de agua industrial en la mina, taller y otras instalaciones es de 31 L/s (para mayores detalles, ver Sección 12 del Adenda N°2), será posible consumir todo el drenaje y no sería necesario descargar excedentes al río. Incluso si se considera la capacidad de evaporación forzada de 9 L/s, el Proyecto dispondrá de una capacidad total de "consumo" de agua de 40 L/s.

Sin embargo, en años húmedos también se generará drenaje en el área del rajo y acopios de mineral, que deberán ser consumidos para no ser descargados, lo que requeriría proceder con la descarga del efluente tratado del sistema de manejo de drenajes del depósito de estériles. La cantidad y duración de las descargas del efluente tratado dependerá de factores como la capacidad disponible de las piscinas y el año hidrológico propiamente tal que ocurra.

En definitiva, se puede establecer que el Proyecto podrá evitar descargas al río en años hidrológicos con períodos de retorno de hasta 10 años (10% de probabilidad de excedencia). En años más húmedos, la necesidad de descargar efluentes tratados dependerá del volumen de drenaje generado no sólo en el depósito de estériles, sino también en el rajo y acopios de mineral, y de la capacidad remanente en las piscinas en ese momento.

Para mayor información, el Anexo II-K-2 de la Adenda Nº 2 (Predicción de la composición del efluente y lodos de la planta de tratamiento de aguas ácidas) proporciona detalles de los volúmenes de agua que se anticipa llegarán a las piscinas de almacenamiento (desde donde se alimentará la planta de tratamiento de drenajes) dentro de una gama de escenarios climáticos anuales. Estas predicciones han sido llevadas a cabo para eventos de precipitación con un rango de períodos de retorno, que incluye año promedio, húmedo con período de retorno de 10 años (10% excedencia), 20 años (5% excedencia) y 100 años (1% excedencia).

8.14 Si se produce la evaporación total del agua almacenada en una temporada en el sistema de Laguna de Almacenamiento (lo cual está dentro de lo posible), quedará un sedimento en el fondo que se resolubilizará con el ingreso de agua de la temporada siguiente, llevando a concentraciones cada vez más elevadas al líquido que se almacene. Por ello, se solicita que se considere realizar un procedimiento de limpieza de la laguna de almacenamiento utilizada, de tal manera de no ir eventualmente "sobre exigiendo" a la Planta de Tratamiento HDS con afluente artificialmente concentrados.

Respuesta:

Bajo la mayoría de las circunstancias operacionales, el Proyecto extraerá agua de las piscinas de almacenamiento de DAR para el uso en la mina y taller. De este modo, el agua que llegará a las piscinas de almacenamiento de DAR sólo tendrá un tiempo de residencia corto dentro en las piscinas, y la precipitación de minerales a través de procesos restringidos cinéticamente, o a través de evapoconcentración, será relativamente menor. Se anticipa que los precipitados de mineral que podrían formarse en las piscinas de almacenamiento serán de dos tipos principales: (a) óxidos férricos hidrosos y (b) sulfatos (incluyendo yeso). Luego de la precipitación, el primer tipo no será fácilmente redisuelto, aunque puede ocurrir una disolución significativa de los sulfatos. Con el fin de mantener la capacidad de almacenamiento en las piscinas y de minimizar los impactos de la disolución de precipitados en la calidad del agua dentro de ellas, se aplicarán medidas apropiadas para remover lodos de las piscinas de almacenamiento. Cualquier sedimento que se remueva de las piscinas será manipulado y almacenado en las mismas celdas de baja permeabilidad a ser construidas para el almacenamiento de los lodos de la planta de tratamiento de drenajes ácidos.

8.15 Se consulta al titular porqué no incorporó al Fósforo como parámetro a controlar en la Tabla de pag.2-33, Vol. 1, Adenda N°2, en la descarga de la Planta de Tratamiento de Aguas Servidas del Campamento. Es importante que quede establecido el valor de concentración comprometido o que sea inferior al valor de la norma.

Respuesta:

Complementando la información indicada en la Tabla de la página 2-33 del Adenda N°2, se señala que el nivel esperado de fósforo en el efluente de la planta de tratamiento de aguas servidas será de 0.001 mg/L.

8.16 En la eventualidad que la DGA no otorgue caudal de dilución para aplicar la tabla N°2, en la descarga de la planta de drenajes ácidos en el río del Estrecho, y tomando en cuenta que la Planta no puede lograra reducciones mayores de la concentración de sulfato en el efluente de 2000 mg/l (tabla N°1, indica 1000 mg/l), ¿cal será la propuesta del titular al respecto?

Respuesta:

CMN estima que el sistema diseñado para el manejo de los drenajes permite adoptar varias opciones operacionales para asegurar que la descarga se realice sólo si el río presenta un caudal de dilución, y para no descargar si el caudal del río es inferior a un valor mínimo que no garantice dilución suficiente. El principal componente para tal efecto lo constituyen las piscinas de almacenamiento con capacidad para retener 400.000 metros cúbicos de drenaje. Esta cantidad, administrada según los eventos hidrológicos, permitirá interrumpir las descargas bajo escenarios de sequía o bajo caudal en el río. Adicionalmente, durante la fase de operación los eventos de descarga al río se limitarían a períodos húmedos en que la generación de drenaje exceda los consumos de agua industrial en la mina. Por lo tanto, CMN adoptará el criterio de cumplimiento que la DGA estime pertinente para asegurar descargas con dilución.

Sin perjuicio de lo anterior, ante el escenario eventual que la DGA no otorgue caudal de dilución para aplicar la tabla N°2 del D.S. N°90/2001, el Proyecto propone incorporar en el análisis el efecto positivo que tendrán los canales de contorno sobre la calidad de las aguas. En efecto, las escorrentías generadas por derretimiento de nieve y glaciares actualmente se infiltran en el área del Proyecto y adquieren contenidos relativamente elevados de sulfatos y metales, y un pH reducido, todo ello por la mineralización del área. Este deterioro natural se vería reducido significativamente al instalar los canales de contorno, los cuales entregarían las aguas al Río del Estrecho sin el enriquecimiento de metales y sales. La descarga conjunta de los canales de contorno y la planta de tratamiento podría entonces considerarse para efectos de aplicar límites sin capacidad de dilución. Esto no implica necesariamente mezclar físicamente las aguas, sino contabilizar las respectivas cargas (caudal y concentración) mediante monitoreo y obtener un valor resultante de concentración.

8.17 Se solicita indicar al titular el período de tiempo establecido o recomendado para que quede operativa bajo el control del titular, la planta de tratamiento de drenajes y la red de monitoreo de registro continuo y telemetrizado después del cierre de la Mina. Lo anterior debido a que la lixiviación del depósito de estériles continuará existiendo aún cuando las operaciones hayan concluido.

Respuesta:

Todo el sistema de manejo y monitoreo de drenajes ácidos, incluyendo la planta de tratamiento y las estaciones de medición automatizadas continuarán operativas después del cierre del Proyecto, y serán mantenidas y reemplazadas de acuerdo a las especificaciones de los fabricantes, para asegurar así un funcionamiento adecuado en el largo plazo. La suspensión definitiva de los sistemas será requerida a la autoridad sobre la base de antecedentes que permitan concluir que los drenajes (sin tratamiento) no afectan la calidad de las aguas.

8.18 Se solicita indicar el destino del Rechazo o concentrado producido de la Planta de Osmosis Inversa.

Respuesta:

La Osmosis inversa es considerada conjuntamente con otras opciones tales como hidróxido de bario, intercambio iónico y sistemas de reducción tipo tratamiento secundario. En el caso de utilizar la tecnología de osmosos inversa, la operación de la planta sería necesaria únicamente de manera ocasional o intermitente, momento en el cual la corriente de agua de rechazo sería almacenada para su uso industrial en el área de la planta o para supresión de polvo. Es importante enfatizar que el tratamiento secundario por Osmosis Reversa (u otro método) no sería necesario durante períodos de elevado deshielo, debido a la dilución natural del sulfato en el agua que en dichas ocasionas llega a la planta de tratamiento de drenajes.

La Osmosis Inversa representa una de las tecnologías de contingencia o de tratamiento secundario cuya instalación se propone para la "limpieza" de efluentes provenientes de la planta de HDS para ser empleada estrictamente "en caso que se requiera". La inclusión de una herramienta de contingencia o de tratamiento secundario en el diseño del tratamiento general del drenaje ácido se basa en la necesidad potencial de, por un lado, contar con una descarga y tratamiento auxiliar de pequeños volúmenes de agua de contacto generada durante los períodos secos, cuando las concentraciones de sulfato en el agua que va a la planta de tratamiento tengan probabilidad de ser >2000 mg/l y , por otro lado, el requerimiento eventual de un tratamiento suplementario auxiliar del agua para asegurar la conformidad con las concentraciones de línea base de elementos como, por ejemplo, selenio.

8.19 Respecto a que el Titular asegura que la calidad del efluente de la planta de tratamiento de drenajes ácidos estará dentro de los rangos de la línea base de las aguas de la cuenca alta del río Del Estrecho, y que por lo tanto su descarga al cauce no provocará deterioro de las condiciones de línea base aguas abajo (respuesta 2.29), es necesario formular las siguientes aseveraciones:

Debe considerarse que las descargas de metales pesados no son degradados por el medio ambiente, a diferencia de los contaminantes orgánicos que lo hacen por acción de procesos microbiológicos. Además, en condiciones de pH ácido (valores de pH 3,5 y menores en el área de proyecto), los metales pesados se encuentran en estado soluble, y por lo tanto pueden viajar largas distancias antes de precipitar, acumulándose en sedimentos fluviales, lacustres o marinos. En consecuencia, estos metales tienden a acumularse en la cadena alimentaria, y causar enfermedades crónicas al ser humano. Esto se grafica clásicamente con el efecto del bebé lactante, que ilustra la paradoja que cantidades ínfimas de un contaminante en el

medio, ejercen un impacto desproporcionado sobre organismos situados en la cúspide de la pirámide ecológica.

En ese sentido, la dilusión o nivel de concentración no es un factor válido para el abatimiento de este tipo de contaminantes, y por consiguiente el concepto primordial que debe ser utilizado en el reuso y disposición final de aguas residuales es la carga total aplicada de estos contaminantes, expresada en masa, por unidad de tiempo.

Debido a que el Titular cuenta con la información de línea base de la cuenca alta del río Del Estrecho, en cuanto a concentraciones de los distintos parámetros, los caudales y sus respectivas series de tiempo, está en condiciones de poder determinar, según los diferentes escenarios hidrológicos, la carga total máxima para cada escenario, que históricamente a recibido el resto de la cuenca del Huasco desde esta subcuenca (punto NE-2), y con la cual aparentemente el valle a subsistido en equilibrio, debiendo considerarse dichas cargas totales como la calidad objetivo en la descarga de efluente de la planta de tratamiento de drenajes ácidos para mantener las condiciones de línea base aguas abajo. Este concepto de cargas máximas de acumulación es ampliamente utilizado en países de la UE, Israel, etc.

Con relación a la planta de tratamiento (respuesta 2.3 1), y a los porcentajes de eficiencia de ésta en el abatimiento de metales pesados, es dable hacer ver que dicha eficiencia es bastante relativa, de acuerdo al metal de que se trate, mostrando valores de eficacia bastante bajos, como: Selenio (4,8%), Litio (41,2%), Níquel (79,2), Bario (85,2%), Cromo (90%), Mercurio (90%), vanadio (90%), por citar algunos ejemplos. No se muestran los valores para Plata. Consecuentemente, esto es indicativo de que un pretratamiento, más un tratamiento primario y otro segundario son necesarios pero no suficientes para llegar a calidades aceptables de efluente, haciendo la salvedad de que la unidad de tratamiento complementario de osmosis reversa sólo abate salinidad; sulfatos en este caso. Al respecto se consulta al Titular por qué no se incluyeron unidades de tratamiento terciario específico para metales pesados como:intercambio de iones en columnas de resinas sintéticas, adsorción en carbón activado, o recuperación electrolítica (electrowinning). Es posible citar que otras compañías mineras en la región actualmente están utilizando la tecnología de resinas sintéticas para abatimiento de Mercurio, metal considerado particularmente tóxico por numerosos países industrializados.

En ese contexto, lo planteado en la respuesta 2.43, donde se menciona que el proyecto contará con la posibilidad de impulsar el drenaje tratado hacia el área de la mina para su uso industrial como vía alternativa a la descarga al río, toma particular relevancia y por lo tanto se solicita explicitar si lo planteado es el compromiso de recircular el agua hacia la mina en forma permanente, o si por el

contrario, el Titular asumirá este sistema de recirculación para situaciones de contingencia en que la calidad del efluente impida su descarga al río.

Respuesta:

El Anexo II-K-2 del Adenda Nº 2 (Predicción de la composición del efluente y lodos de la planta de tratamiento de aguas ácidas) proporciona detalles de la química de los efluentes de la planta de tratamiento de drenajes ácidos bajo una amplia gama de escenarios climáticos y etapas de vida de la mina. Estos datos confirman que las concentraciones de los distintos parámetros se encuentran dentro del rango natural de línea base registrado en NE-5. En términos de la carga de masa química, el tratamiento del agua hasta niveles análogos a los de línea base en NE5 realizado por la planta de tratamiento, acompañado de la desviación de agua de no-contacto en la parte superior de Río del Estrecho, se anticipa que resulte en una reducción de las cargas totales registradas en NE-5 a lo largo del ciclo de vida de la mina.

Respecto a la eficiencia relativa de la planta de tratamiento para elementos como el Se, Ni y Ba, la eficiencia de operación de la planta de HDS (es decir, el cociente entre la concentración de entrada y la concentración de salida) por lo general es dependiente de la concentración de entrada. Los "límites inferiores de concentración" que la planta de HDS puede lograr son infinitos, y comúnmente del orden de unas pocas partes por billón para la mayoría de los elementos. De esta manera, si el cociente de concentración afluente/efluente es alto, la eficiencia también resultará alta, mientras que si la concentración de los efluentes es cercana al "límite inferior de concentración" alcanzable dentro de la planta, el cálculo de la eficiencia resultará menor.

La selección del HDS como una tecnología de tratamiento primario se basó en una revisión detallada de un amplio rango de tecnologías alternativas. Este análisis mostró que el HDS proporciona el mecanismo más eficiente para la remoción simultánea de una amplia gama de contaminantes que se anticipan se encuentren en el drenaje ácido del depósito de estéril Nevada Norte, con la mayor capacidad de reducir las concentraciones de virtualmente todos estos elementos hasta alcanzar el rango de línea base. En el diseño del sistema de tratamiento se incluyen tecnologías de contingencia o de tratamiento secundario (Osmosis Inversa o un tratamiento análogo) para proporcionar una capacidad de remoción adicional de contaminantes específicos tales como sulfatos y Se, de modo de mejorar los niveles de remoción que se alcancen dentro de la planta HDS.

Anexo X-A-5

8.20 Pág. 1 se solicita al titular que indique cuales son las características del sistema GLC que sería utilizado para revestir las piscinas de tal forma de impedir las filtraciones hacia las aguas subterráneas. Al respecto el sistema de impermeabilización que se

utilice deberá garantizar la estanqueidad de las aguas ácidas y asegurar que no se producirán infiltraciones hacia las napas subterráneas.

Respuesta:

El tipo de recubrimiento y las especificaciones serán determinados en el proceso de diseño final y enviadas para revisión como parte del proceso de permisos sectoriales de la DGA. El titular ha comprometido implementar un sistema de impermeabilización para las piscinas para impedir filtraciones hacia las aguas subterráneas. Las características de diseño e ingeniería pueden ser establecidas en la RCA o más bien definidas en la etapa de permisos sectoriales.

Mayores detalles sobre este tema se incluyen en Anexo II-M del Adenda N°2, " Plan de Manejo de Aguas" (Sección 5.3.2, página 26). El texto citado identifica la necesidad de un recubrimiento de baja permeabilidad, de preferencia GCL.

8.21 Pág. 2 se debe indicar al titular que las obras de las piscinas deben contar con los permisos sectoriales de la DGA, instancia en la cual se revisará el proyecto de ingeniería de estas piscinas, y en donde se solicitará la definición del material de impermeabilización que será utilizado.

Respuesta:

Se acoge lo solicitado por la autoridad. En efecto, CMN ha requerido y presentado los antecedentes necesarios para la obtención del permiso ambiental sectorial del artículo 101 del DS 95/2001respecto de las piscinas de acumulación de drenajes ácidos. En esta instancia sectorial se definirá en detalle el material de impermeabilización que será utilizado.

8.22 Pág. 2 se menciona que se construirá un canal que tendrá por función disminuir el ingreso de agua a las piscinas, se solicite se aclare cual será el destino final de dichas aguas.

Respuesta:

Como todos los canales de desvío, incluyendo los canales de contorno norte y sur del depósito de estériles y el canal de contorno de las piscinas de acumulación de drenajes ácidos, el destino final de las aguas será un cauce natural que entregue las aguas al Río del Estrecho. El detalle del trazado del canal será presentado con ocasión del permiso ambiental sectorial respectivo.

8.23 Pág. 3 se indica al titular que la capacidad de los canales interceptores deberá ser tal que no se afecten derechos de aprovechamiento de tercero.

Respuesta:

CMN acoge lo solicitado por la autoridad. La capacidad de los canales interceptores será tal que no se afecten derechos de aprovechamiento de aguas de terceros. El diseño y capacidad de los canales será revisada en detalle por la autoridad (DGA) durante la tramitación de los permisos sectoriales pertinentes.

Sin perjuicio de lo anterior, los criterios de diseño para los canales perimetrales se abordan en el Anexo II - M del Adenda N°2, "Plan de Manejo de Aguas", sección 4.0, páginas 10-12 y se presentan en la Tabla 3-1. La capacidad hidráulica de los canales perimetrales es suficiente para manejar un evento de 1000 años de retorno, por lo que no debería haber limitaciones al transporte de caudal que afecte los derechos de aguas de los usuarios aguas abajo.

Anexo II- M

8.24 Con el fin de manejar todo el tiempo las aguas de contacto y no contacto en forma separada se solícita la construcción del canal perimetral que intercepte aguas de quebrada negra y quebrada amarilla en etapa de operación, no sólo en la etapa de cierre. Además, dicho canal debe extenderse hasta alcanzar el canal perimetral Sur, conformando de esa forma un canal por todo el perímetro del botadero de estériles.

Respuesta:

Debido a que en esta área se producirán acopios de mineral y operarán caminos mineros, no es posible extender los canales perimetrales de agua de "no-contacto" a esas quebradas. Por esta razón, es necesario considerar la escorrentía desde esta área como agua de contacto. Sin embargo, se debe notar que durante operaciones la quebrada Negra es interceptada aguas arriba de la influencia de los acopios de mineral y caminos mineros. Ver Apendice 3 de esta Adenda, Figuras 3-1 y 3-2.

8.25 Respecto al canal perimetral Sur, se solicita que este tome la configuración propuesta para el cierre desde el inicio de la etapa de operación, a fin de minimizar las áreas aportantes de recursos hídricos al depósito de estériles.

El canal perimetral sur de cierre se apoya sobre el extremo del botadero lo que impide construirlo anticipadamente sino hasta que el botadero tome su configuración final. Esta situación se ilustra en Anexo II-M, Figuras 3-1y 3.2 de Adenda N°2, que se insertan más arriba respondiendo a pregunta anterior.

8.26 Respecto a la intercepción de agua de contacto, o sea: canal de recolección de pilas de acopio de mineral; zanjas colectoras y pozos por etapa en el depósito de estériles; zanja de drenaje de pie del depósito de estériles; y zanja corta-fuga de pie del depósito de estériles, que tienen posibilidad de ser incorporadas como aguas industriales o bien destinadas a evaporación, se informa al titular que deberá solicitar derechos de aprovechamiento sobre esta agua.

Respuesta:

CMN acoge lo solicitado por la autoridad. Tal como se señaló en la respuesta 5.13 de este Adenda, se tiene previsto solicitar el traslado de derechos de agua de CMN hacia el área del Proyecto, cubriendo todos los puntos superficiales y subterráneos en que el Proyecto considera efectuar captaciones consuntivas, incluyendo la captación de drenajes ácidos. Para ello se procederá sectorialmente según la normativa vigente.

8.27 Respecto a las variables de diseño, como caudales, períodos de retorno, etc. estos son materia del permiso al que se refiere el artículo 171 y 294 del código de aguas en sus aspectos no Ambientales, por lo tanto será esa instancia quien determine lo adecuado de los diseños aquí presentados.

Respuesta:

CMN acoge lo solicitado por la autoridad. Se tiene previsto solicitar a la DGA los permisos sectoriales correspondientes a los artículos 171 y 294 del Código de Aguas para autorizar las modificaciones de cauce y las piscinas de acumulación de drenajes ácidos. En estas instancias sectoriales se presentarán los diseños detallados y memorias de cálculo conforme a las pautas y estándares de la DGA.

ANEXO X-A-1

8.28 Pág. 4, de lo presentado por el titular se desprende que no existe certeza que la planta de tratamiento de drenajes ácidos o aguas de contacto, como lo llamó el titular será construida, se solicita se aclare este tema.

Respuesta:

CMN aclara que el sistema de manejo de drenajes ácidos, incluida la planta de tratamiento, será construido y puesto en operación al inicio del Proyecto, de modo de asegurar el adecuado manejo de los drenajes del depósito de estéril en cuanto comience la disposición de material en él.

9. FLORA Y FAUNA

9.1 ***Se señala que los cambios antrópicos generados en el río pueden atentar contra los flujos de materia orgánica, alterando la sustentabilidad de los ecosistemas y aumentando su vulnerabilidad (Vol. 5 Anexo II-N, Pág. 14). Se declara también, que existe una correlación positiva entre la existencia N03 y HCO3 y la abundancia de algunas taxas, sumado a la concentración de macro elementos y metales pesados como iones S04, Mg, Si, B, Cl etc. (Anexo II-N Pág. 76). Así mismo, en la Pág. 75 del mismo anexo, se define que las predicciones para la abundancia de fauna fitobentónicas estaría dada la morfología, turbidez y cota del río. Finalmente en la Pág. 80 del Anexo II-N se manifiesta que entre la vegetación terrestre y los ecosistemas acuáticos existe un acoplamiento unidireccional, donde la fauna de invertebrados acuáticos depende de los aporte de materia orgánica de la flora terrestre.***

En conformidad con lo anterior, se le consulta al titular cómo se espera mitigar el cambio en el aporte hídrico de los glaciares "reservorios", las características mineralógicas del agua y en su aporte de material vital para el ecosistema, y en especial para ictiofauna (pejerrey del norte y otros) (Vol. 5 Anexo 1I-N Pág. 72), dado el impacto sobre el permafrost que se ubica bajo el diseño del botadero, los glaciares "reservorios" y la alteración de 0.8 há. de vegas, dada la implementación del campamento Barriales.

Respuesta:

Puesto que el impacto del proyecto sobre los bofedales andinos es absolutamente marginal y que no se espera un cambio en la dinámica del ciclo de nutrientes y su aporte al curso del Río del Estecho, sumado a que se ha implementado un plan para el tratamiento de las aguas ácidas provenientes de la parte alta de la cuenca, no es razonable esperar efectos sobre la calidad del agua que pudiesen afectar la dinámica del ecosistema dulceacuícola del río. Sin embargo, la productividad de los bofedales andinos puede verse directamente afectada por el pastoreo con ganado (ver informes de monitoreo de Flora y Fauna en el área de estudio, Squeo et al. 2005 y anteriores). Se propone como medida compensatoria que ayudará a mejorar la productividad de los bodefedales : a) la exclusión de pastoreo en los bofedales del área de operaciones del proyecto definitivo según requerido por el SAG bajo el Protocolo Específico del Proyecto Pascua Lama, b) implementar un monitoreo hidrobiológico del Río del Estrecho.

Debido a la reubicación de los hielos, existirá un efecto insignificante en el flujo de corriente en la cuenca El Toro (detalle explicado en respuestas a Adenda 2 Anexo II-H-2.. y esta Adenda 3 Sección 2.3). El hielo reubicado será colocado sobre los remanentes del Toro 1, de modo que se espera que éste, junto con las barreras de nieve que se instalarán, eleven la acumulación de nieve, que es el principal contribuidor para el flujo de corriente.

Consecuentemente, se mantendrá como "reservorio", y potencialmente mejorado, de futuros recursos hidráulicos en la cuenca El Toro.

No existirá efecto en el flujo de escorrentía de la cuenca del Río Estrecho como resultado de la reubicación del hielo, puesto que estos glaciares están localizados sobre la cuenca El Toro. El glaciar Guanaco, en la cuenca El Toro, no se ve afectado. En el caso de la cuenca El Estrecho, todos los flujos del Glaciar El Estrecho son interceptadas y dirigidas al rio El Estrecho, aguas abajo del sistema de corta muros del drenaje ácido, por lo que no hay efecto en el flujo desde este glaciar (ver explicación en detalle en el Adenda 2, Anexo II - M).

Existe una pequeña contribución durante los meses de término del verano, con respecto al flujo, de la capa activa de las areas de permafrost (ver explicación en el Adenda 2 Anexo 6-1 y en esta Adenda 3 Sección 2.F). Tipicamente se encuentra permafrost discontinuo entre 4200 y 4800 metros amsl, y de manera bastante contínua sobre los 4800 metros amsl. La cima del botadero previsto para Pascua-Lama está a 4750 metros, lo que significa que éste estará dentro de la zona de permafrost discontinuo. Además, al estar ubicado predominantemente hacia el costado norte de la cuenca, con pared en pendiente, la falta de luz natural y las bajas temperaturas no son propicias para el derretimiento. El botadero, en su forma final, cubrirá aproximadamente 317 hectáreas. En forma conservadora se estima que la zona discontinua es de 20 % de permafrost con una capa "activa" de aproximadamente 2-4 mts. Y entre 2-5 % según muestreos tomados en terreno recientemente de humedad representa no más de 40.000 m3 de hielo (1,2 l/s promedio anual) equivalente a menos que la mitad del derretimiento anual. Adenda 3 Anexo 2.1.D.

Dentro el perímetro del futuro botadero Nevada Norte, existe una pequeña geoforma que tiene un pequeño frente escarpado, y una superficie hummocky. Es como un pequeño glaciar de roca, pero, dentro de la literatura técnica, corresponde a un pro-talus rampart (protalus) de modestas dimensiones. La experiencia en otras operaciones mineras en climas fríos indica que el hielo contenido en la fundación del Botadero Nevada Norte no se derretirá. BGC Engineering Inc en su memorando "Rock Glacier Hydrology Work Plan" con fecha del 18 de Octubre, 2005 (Anexo III-F Adenda 2 del EIA) consideró un 90% de contenido de hielo como caso extremo, y para el escenario conservador, con un impacto en el glaciar de roca, se modeló el deshielo del protalus en un período de 50 años. BGC estimó la máxima tasa de infiltración asociada en solamente 0,12 l/s. Se han confirmado las dimensiones del glaciar de roca en un área de solo 2 hectáreas y aproximademente 170.000m3, con un contenido de 2-5 %hielo, Adenda 3 Anexo 2.1.D.

Squeo FA, G. Arancio, D. López y D. Espinoza (2005) Monitoreo y actualización de línea de base de recursos bióticos Proyecto Pascua-Lama: Flora y vegetación. Universidad de La Serena.

Ver Respuesta Adenda 3, Sección 3.1 en relacion a cómo se espera mitigar el cambio en el aporte hídrico de los glaciares "reservorios" El plan de reubicación de glaciares pretende preservar la zona de hielos descubirtos con el proposito de mantener inalterada la contribución hidrica a las cuencas.

Ver Respuesta Adenda 3 , Sección 2.1 F ; Ref al impacto sobre el permafrost que se ubica bajo el diseño del botadero. Como se indica en la respuesta 2.1.F.b de Adenda 3, no hay impacto porque el Permafrost y la capa activa puede reformarse en forma constante alrededor de la mina.

En relación a las características mineralógicas del agua y su aporte de material vital para el ecosistema, y en especial para ictiofauna (pejerrey del norte y otros) (Vol. 5 Anexo 1I-N Pág. 72): El impacto del proyecto sobre los bofedales andinos es de míinima influencia, ya que no se espera un cambio en la dinámica del ciclo de nutrientes y en su aporte al curso del Río del Estecho. Lo anterior, sumado a que se ha implementado un plan para el tratamiento de una posible generación de aguas ácidas provenientes de la botadero de esteriles en la parte alta de la cuenca, no se esperan efectos sobre la calidad del agua que pudiesen afectar la dinámica del ecosistema dulceacuícola del río, en especial para ictiofauna (pejerrey del norte **y otros)**.

En relacion a campamento Barriales: En el pasado, durante la construcción del Campamento Barriales, se afectó marginalmente una pequeña porción del borde más seco de este humedal (i.e., 0,2 ha, ver tambien respuesta 9.3). La política de la empresa es asegurar la no intervención de los bofedales andinos a través de una protección efectiva. La ampliación del Campamento Barriales ocupará el área existente sin intervención hacia el costado del humedal (ver Fig. 9.1 y 9.3).

Como medida preventiva se propone implementar un monitoreo hidrobiológico del Río del Estrecho. Anexo Proyecto de Investigación **"Dinámica de corto y largo plazo de los bofedales en el Proyecto Pascua – Lama: Implicaciones para su manejo"**

9.2 Se le solicita al titular aclarar porque se espera que las acciones descritas en el Vol. 1 Flora y Fauna, sección 6, Pág. 6-8.no alteren las condiciones de la fauna acuática, ya que como señala el Vol. 5 Anexo II-N Pág. 23, las vegas realizan un aporte de gran importancia en carbono orgánico, además de justificar que no habrá enriquecimiento orgánico e inorgánico del río del Estrecho en la situación con proyecto.

Respuesta:

Las acciones aludidas por la autoridad no alterarán las condiciones de la fauna acuática, debido a que, en la situación con proyecto, no hay previsto ningún efecto significativo sobre las vegas andinas, de modo que no se espera un cambio en el régimen de aporte de

carbono orgánico al Río del Estrecho. No obstante lo anterior, como medida preventiva se propone implementar un monitoreo hidrobiológico del Río Estrecho.

En síntesis, el Proyecto no modificará la calidad de línea base por drenajes ácidos (inorgánico); tratará las aguas servidas (orgánico); no tendrá lixiviados de relleno sanitario; etc. Esto será verificado mediante el monitoreo. (Ver detalle en Vol. 1, respuesta 2.5 del Adenda 2, pág. 2-29 a 2-33, y en respuesta 2.6, pág. 2-34 a 2-36).

9.3 Respecto del humedal ubicado en el sector del campamento Barriales se requiere que el titular analice los efectos del proyecto sobre él, y proponga las medidas para su adecuada conservación. Se considera que los antecedentes existentes respecto de los humedales son insuficientes para dimensionar y comprender de mejor manera la importancia del humedal y su posible deterioro e impactos en él. En este mismo sentido se solicita, respecto de los compromisos adquiridos por la empresa, un esquema de cómo serían las construcciones respetando los humedales tal como se señala y un catastro de la vegetación asociada a vegas y humedales que permita comparar posibles efectos en la situación con proyecto.

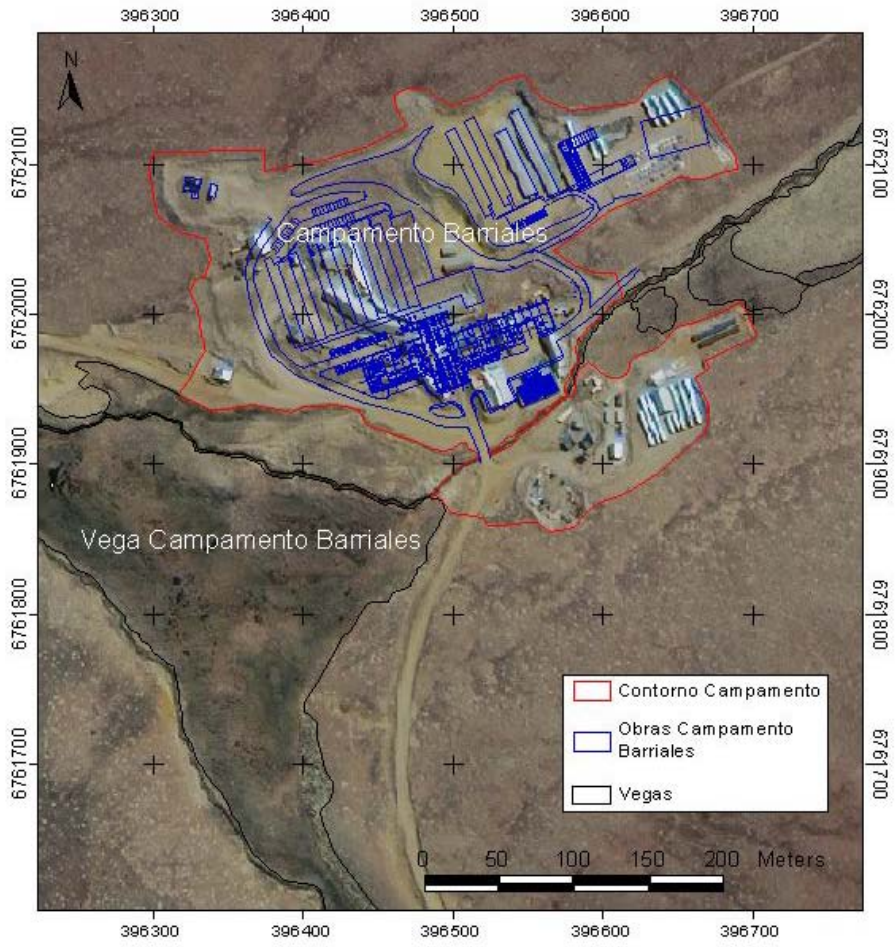
Respuesta:

El bofedal del campamento Barriales es uno de los humedales que han sido monitoreados anualmente desde hace algunos años. Su composición florística y productividad (producción de materia seca) ha sido informada anualmente a la Conama (ver informes de monitoreo de Flora y Fauna en el área de estudio, Squeo et al. 2005 y anteriores). Este plan de monitoreo de flora y fauna continuará en el futuro como medida para su adecuada conservación y permitirá analizar los efectos del proyecto en él. Adicionalmente, la Universidad de La Serena a través del Centro de Estudios Avanzados en Zonas Áridas (CEAZA) y la Universidad de Waterloo (Canadá), están realizado estudios sobre la dinámica pasada y actual de estos bofedales andinos, incluyendo estudio paleoecológicos, fuentes de agua utilizadas por los bofedales, evaluacion geoquimica, productividad y biodiversidad (Squeo et al., enviado), los que entregarán nuevos antecedentes sobre el funcionamiento de estos humedales, tendientes a su conservación. El Bofedal del campamento Barriales es uno de los sitios que están siendo estudiados como parte del proyecto anteriormente descrito (ver anexo Proyecto de Investigación “Dinámica de corto y largo plazo de los bofedales en el Proyecto Pascua – Lama: Implicaciones para su manejo”. Además, en forma específica para el bodedal del campamento Barriales, las medidas propuestas por la empresa están dirigidas a evitar nuevas intervenciones sobre el humedal. En el pasado, durante la construcción del Campamento Barriales, se afectó marginalmente una pequeña porción del borde más seco de este humedal (i.e., 0,2 ha)(ver explicación y fig. 9.3). La política de la empresa es asegurar la no intervención de los bofedales andinos a través de una protección efectiva. En cuanto a la petición de un esquema de construcciones respetando humedales, se adjunta una figura 9.1 en que se observa que la ampliación del Campamento Barriales no será hacia el costado del humedal, respetándolo.

Squeo F.A., B.G. Warner, R. Aravena & D. Espinoza. Bofedales: High Altitude Peatlands of the Central Andes. Revista Chilena de Historia Natural: enviado.

Figura 9.1 Contorno del Campamento Barriales.

Ver tambien figura 9.3 con las 0.2 has. intervenidas



9.4 Se solicita que se justifique la afirmación de que las vegas se sustentan de aportes hídricos difusos provenientes de la cuenca intermedia.

Respuesta:

Esta afirmación está basada en el uso de isótopos ambientales que son parte de la molécula de agua. Esta herramienta entrega informacion sobre el origen y tiempo de residencia del agua (ver Squeo & Ehleringer 2004). Estudios preliminares realizados por las universidades de

La Serena y de Waterloo, muestran que las señales isotópicas de las aguas que sostienen los bofedales andinos difieren de las del agua del río, y son consistentes con un aporte hídrico local (cuenca intermedia), más que regional (parte alta de la cuenca). La composición isotópica del agua en la parte alta de la Cuenca es muy diferente de la señal isotópica del agua en las Cuencas más bajas. Por otra parte, la composición isotópica del agua de río se va enriqueciendo aguas abajo, con el aporte de las aguas de las cuencas más bajas. El antecedente de que la calidad físico-química del agua mejora (por ejemplo, que el pH cambia paulatinamente de ácido a neutro), también es consistente con los datos isotópicos, y puede ser explicado en gran parte por una dilución del agua del río proveniente de la parte alta, con aportes de aguas de la parte media de la cuenca. La continuación de estos estudios contempla, entre otros aspectos, cuantificar con mayor exactitud las fuentes de agua utilizadas por los bofedales andinos y estudiar la evolución geoquímica del agua en dos cuencas (del Estrecho y Tres Quebradas). El estudio geoquimico entregara informacion sobre los procesos que controlan la química del agua dentro del bofedal.

Squeo F.A. y J.R. Ehleringer. 2004. Isótopos estables: una herramienta común para la ecofisiología vegetal y animal. En: Cabrera HM (ed) Fisiología Ecológica en Plantas: Mecanismos y Respuestas a Estrés en los Ecosistemas: 59 - 80. Ediciones Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Valparaíso, Chile.

9.5 Se solícita al titular que reanalice los resultados de la línea base, presentados en la Tabla 1, ya que se subestimó la abundancia de organismos bentónicos y planctónicos. Esto se debe a que la abundancia fue expresada como porcentaje del total de individuos de todas las estaciones, siendo lo adecuado expresar la abundancia respecto de cada estación en particular. Por lo tanto, se solicita complementar los resultados de la línea base con los actualizados en Julio de 2005, ya que corresponden a períodos estacionales diferentes, entrenado una visión más integrada de la limnología.

Respuesta:

Se reanalizaron los resultados de la línea base en la forma propuesta por la autoridad, y los resultados son presentados en las Tablas 1 a 3 que se insertan a continuación:

Tabla 1. Abundancias relativas del plancton, expresadas como porcentaje de los individuos colectados en cada estación.

TAXA / ESTACIONES	3	5	6	7	8	R1- 1	R1- 2	R1- 3	R1- 4	R2	R3	R4	R5	R6
Nematoda	1.72	0.20	0.00	1.48	0.00	0.00	1.53	11.06	0.24	2.30	4.76	0.00	0.00	33.33
Turbellaria	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	4.76	0.00	0.00	0.00
Annelida, Polychaeta	0.09	0.40	0.00	9.63	13.04	1.10	0.00	0.00	7.20	3.45	9.52	14.29	0.00	33.33
Annelida, Oligochaeta	0.00	0.20	25.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Ostracoda	0.43	0.00	0.00	0.74	0.00	0.00	0.00	0.00	0.16	3.45	0.00	4.76	12.50	0.00
Amphipoda, *Hialella* sp.	0.00	1.41	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Cladocera, Chidoridae spp.	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	10.18	22.82	0.00	0.00	0.00	12.50	0.00
Cladocera, *Alona pulchella*	0.00	1.21	0.00	0.00	0.00	86.59	86.24	36.28	69.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Cladocera, *Euryhalona* sp.	33.25	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Cladoc., Macrothrichidae, *Macrothrix* sp.	36.51	67.94	0.00	0.00	0.00	10.26	11.31	5.75	0.57	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Cladocera, Daphnidae, *Ceriodaphnia* sp.	11.28	1.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Copepoda, Copepoditos	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.70	0.00	0.00	0.00	0.00	4.76	0.00	0.00	0.00
Copepoda, Cyclopoidea	14.64	24.60	50.00	11.85	54.35	0.70	0.00	36.73	0.00	58.62	47.62	0.00	12.50	0.00
Copepoda, Calanoidea	0.00	1.01	0.00	0.00	0.00	0.65	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Copepoda, Larvas nauplii	0.00	1.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Chelicerata, Araneae	1.98	0.20	25.00	0.74	10.87	0.00	0.00	0.00	0.00	9.20	28.57	4.76	50.00	33.33
Chelicerata, Acarina, Trombidiformes	0.09	0.81	0.00	0.74	2.17	0.00	0.92	0.00	0.00	3.45	0.00	0.00	12.50	0.00
Chelicerata, Acarina, Oribatidae	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	3.45	0.00	0.00	0.00	0.00
Chelicerata, Acarina, Prostigmata	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	4.76	0.00	0.00
Larvas de Insecta, Collembola	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	6.90	0.00	0.00	0.00	0.00
Larvas de Insecta, Collemb.,	0.00	0.00	0.00	2.22	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.15	0.00	0.00	0.00	0.00

Poduridae														
Larvas de Insecta, Collemb., Isotomidae	0.00	0.00	0.00	0.74	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Larvas de Insecta, Ephemeroptera	0.00	0.00	0.00	8.89	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	4.76	0.00	0.00
Larvas de Insecta, Thysanop., Thripidae	0.00	0.00	0.00	2.96	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	4.76	0.00	0.00
Larvas de Insecta, Hemiptera	0.00	0.00	0.00	2.22	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	4.76	0.00	0.00
Larvas de Insecta, Homoptera	0.00	0.00	0.00	0.74	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Larvas de Insecta, Homoptera, Psyllidae	0.00	0.00	0.00	2.22	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Larvas de Insecta, Homopt., Cicadellidae	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.15	0.00	0.00	0.00	0.00
Larvas de Insecta, Coleoptera	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	4.76	0.00	0.00
Larvas de Insecta, Trichoptera	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.15	0.00	0.00	0.00	0.00
Larvas de Insecta, Lepidoptera	0.00	0.00	0.00	0.74	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Larvas de Insecta, Diptera	0.00	0.00	0.00	28.15	17.39	0.00	0.00	0.00	0.00	5.75	0.00	33.33	0.00	0.00
Larvas de Insecta, Diptera, Empididae	0.00	0.00	0.00	0.74	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Larvas de Insecta, Dipter., Cecidomyidae	0.00	0.00	0.00	2.22	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Larvas de Insecta, Diptera, Sciaridae	0.00	0.00	0.00	2.22	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Larvas de Ins., Dipt., Ceratopogonidae	0.00	0.00	0.00	0.00	2.17	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Larvas de Insecta, Diptera, Simuliidae	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	14.29	0.00	0.00
Larvas de Insecta, Hyme.., Chalcidoidea	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	4.76	0.00	0.00
Huevos de peces	0.00	0.00	0.00	20.74	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Tabla 2. Abundancias relativas del bentos de deriva, como porcentaje de individuos colectados en cada estación.

TAXA / ESTACIONES	1	2	3	4	5	6	7	8	R1	R2	R3	R4	R5	R6
Nematodo	0.00	0.00	100.0	0.00	0.00	40.07	0.00	0.00	0.00	1.71	0.00	0.00	0.00	0.00
Turbellaria	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	3.01	0.00	0.00
Annelida, Oligochaeta	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	3.45	0.00	3.01	0.00	0.00
Larvas de Ins., Ephem., Baetidae	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	29.41	0.00	0.00	21.42	0.00	0.00	0.00
Larvas de Ins., Ephem., Caenidae	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	8.61	28.64	0.00	0.00	0.00
Larvas de Ins., Ephem., Ephemeridae	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	31.06	0.00	45.46	0.00	0.00
Larvas de Ins., Ephem., Leptophlebiidae	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	36.39	0.00	0.00
Larvas de Ins., Ephem., Palingeniidae	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	83.37	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	66.86	0.00
Larvas de Insecta, Coleoptera, Elmidae	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	5.51	11.78	0.00	0.00	7.10	0.00	0.00	0.00
Larvas de Ins.,Trichop., Hydropsychidae	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	5.16	7.10	6.07	0.00	66.86
Larvas de Ins.,Trichop., Limnephilidae	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	16.57	0.00
Larvas de Ins., Diptera spp.	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.71	0.00	0.00	0.00	0.00
Larvas de Ins., Dipt.,	0.00	100.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	5.84	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Ceratopogonidae														
Larvas de Ins., Diptera, Chironomidae	0.00	0.00	0.00	83.43	0.00	59.93	11.12	47.13	0.00	48.29	14.32	6.07	0.00	33.14
Larvas de Ins., Diptera, Empididae	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	5.84	0.00	0.00	14.32	0.00	0.00	0.00
Larvas de Ins., Diptera, Simuliidae	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	16.57	0.00
Larvas de Ins., Diptera, Tabanidae	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	7.10	0.00	0.00	0.00
Larvas de Ins., Diptera, Tipulidae	0.00	0.00	0.00	16.57	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Tabla 3. Abundancias relativas del bentos local, como porcentaje de individuos obtenidos en cada estación.

TAXA / ESTACIONES	1	2	3	4	5	6	7	8	R1	R2	R3	R4	R5	R6
Hirudinea	0.00	0.00	25.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Turbellaria	0.00	0.00	0.00	0.00	9.21	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	21.25	5.71	0.00	0.00
Annelida, Oligochaeta	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.25	11.43	0.00	0.00
Ostracoda	0.00	0.00	25.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Amphipoda, *Hyalella* sp.	0.00	0.00	0.00	0.00	18.42	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Larvas de Ins., Ephem., Baetidae	0.00	0.00	0.00	100.00	32.89	0.00	0.00	53.85	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	25.00
Larvas de Ins., Ephem., Caenidae	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	3.75	0.00	0.00	0.00
Larvas de Ins., Ephem., Ephemeridae	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	81.82	26.25	37.14	0.00	0.00
Larvas de Ins., Ephem.,	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	22.86	0.00	0.00

Leptophlebiidae														
Larvas de Ins., Odonata, Gomphidae	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	5.56
Larvas de Ins.,Trichop., Hydropsychidae	0.00	0.00	0.00	0.00	14.47	0.00	0.00	7.69	0.00	12.12	0.00	0.00	0.00	33.33
Larvas de Ins., Trichop., Hydroptylidae	0.00	0.00	0.00	0.00	11.84	0.00	0.00	23.08	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Larvas de Ins., Trichop., Leptoceridae	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	5.71	0.00	0.00
Larvas de Ins., Trichop., Limnephilidae	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	17.14	0.00	8.33
Larvas de Ins., Trichop., Molanidae	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	41.25	0.00	0.00	0.00
Larvas de Ins., Diptera, Chironomidae	0.00	0.00	50.00	0.00	13.16	0.00	100.00	15.38	100.00	0.00	0.00	0.00	100.00	27.78
Larvas de Ins., Diptera, Simuliidae	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	6.25	0.00	0.00	0.00
Larvas de Ins., Diptera, Tipulidae	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	6.06	0.00	0.00	0.00	0.00

9.6 En el Plan de Monitoreo Limnológico se propone realizar un análisis de la dieta consumida, lo que implica sacrificio de los individuos. Lo anterior no es aceptable por cuanto la especie se encuentra en Peligro de extinción, por lo tanto, el análisis debe limitarse a otros atributos poblacionales.

Respuesta:

Se acoje la solicitud de la autoridad. Se emplearán otros atributos poblacionales a concordar con la autoridad.

9.7 Respecto del Plan de Monitoreo de Calidad de Aguas se solicita que el titular efectúe la auditoria externa anualmente y no cada dos años como se propone.

Respuesta:

Se propone agregar un monitoreo hidrobiológico anual en el Río Estrecho. A diferencia del monitoreo de calidad del agua, el seguimiento de especies dulceaquícola indicadoras de alteración puede entregar una medida integrada de la calidad del agua y otras condiciones del río (ver Anexo Monitoreo Hidrobiológico del proyecto Pascua-Lama: desarrollo de un sistema basado en los macro invertebrados bentónicos como complemeto a las mediciones físicas-químicas).

El titular posee monitoreos frecuentes incluidos automáticamente con reportes en línea, validación mensual por parte de la Junta de Vigilancia, reportes regulares con las Autoridades relevantes, auditoría interna anual y otra auditoría interna independiente semestral. El titular considera estas medidas como suficientes, sin embargo aceptamos la solicitud de la autoridad y estamos dispuestos a que se efectúe una auditoría anual externa por parte de las Autoridades.

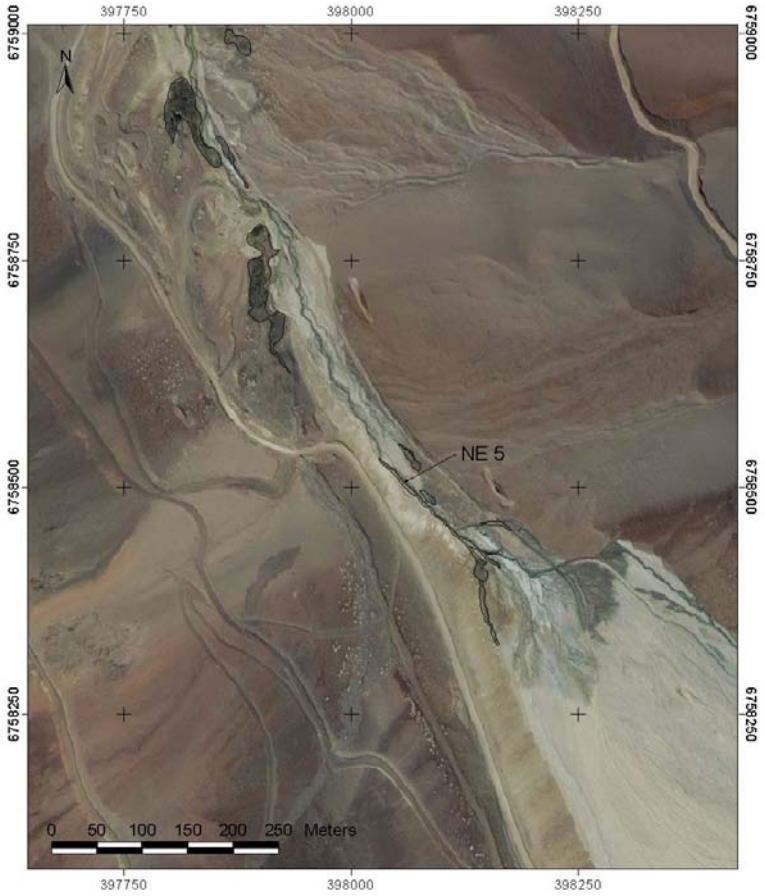
9.8 Se solicita que se realice un seguimiento al comportamiento de la napa subterránea, expresada esta en profundidad respecto a la superficie del suelo, y no a altitud como se plantea en los diferentes gráficos, lo que adquiere real importancia en sectores con vegetación. Se indican importantes disminuciones del nivel de la napa subterránea al norte del punto NE5. Al respecto se consulta que acciones se implementarán en el caso de afectar negativamente las vegas del sector.

Respuesta:

Se acepta solicitud de la autoridad. De hecho, la incorporación del seguimiento del comportamiento de la napa subterránea de la caja del Río en términos de profundidad a la superficie del suelo, fue propuesto también en Adenda 2, Anexo II-C, plano 3-2.. Con el mismo plano referido es posible hacer el analisis deseado, dado que contiene elevación de superficie para los pozos y nivel de agua subterranea. La predicción de reducción de la

napa en la caja del Río del Estecho en el sector de NE5, se relaciona con la interrupción del flujo desde la parte alta de la cuenca del Río del Estecho. En el sector de NE 5 existen pequeñas vegas (ver Fig. 9.8) que, según el modelo, se encuentran en la zona de reducción de la napa freática de la caja del Río. Se monitoreará el nivel freático dentro de algunas de estas vegas. Aún cuando no se esperan efectos sobre estas vegas, el monitoreo y protección de las vegas por el titular puede ser considerada una medida compensatoria. Ver adicionalmente, las medidas de mitigación y compensación en secion 9.15.

Figura 9.2.- Pequeñas vegas ubicadas en sector de NE 5.



9.9 De acuerdo a lo expresado en Pág. 50 Vol. 5 Anexo I1-N, existe una especies que posiblemente se encuentre en estos ambientes de bofedales llamada Gentianella coquimbensis que esta catalogada según su estado de conservación como vulnerable y que no ha sido lo debidamente estudiada en el área de influencia directa del proyecto (Vol. 1 sección 6 sobre Flora y Fauna); por consiguiente se le solicita al titular realizar estudios acucioso sobre esta materia dado su valor reconocido a nivel nacional.

Respuesta:

Una pequeña población de la especie *Gentianella coquimbesis* se encuentra en una vega del Piso Sub-Andino (UTM 392.449 – 6.764.708), la cual fue informada en en primer EIA de 1994. Esta población se encuentra fuera del área de influencia del proyecto, en una vega alimentada con aguas provenientes de la ladera exposición Este, distante 5 km aguas abajo del Campamento de Barriales. Material de esta especie fue colectado en 1994 (número de colecta 94186) y está depositado en los Herbarios de la Universidad de La Serena (Nº ULS Nº 4.482) y de la Universidad de Concepción (Nº CONC 129.214). Sin embargo, esta especie no está presente dentro del área de influencia del proyecto, que en el caso de las vegas, corresponden al Piso Andino Inferior. Se acepta realizar estudios dentro la programa mencionado de la Universidad de La Serena a través del Centro de Estudios Avanzados en Zonas Áridas (CEAZA) y la Universidad de Waterloo (Canadá). La Base de datos de la Flora de la III Región indica otras dos colectas de esta especie en el sector de Laguna Grande (Qda. Vizcachas 28º44' S – 69º50'O, 3200 msnm y Qda. Marancel 28º44'S – 69º51'O, 3100 msnm).

9.10 Se le solicita la titular aclarar respecto a lo señala en el Vol. 5 Anexo II-O, Pág. 3 donde expresa que el sector propuesto para la infiltración es capaz de sustentar llaretas en su superficie (factor para determinar la vulnerabilidad del acuífero), dado que cómo se ha expresado reiteradas veces esta es una especie catalogada con un estado de conservación vulnerable a nivel nacional, lo que implica que debe ser removida en caso de afectaciones y sus semillas manejadas.

Respuesta:

Se procede a aclarar lo solicitado: La especie *Azorella madreporica* (llareta) no está incluida en el listado de especies con problemas de conservación. Efectivamente la *A. madreporica*, como otras especies del Piso Andino Inferior, posee un sistema radicular profundo. Ese antecedente llevó al consultor que preparó el Anexo II-O, Vol. 5 (Pág. 3) a inferir que hay flujos sub-superficiales de agua (o humedad en profundidad).

En el caso del área de estudio de infiltración, no se intervino ninguna área de llaretas, y no se contempla ninguna infiltración en el futuro. Fue solamente un comentario sobre las potenciales capacidades de infiltración en el área estudiada. En las respuestas al ICSARA 2

se indicó que no es posible transplantar a esta especie y que la mejor medida de manejo era reducir al mínimo los impactos sobre estas poblaciones. Se propone hacer un estudio específico sobre la ecología y biología reproductiva de esta especie, para establecer su estado de conservación.

9.11 Respuesta Pág. 2-29, el Titular señala que junto con el sistema de captación de aguas ácidas, se instalarán piscinas de 400.000 m3 de capacidad para su tratamiento y su devolución al cauce. Se consulta, que sistema de protección se instalará para evitar que la Fauna, principalmente aves, beban esta agua de ellas.

Respuesta:

La mantención del hábitat de los bofedales andinos, que incluyen varias lagunitas que son utilizadas por el ganso andino y otras especies de aves, tendrá efectos en disuadir la visita de aves a las piscinas. Sin embargo, en el diseño del sistema de captacion y tratamiento de aguas ácidas se consideran medidas para evitar la entrada de animales, particularmente aves. Se contemplan sistemas como boyas flotantes, cañon de ruido u otros dependiendo de la necesidad.

9.12 De acuerdo a la información presentada por el titular (Pg 6-1), en relación a la especie A. madreporica, que a pesar de que no esté incluida en el listado nacional de especies en categoría de conservación (Benoit, 1989), es necesario un estudio del comportamiento y de asociación con otras especies del sector, más completo de esta especie, en el área de influencia del proyecto ya que presenta características como se mencionan, de hábito de crecimiento y tiempos de crecimiento muy lento, donde se estiman que las propuestas de re- vegetación son inviables. Por estas razones es que se necesita más información ya que la superficie que se afectará directamente con esta especie es de 15 ha, superficie significativa para este tipo de vegetación, en donde los porcentajes de coberturas son bajos. Respecto de esta misma especie se propone al titular, considerar dentro de las medidas de mitigación, la realización de estudios que permitan conocer la forma de propagación de la especie con cuyos resultados iniciar acciones de recuperación del área intervenida.

Respuesta:

Se acepta la proposición de la autoridad: Se propone hacer un estudio específico sobre la ecología y biología reproductiva de esta especie, que incluirá las formas de propagación. Uno de los objetivos de este estudio, en el mediano plazo, es la identificación de una superficie significativa para intentar realizar acciones de restauración.

9.13 El titular deberá tener presente que de acuerdo al artículo 5 de la Ley de Bosques (D.S.N°4363 de 1931) se establece la prohibición de cortar arboles y arbustos nativos situado a menos de 400 metros sobre los manantiales, no en los manantilaes, como establece el titular. Además, según la escala de la lámina N°2 expuesta por el titular,

las obras proyectadas sobre la formación vegetal de Azorella mandreporica, estarían incluidas dentro de los 400 metros que establece la Ley. Por ello se solicita que se aclare el manejo de esta especie.

Respuesta:

Sin perjuicio de tener presente lo señalado por la autoridad, es preciso agregar que aún cuando se sostiene que las vegas son alimentadas primariamente por aguas superficiales y que la formación azorella madrepórica tiene una cobertura de arbustos bajos ligeramente mayor que el 10% en estas áreas, se estima que no se aplicaría el art. 5° inciso 1° de la ley de bosques (Decreto 4363 de 1931), puesto que ninguna de las obras se encuentra cerca de los lugares en las vegas donde surge agua subsuperficial (los que podrían ser considerados manantiales).

Se evaluó en detalle la distancia de las obras ubicadas sobre las vegas. En particular el Campamento Barriales está localizado en la vertiente opuesta a la vega del Campamento (ver Fig. 9.3); una situación semejante ocurre con ls piscinas del Sistema de tratamiento de las aguas de contacto (ver Fig. 9.3) . Algunos caminos existentes están a menor distancia del borde de estas vegas, pero no se preveen nuevas construccciones a menores distancias.

9.14 Se le consulta al titular, que existe poca claridad en la tabla 6-2 de esta sección, al presentar las relaciones del total de hectáreas intervenidas (de piso vegetacional Andino Inferior) con respecto al hectareaje total de la cuenca, ya que en cierta medida, por las condiciones ambientales de estos sectores, el % de cobertura es bajo. Por lo mismo no se podría comparar la superficie total de la cuenca con la superficie total de intervención. Se solicita acotar más las áreas a evaluar por la condición de las especies que habitan en estos sectores. Estos valores a pesar de ser bajos pueden presentar un gran valor para estos ecosistemas.

Respuesta:

En la tabla 6.2 de la Adenda 2 se presentó una estimación de la superficie potencialmente afectadas por el proyecto. En la siguiente respuesta (9.15) se aclara más este punto. Los valores de superficies fueron expresados en hectáreas. Con la nueva foto interpretación sobre imagen íconos 2005, se mantiene el valor informado en las respuestas al Icsara 2, respecto a una superficie afectada en el pasado de 0,2 ha. del borde más seco de la vega de Campamento Barriales (ver fig. 9.3). La cobertura vegetal de la vega de Campamento Barriales es del 95%. No se preveen nuevos impactos sobre esta u otras vegas.

9.15 En la pg 6-10 de esta sección Flora y Fauna, se menciona de posibles superficies de vegas a afectar según algunas obras, mientras que en párrafos contiguos se enumeran superficies ya afectadas, por caminos, campamento sistemas de tratamiento de drenaje ácido-ducto. Se pide mayor coherencia en sus respuestas; ya

están afectadas ó serán afectadas. En el caso que ya se hayan afectado, que medidas se proponen para mitigar esta situación, de acuerdo al gran valor biológico que presentan estos humedales donde ellas aportan el material particulado (carbono orgánico) que sustenta la fauna de invertebrados acuáticos presentes en el río, además de mantener una biodiversidad única, como se menciona en el mismo Adenda N°2 Vol N°5 Anexo II-N Recurso Hídrico. No se hace mención de la más mínima mitigación y/ó compensación para estas 0.8 ha de vegas, sólo se describe una caracterización muy específica de ellas y nada más. Al respeto se solicita al titular que proponga medidas de mitigación, reparación y/o compensación que sean pertinentes.

Respuesta:

Actualmente, en la respuesta de la Adenda 2, se distingue entre las superficies afectadas en el pasado (Campamento Barriales = 0,2 ha, ver Fig. 9.3), el área de influencia de caminos existentes usando un buffer de 10 m a cada lado del camino (0,5 ha que finalmente no han sido ni serán intervenidas) y las nuevas superficies que potencialmente se afectarían (Sistema de Manejo de Drenaje Ácido – Ducto= 0,1 ha, usando un buffer de 5 m a ambos lados de la tubería). En este último caso, el diseño del sistema de conducción de las aguas de contacto se ha mejorado evitando la intervención de vegas andinas (i.e., en área buffer de este ducto se sobrepone marginalmente a un par de pequeñas vegas en 0,007 ha, las que no serán intervenidas; ver Fig 9.1).

Las medidas de mitigación y compensación que se proponen son: 1) Monitoreo y protección efectiva del total de vegas andinas existentes en el área del proyecto, incluyendo las vegas en las cuencas de Río Tres Quebradas y Potrerillos, 2) un área de protección ambiental en la cuenca del Estero Barriales, 3) Realizar estudios para la recuperación de la superficie de vegas o traslados de la superficie a afectar.

Fig. 9.3. Se muestra una imagen del satélite Ikono de abril de 2005 del sector de Campamento Barriales y la vega adyacente. En rojo muestra una superficie de 0,2 ha del borde seco de la vega que fue alterado durante la construcción original del campamento. Este sector corresponde principalmente al borde de la plataforma actual del camino y no es posible revertir la alteración.

Fig. 9.3

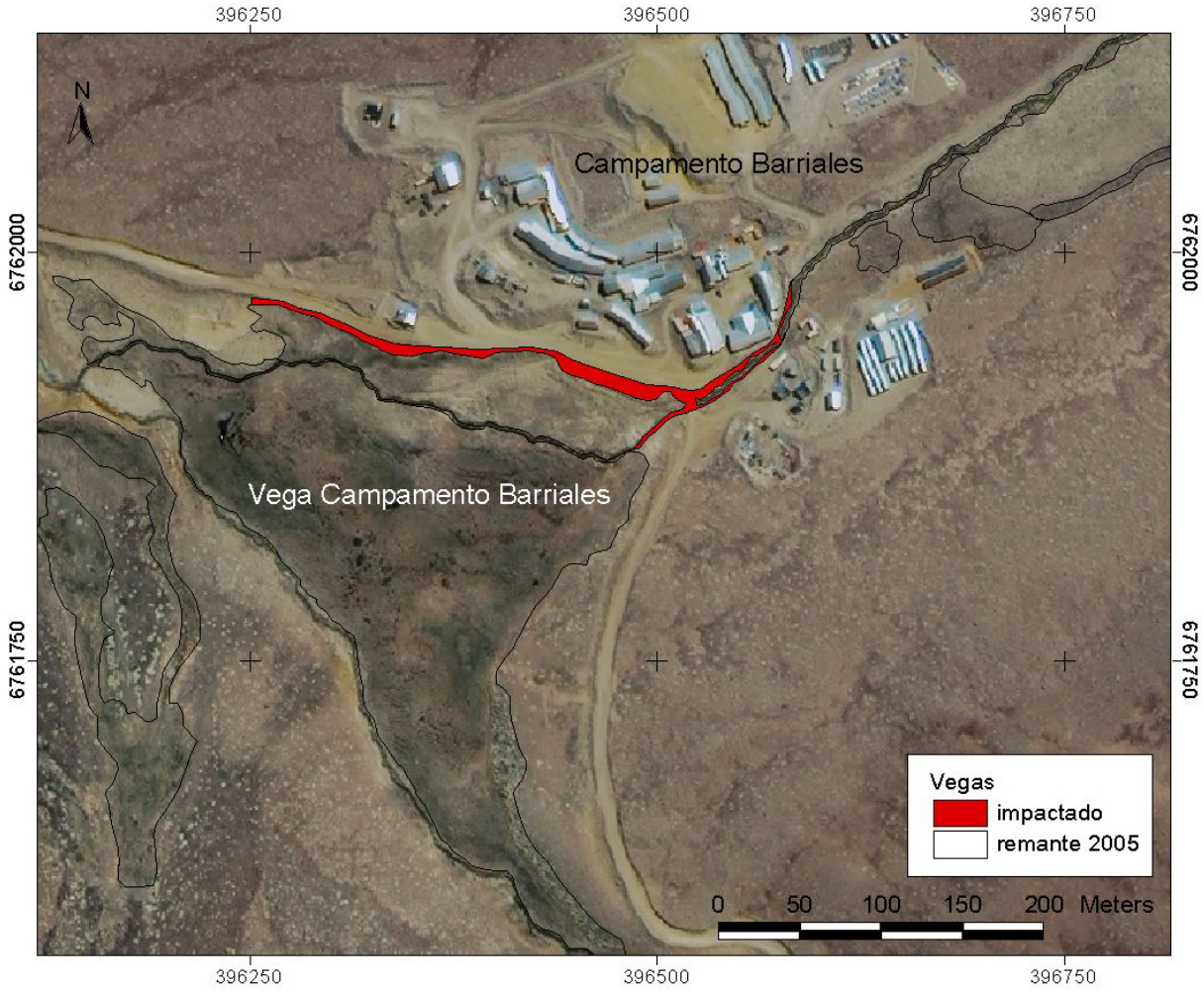

396250
396500
396750
N
Campamento Barriales
6762000
Vega Campamento Barriales
6761750
Vegas
impactado
remante 2005
0 50 100 150 200 Meters

Figura 9.4. Vegas en el sector de las Piscinas de tratamiento de aguas de contacto (en NE 2a).

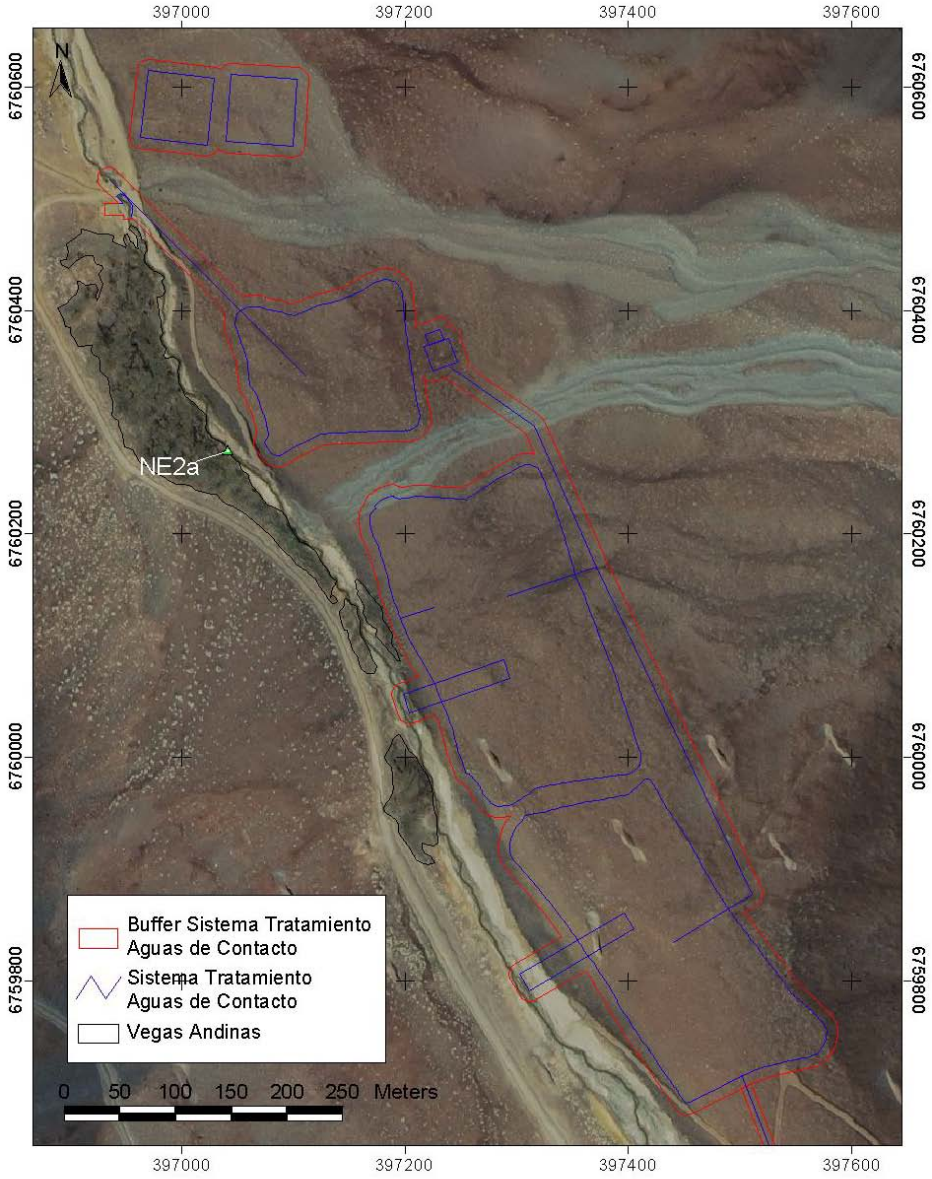
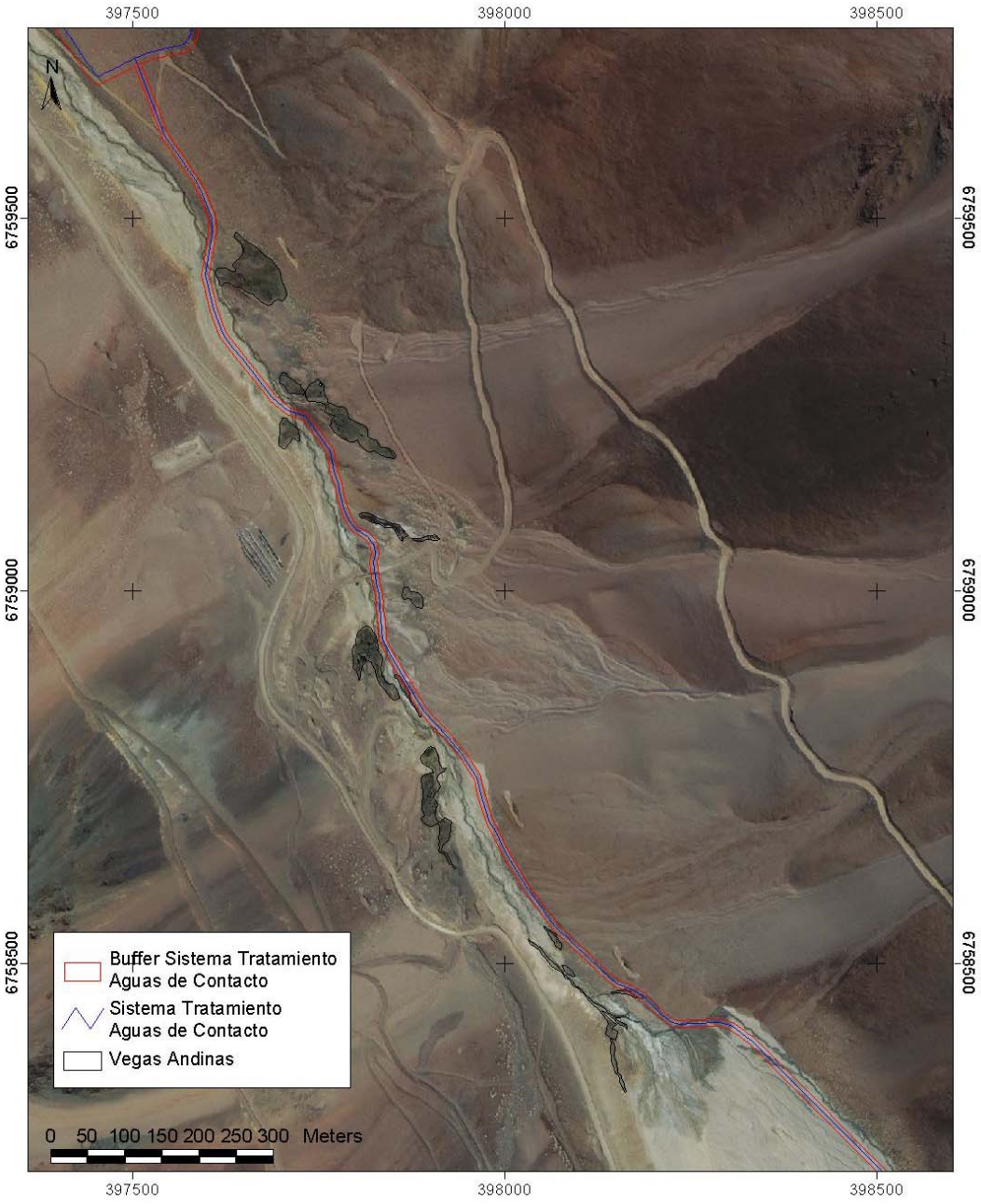


Figura 9.5. Vegas en el sector del ducto del sistema de tratamiento de aguas de contacto (entre NE 2ª y NE 5).



9.16 Según respuesta a la pregunta N° 6.5 de esta sección y de acuerdo a lo presentado en la lámina N° 3 "Especies florísticas con problemas de conservación y áreas de intervención, existe poca consistencia en aclarar que no se intervendrá un sector de vega en el río El Estrecho, ya que las láminas muestran que si existe intervención.

Respuesta:

La situación que se plantea en la pregunta se origina en un problema de escala de la figura de la lámina 3 a que se refiere la pregunta. Esta situación se aclara con las figuras 9.3 b y 9.4.

9.17 En respuesta a la pregunta 6.2 de las tres especies con problemas de conservación: Spergularia pissisii (VU), Calandrinia caespitosa (IC) y Senecio segethii (IC) que se encuentran cercanas al área de intervención, se le consulta al titular. ¿ Cómo se proponen las medidas mencionadas si existe insuficiente conocimiento de por lo menos dos de estas especies a nivel nacional? Se requiere de mayor conocimiento morfoecológico en este punto para proponer medidas adecuadas. En esta misma respuesta se hace mención de la siguiente especie; Chaethantera achenoirsuta, como un nuevo registro para la flora de Chile (Arroyo et al, 2004), que por su estrecho rango de distribución podría cambiar a alguna categoría de problemas de conservación y que no ha sido informada como evaluada. Esta especie se encuentra en el área donde se emplazará el depósito de estériles. Por esta información emanada por el propio titular se le solicita el requerimiento de un estudio acucioso en cuanto a estas especies en el sector incluyendo a la especie A. madrepórica, por la importante relevancia que tienen éstas para la vida de la cuenca.

Respuesta:

El plan de mitigación propuesto incluye, junto con los estudios ecológicos y de biología reproductiva, la evaluación de las técnicas de transplante y propagación por semillas. En este caso se trata de especies herbaceas de pequeño tamaño, con enraizamiento superficial, lo que pronostica una medida compensatoria exitosa. También incluye el monitoreo del éxito de la medida, que debe ser considerada preventiva. Por otro lado, ya se incluyó un estudio específico sobre la ecología y biología reproductiva de *Azorella madreporica*.

9.18 En respuesta 6.2 (pág. 6-5), se propone como medida de mitigación "realizar trasplantes directos y/o recolección de semillas, para ampliar su distribución en la quebrada Barriales, donde se conocen poblaciones de dos de estas cuatro especies (Spergularia pissisii (VU), Calandrinia caespitosa (IC) y Senecio segethii (IC) y Chaethantera acheno-irsta). Al respecto se recomienda que los trasplantes se realcen donde se encuentran naturalmente las especies, favoreciendo con ello su adaptación, y se solicita que los informe de monitoreo sean enviados además de CONAF, a la Dirección Regional del SAG.

Respuesta:

Se concuerda con la autoridad y se hará de esa forma.

9.19 Respecto a la respuesta 6.3 (pág. 6-7), en el punto 3 señala que "La prospección de las especies incluye avistamiento, captura y/o registro fotográficos", indicando que en el caso de captura se solicitará el permiso respectivo a la Autoridad competente (SAG-DEPROREN); por lo cual, se consulta por que no fue incluido el permiso establecido en el Art. N° 99 del Reglamento del S.E.I.A., entre los permisos ambientales a tramitar por el proyecto (Sección 10).

Respuesta:

La captura de micromamíferos (roedores) se realiza con trampas Sherman durante la noche, sin que provoque daño a los ejemplares. Los animales capturados, son pesados y sexados en terreno a primera hora de la mañana, e inmediatamente liberados. Se trata de un método usual de muestreo, fundamental para el monitoreo de la fauna de micromamíferos. Se aclara que las especies de micromamíferos (roedores) presentes en el área de estudio, y que serían objeto de este método de captura para muestreo, no tienen problemas de conservación por lo que no es aplicable solicitar el permiso ambiental sectorial referido.

9.20 En la respuesta 6.2 (pág. 6-5), estudio de "Monitoreo y Actualización de Línea base de Recursos bióticos Proyecto Pascua — Lama: Flora y Vegetación", elaborado por el Departamento de Biología de la Universidad de la Serena, se menciona que en el área del proyecto se reconocen 163 especies de planta, de las cuales 157 son nativas de Chile, de ellas 8 clasificadas vulnerables, 14 como insuficientemente conocidas y 6 no han sido evaluadas. Dentro de estas 28 especies que poseen o que potencialmente podrían presentar categoría de conservación, 16 están asociadas a las vegas andinas. En esta respuesta se propone como medida de mitigación realizar trasplantes directos y/o recolección de semillas de 3 especies con problemas de conservación presentes en el área del proyecto, para ampliar su distribución en la quebrada Barriales.

En este sentido, se solicita mayor detalle en el compromiso respecto a los resultados esperados de dicha medida y su seguimiento, estableciendo un plan de rescate y relocalización, los cuales deben poder ser medibles y fiscalizables.

Sin embargo lo anterior, se hace ver al Titular que las formaciones vegetacionales correspondientes a vegas y bofedales conformadas por especies del genero, Azorella, Deschampsia, Deyeuxia, Oxychloe, Patosia y otras, con coberturas superiores a 85% en el tramo superior del río Del Estrecho; si bien no son reconocidas en alguna categoría de conservación, serán afectadas tanto por el emplazamiento del depósito de estériles y por la construcción de obras tales como sistemas de

colección de drenaje ácido, planta de tratamiento de drenaje ácido, muro cortafuga, caminos, campamento, y otras obras, citándose en anexo X-C, lamina 8, una superficie intervenida de a lo menos 0,8 hás. Este hecho reviste importancia desde la perspectiva que dichos humedales constituyen efectivamente sistemas de tratamiento natural extensivos (suelo-planta), de tipo combinado entre flujo subsuperficial horizontal y flujo superficial vertical, de aguas con altos contenidos de metales, que probablemente explica en gran parte la capacidad natural de depuración del valle, y que estaría siendo afectada, sin un compromiso o vínculo de mitigación o compensación por parte del Titular. Al respecto, puede citarse que se tiene referencia que en Canadá se ha investigado y desarrollado el uso de Constructed Wetlands en el tratamiento de RILEs mineros, siendo estos sistemas de tratamiento bastante confiables y adaptables, no requieren costos de mantención, son ambientalmente amigables y sustentables en el tiempo, y que pueden contemplarse también como tratamiento complementario al tratamiento intensivo y/o como de amortiguación ante eventuales elevaciones puntuales en los parámetros de calidad del efluente.

Respuesta:

En lo referente al plan de rescate y relocalización de las especies de plantas con problemas de conservación, y con el fin de entregar a la autoridad la información que solicita, el titular presentará a CONAMA un detalle un vez que se hayan definido las mejores zonas para realizar la re-localización. Este plan contendrá los compromisos respecto a los resultados esperados de dicha medida y su seguimiento, los cuales serán medibles y fiscalizables, tal como sugiere la autoridad.

En lo referente a las vegas andinas (formación *Oxychloe-Patosia-Deschampsia-Deyeuxia*), se coincide con la autoridad en la importancia de ellas en el mejoramiento de la calidad del agua del Río del Estrecho. Sin embargo, el mecanismo primario, en este caso, estaría dado por dilución del agua del Río proveniente de la parte alta de la cuenca, más que por su "depuración". El agua del río no es la fuente primaria de las vegas andinas, sin perjuicio de lo cual efectivamente, las vegas andinas pueden modificar las características físico-químicas del agua entrante. Hacemos presente que en un Anexo de estas respuestas se incorpora el "Proyecto de Investigación" denominado **"Dinámica de corto y largo plazo de los bofedales en el Proyecto Pascua – Lama: Implicaciones para su manejo"**, el que busca evaluar los factores ambientales que regulan la formación y desarrollo de los bofedales andinos en el área del Proyecto. Esta investigación combina estudios de la distribución, composición y productividad de la vegetación, evaluación hidrogeológica, geoquímica, así como la historia reciente y pasada de los bofedales. Por otra parte, también se incorporan en Anexo el detalle del sistema de Monitoreo hidrobiológico, basado en el estudio de los macroinvertebrados bentónicos, monitoreo que servirá de complemento a las mediciones

física-químicas de los bofedales. Todos estos estudios permitirán conocer mejor los bofedales y sus capacidades.

En cuanto a la aseveración relativa a la superfiecie intervenida de 0,8 hás, hacemos presente que en la respuesta 9.15 se indicó la superficie de las vegas actualmente intervenidas (Campamento Barriales = 0,2 ha de los bordes más secos). A fin de mitigar impactos, se modificó el trazado el ducto de conducción de aguas de contacto para evitar efectos sobre las vegas, y se confirmó que los caminos actualmente no intervienen las mismas.

En cuanto al diseño de humedales artificiales para el tratamiento de riles, aludido por la autoridad: Dicho mecanismo ha probado ser efectivo en otras partes del mundo, por lo cual el titular apoya la elaboración de los estudios necesarios para determinar, con la suficiente información, la posibilidad de implementarloen estas faenas. De hecho, uno de los resultados esperados de la investigación que realizan las universidades de La Serena y Waterloo, es el entendimiento de los procesos geoquímicos que ocurren dentro de este tipo de vegas. En este sentido, hacemos presente que el grupo de la Universidad de Waterloo posee experiencia en el uso de humedales artificiales para la depuración de aguas servidas.

Por último, aclaramos que la especie *Azorella madreporica* no es un componente de las vegas andinas, si no más bien de la vegetación zonal (especie dominante del Piso Andino Inferior).

ANEXO. **Proyecto de Investigación**

"Dinámica de corto y largo plazo de los bofedales en el Proyecto Pascua – Lama: Implicaciones para su manejo"

Este proyecto de investigación tiene como objetivo principal evaluar los factores ambientales que regulan la formación y desarrollo de los bofedales andinos en el área del Proyecto minero Pascua - Lama. Se trata de un estudio multidisciplinario que combina: estudios de la distribución, composición y productividad de la vegetación, evaluación hidrogeológica, geoquímica y de la historia reciente y pasada de los bofedales.

Los objetivos específicos de este estudio son:

a) Establecer sitios experimentales bien instrumentados en bofedales representativos de la zona de Pascua Lama. Este acercamiento permitirá un monitoreo a largo plazo de las relaciones ecológicas, así como de las relación de las fuentes de agua y su geoquímica con el desarrollo de los bofedales.

b) Evaluar las principales fuentes de agua que alimentan los bofedales y su rol en el desarrollo y preservación de estos. Estas fuentes incluyen agua subterránea y superficial, las que pueden ser alimentadas por agua de precipitación (agua / nieve) y agua de deshielo de glaciares y permafrost. Esta información permitirá cuantificar la importancia relativa en la alimentación de bofedales del agua proveniente de un flujo regional asociado a la parte alta de la Cuenca que tiene un mayor aporte de los glaciares comparado con un flujo local de las cuencas mas bajas en la zona de estudio.

c) Implementar el uso de indicadores ambientales, biológicos y geoquímicos, que son preservados en los sedimentos que forman parte del bofedal. Este objetivo se realiza a través de una evaluación de la estratigrafía del bofedal que da información sobre la naturaleza de los sedimentos, análisis de la composición química de los sedimentos incluyendo la determinación del contenido de carbono y nitrógeno y análisis de microfósiles de plantas. Esta información permitirá evaluar la historia del bofedal, las condiciones hidrológicas que hicieron posible la formación de bofedal y su relación con cambios climáticos pasados y actuales.

d) Evaluar la productividad primaria, que incluye acumulación de biomasa, fotosíntesis, transpiración y uso de eficiencia del agua y su relación con la cantidad y calidad de la fuente de agua del bofedal.

e) Complementar la línea base de funcionamiento de los bofedales que será usada para la evaluación del posible impacto de actividad humana (actividad minera) y

factores ambientales como cambio climático en el desarrollo y preservación de los bofedales.

Sitios de Estudios

Los bofedales seleccionados para el estudio incluye un bofedal que se usara como referencia localizado en la Cuenca del Río Tres Quebradas (UTM 391.920 – 6.754.690), y dos en el valle del Río del Estrecho: el bofedal cercano al Campamento Barriales (UTM 396.350 – 6.761.840) y un bofedal localizado al lado de NE-2a (UTM 396.890 – 6.760.300), frente a las piscinas del sistema de tratamiento de aguas de contacto. Los tres sitios seleccionados son representativos del tipo de bofedales de *Oxychloe-Patosia-Deyeuxia-Deschampsia* característicos del Piso Andino Inferior del área de estudio. Además esta selección permitirá comparar dos bofedales ubicados en el área de influencia del proyecto (i.e., Río del Estrecho) con un bofedal que esta fuera del área de influencia (i.e., Río Tres Quebradas). El Dr. Squeo durante los últimos años ha estado monitoreando la composición y productividad de la vegetación en los bofedales del Río Tres Quebradas y del Campamento de Barriales. También se cuenta con información preliminar sobre la estratigrafía de estos bofedales, y composición química e isotópica de las fuentes de agua.

Plan de Trabajo

Las actividades de trabajo de acuerdo a los objetivos del estudio son las siguientes:

a) **Diversidad y Ecofisiología Vegetal:** La productividad y diversidad de la vegetación será evaluada en una series de parcelas permanentes localizadas cerca de los transectos que se usaran para evaluar la estratigrafía de los bofedales. La fotosíntesis y la transpiración serán medidas para evaluar la productividad y evapotranspiración en los bofedales. La composición isotópica del carbono y el cuociente C/N serán evaluadas en la vegetación para determinar la eficiencia en el uso del agua a corto y largo plazo por la vegetación. Los resultados de los estudios ecofisiológicos serán comparados con los datos de diversidad y composición vegetal, geoquímicos e hidrogeológicos.

b) **Estratigrafía y Paleoecología:** Una de las principales actividades en este estudio es establecer la historia del bofedal que puede estar preservada en los sedimentos que forman parte del bofedal. Esta actividad se realizara mediante la colecta de testigos en transectos que representen los distintos sub-tipos de vegetación existente en el bofedal. Esto permitirá construir la estratigrafía del bofedal. Los testigos serán muestreados para caracterización física y química de los sedimentos que se realiza mediante análisis de densidad, contenido de materia orgánica y del cuociente C/N. Alícuotas de sedimentos serán usadas para análisis de microfósiles de plantas, esporas

y para datación por carbono-14 usada para la determinación de la edad de los sedimentos. Estos datos darán información sobre la historia del bofedal.

c) **Hidrogeología:** Esta actividad se realizara mediante la instalación de una serie de pozos y piezómetros que serán instalados en los mismo transectos que se usaron para evaluar la estratigrafía del bofedal. Esta instrumentación se usara para evaluar el sistema de flujo del agua en el bofedal y parámetros hidráulicos como conductividad y gradientes hidráulicos. Estos sitios serán instrumentados con sensores y "data loggers" que permitirán obtener información anual continua sobre el nivel del agua en el bofedal.

d) Geoquímica: La evaluación geoquímica que incluye análisis químicos y isotópicos se realizará en aguas subterráneas y superficiales. Las aguas subterráneas se colectaran en la instrumentación instalada para la evaluación hidrogeológica del bofedal. El agua superficial se colectara en los principales ríos del área de estudio. El diseño del muestreo incluye la colecta de muestras en la cabecera del río y aguas abajo a lo largo de curso del río. Esto servirá para evaluar el cambio de la composición isotópica del río en función del gradiente de altura y su evolución química en relación a cambios en la geología en la Cuenca. El muestreo se realizara al final de la primavera (flujo alto) y durante el verano (flujo base). En el terreno se medirán la conductividad, temperatura, pH y oxigeno disuelto. Los análisis químicos incluyen cationes (Ca, Na, Mg, K) y aniones principales (Cl, SO_4, HCO_3, NO_3), sílice y metales como Cu, Fe y As. Los análisis isotópicos incluyen ^{18}O, ^{2}H y ^{3}H. Estos datos servirán para evaluar el origen y el tiempo de residencia del agua que esta alimentando a los bofedales.

Equipo de Trabajo

El estudio se hará como parte de una colaboración entre investigadores de la Universidad de La Serena y la Universidad de Waterloo (Canadá). Este grupo ha estado colaborando desde hace un tiempo como parte de las actividades internacionales del Centro de Estudios Avanzados en Zonas Áridas (CEAZA). Este grupo de trabajo tiene la experiencia necesaria para llevar a cabo el estudio descrito en este documento. El grupo incluye los Drs. Barry Warner (ecólogo, especialista en estudios de Paleoecología en humedales), Ramón Aravena (geoquímico especialista en uso de herramientas isotópicas y químicas en estudios de humedales y David Rudolph (hidrogeólogo, especialista en aguas subterráneas) de la Universidad de Waterloo, Canadá, y los Drs. Francisco Squeo (ecólogo – ecofisiólogo vegetal) y Antonio Maldonado, miembros del CEAZA-Universidad de La Serena. Los Drs. Warner y Aravena supervisaron una tesis de Master en el año 2000 sobre un estudio de bofedales in la zona de la Laguna del Negro Francisco. El Dr. Squeo es un líder en ecología de plantas en el norte de Chile y ha trabajado los últimos 15 años en bofedales de la III y IV regiones de Chile y durante los últimos años ha colaborado con Barrick en estudios de vegetación en el área de la Mina del Indio y de Pascua Lama. En este estudio propuesto

participaran estudiantes de Doctorado y Master de la Universidad de La Serena y de la Universidad de Waterloo.

ANEXO. Monitoreo hidrobiológico del proyecto Pascua - Lama: desarrollo de un sistema basado en los macroinvertebrados bentónicos como complemento a las mediciones física-químicas.

Autor de la propuesta: MSc Karine Orth (hidrobióloga del CEAZA)

Duración de estudio: 3 años

Objetivo: Obtener el conocimiento suficiente de las comunidades de Macroinvertebrados para crear a largo plazo una herramienta biológica complementaria de los análisis físico-químicos capaz de evaluar el impacto de las perturbaciones antrópicas sobre el ecosistema acuático y la calidad del agua.

Las actividades mineras en general, numerosas en el norte de Chile son conocidas como fuente de contaminación potencial del agua, así como muchas otras actividades antrópicas. Por eso es relevante establecer un sistema de monitoreo eficiente que permita el desarrollo sustentable de las actividades económicas.

En Chile, la metodología utilizada para medir la calidad del agua consiste en el análisis de parámetros físico-químicos. Si este tipo de seguimiento es esencial para conocer las concentraciones de los elementos, sin embargo no es suficiente. Efectivamente, este tipo de análisis corresponde a mediciones puntuales en el tiempo, no permiten darse cuenta de los impactos sobre las poblaciones acuáticas y no pone en evidencia todas las fuentes de alteración.

Los métodos biológicos son complementarios a los análisis fisico-químicos. Están basados en el estudio de las poblaciones biológicas, las que reflejan la historia de las perturbaciones en el río. En general las comunidades bentónicas, y en particular los macroinvertebrados, son buenos bioindicadores por biodiversidad, sensibilidad diferencial y la imposibilidad de huir de las contaminaciones.

En varios país de Europa, Estados Unidos, Canadá y Australia, el estudio avanzado de la taxonomía, autoecología y potencialidades bioindicadoras de los distintos taxa de Macroinvertebrados han permitido la creación de varios índices bióticos adaptados a las características de los ríos de distintos países o regiones. Estas herramientas están integradas en los sistemas de vigilancia de calidad de agua y permiten una evaluación fácil, rápida y en forma complementaria a los análisis físico-químicos.

En Chile este tema es todavía incipiente, aunque se ha logrado cierto desarrollo en la ultima década. La mayor parte de las investigaciones sobre las poblaciones de Macroinvertebrados se realizan en el centro y sur de Chile. En la zona norte, las investigaciones son muy escasas y se limitan a algunos estudios de impacto puntales realizados por consultores. Para implementar un monitoreo hidrobiológico aún es necesario profundizar en el conocimiento de las comunidades de Macroinvertebrados.

El proyecto Pascua Lama se sitúa en la zona Cordillera de Alto Carmen, en la cabecera de los ríos del Estrecho y Toro-Tres Quebradas. El desarrollo de este proyecto requiere de un monitoreo de la calidad del agua, donde una herramienta muy útil es el uso de bioindicadores hidrobiológicos.

El objetivo del estudio es poder desarrollar a largo plazo una herramienta capaz de complementar el diagnóstico físico-químico de calidad de agua y realizar un monitoreo de los ríos cercanos al proyecto. Se propone realizar investigaciones de las comunidades de Macroinvertebrados a través de la taxonomia, autoecología y todos los aspectos permitiendo llegar a un conocimiento suficiente para usarlos como bioindicadores de calidad de agua.

La zona de muestreo se ubicara principalmente en los ríos del Estrecho y Tres Quebradas y sus afluentes que corresponde a la zona mismo del proyecto. Además, se realizaran muestreos aguas abajo en los ríos receptores de los primeros, hasta la confluencia de los ríos del Tránsito con del Carmen. De esta forma se tendrán las bases para establecer un sistema de monitoreo a largo plazo específico para el área.

La elección de las estaciones en esta zona se hará según varios criterios, tipología, puesta en evidencia de un impacto eventual y puntos de controles en los afluentes.

El periodo de muestreo mas adecuado corresponde a Marzo, porque las mayor parte de las larvas llegan a un estadio maduro lo que permite una mejor identificación de las taxa. Además las condiciones hidrológicas y climáticas hacen que exista una dilución menor de los contaminantes y corresponde generalmente a la época de impacto mayor. Adicionalmente se realizara un muestro a principios de primavera antes que los caudales aumenten.

El muestreo se realizara con una red surber de 500 µm y de 0,72 m^2, para obtener resultados semi-cuantitativo, contando los individuos por metros cuadrados (norma AFNOR, 1992). El protocolo de muestreo será reproductible y diferencial. Se realizará un esfuerzo de muestreo equivalente en cada estación, y se realizará un muestreo representativo de los tipos de hábitat presentes. Los hábitat son definidos tomando en cuenta el sustrato, velocidad superficial, posición en el río (orilla, centro) y profundidad. Además en cada punto

se tomara mediciones de pH, conductividad, temperatura y oxigeno disuelto con medidor portátil. El protocolo utilizado en los primeros muestreos se podrá ajustar hasta lograr la creación de un protocolo localmente adaptado.

Existen antecedentes sobre la fauna bentónica en los estudio de línea de base realizados en el área del proyecto por diversos investigadores (por ejemplo, Aron 1994, 1995, Vila & Pardo 2002, Contreras et al. 2005). Sin embargo, aún no hay un conocimiento sifiuciente al nivel de especie. Se propone crear una colección de referencia para poder mejorar el conocimiento la fauna de macroinvertebrados bentónicos, con énfasis en los grupos más sensibles (i.e., Efemerópteros, Plecópteros, Tricópteros y Coleópteros). Adicionalmente se implementará una base de datos georeferenciada de la información colectada / generada. La publicación de un inventario de la fauna de invertebrados de los ríos del norte chico de Chile será un valioso producto adicional de este estudio.

Junto con el desarrollo de un sistema de monitoreo hidrobiológico de los ríos de en la cuenta alta del Huasco, este proyecto contribuirá al desarrollo de una nueva línea de investigación en ecología acuática y bioindicadores de calidad de agua dulce, tema muy poco desarrollado en el norte de Chile y de grande relevancia para la protección y gestión de los ecosistemas acuáticos y calidad de agua.

Referencias

Aron A (1994) Limnología de los sistemas altoandinos Río del Medio y Estrecho/Chollay. Línea de Base Limnológica para la Evaluación de Impacto Ambiental del Proyecto Minero “Nevada”, Barrick-Chile Ltda.

Aron A (1995) Evaluación de la Flora y Fauna Acuáticas de los sistemas de ríos altoandinos El Toro/Tres Quebradas, Potrerillos, Del Carmen, Quebrada de Los Choros y áreas adyacentes. Línea de Base Limnológica para la Evaluación de Impacto Ambiental del "Proyecto Camino", Barrick Chile Ltda.

Contreras M, L Fuentes, G Martínez, E Araya, L Salinas, S Muñoz, O Martinez & A de la Fuente (2005). Informe Final: Evaluación de la condición ambiental de los ecosistemas acuáticos y humedales de los ríos Estrecho, Chollay, los Barriales. CEA.

Vila I & R Pardo (2002) Monitoreo y actualización de línea de base de recursos bióticos proyecto Pascua - Lama: fauna acuática, Universidades de La Serena y de Chile.

10. EMISIONES DE MATERIAL PARTICULADO

10.1 ***La metodología para estimación de emisiones de polvo levantado por tránsito de vehículos en caminos de tierra utiliza el factor de emisión para caminos sin pavimentar propuesto por US EPA, (AP42, Sección 13.2.2).***

Las emisiones de polvo estimadas mediante ese factor, son reducidas en un 75%, aplicando un resultado de un informe preparado por Watson & Chow (Reconciling Urban Fugitive Dust Emissions Inventory and Ambient Source Contribution Estimates Summary of Current Knowledge and Needed Research, 2000).

En ese informe se recoge la opinión de un grupo de expertos para explicar las discrepancias entre las cantidades relativas de polvo fugitivo estimado en inventarios de emisiones de PM1O y PM2.5; y los estudios de asignación de proporciones a fuentes emisoras, a partir de análisis de muestras ambientales.

Las conclusiones del informe indican que para modelaciones a escala regional, para distancias donde el polvo viaja varios kilómetros, se puede suponer que las emisiones se reducen en un 75%, por depositación de partículas a la superficie o impacto horizontal sobre obstáculos.En el caso de la estimación de depositación de polvo por emisiones desde el proyecto PascuaLama, no corresponde aplicar esa reducción de emisiones, debido a que el objetivo principal de la simulación es la estimación de los flujos de depositación hacia el suelo.

Nótese que el informe de Watson y Chow está orientado a reconciliar las mediciones ambientales de concentraciones de PM1O y PM2.5, con las estimaciones de emisiones desde las fuentes, que indican una mayor proporción de aporte de polvo. Las diferencias se atribuyen a depositación de polvo hacia el suelo. El informe de Watson y Chow señala que la reducción de 75% propuesta para las emisiones de polvo es una primera aproximación para simulaciones de escala regional, con transporte de polvo por distancias mayores a varios kilómetros. El informe también indica que la fracción de polvo transportable dependerá de la escala espacial de modelación, siendo las estimaciones de emisione propuestas por US EPA probablemente adecuadas para escalas locales y medias. En el caso del Proyecto Pascua-Lama, los impactos por depositación de polvo interesan desde la vecindad de las fuentes emisoras hasta distancias de varios kilómetros.

Al eliminar el factor de reducción de 75% en las estimaciones de emisiones de polvo desde caminos de tierra, la depositación hacia la superficie aumentará en forma importante.

Sin embargo, reducciones importantes de polvo levantado desde caminos de tierra pueden lograrse por aplicación de medidas de mitigación para retener las partículas

(riego de caminos, adición de sales u otros tratamientos). Un programa de mitigación adecuado puede llegar a eficiencias de mitigación del orden del 75%, lo cual se solicita que se implemente.

Respuesta:

El titular concuerda con la autoridad que un programa de medidas de mitigación sobre el polvo levantado en los caminos puede llegar a una efectividad como la planteada. Por esta razón, y como se explica en la respuesta 10.4 mas abajo, se implementarán una serie de medidas con este propósito, a saber:

- ·Mantención de la velocidad del tránsito de camiones en niveles indicados;
- ·Revestimiento de la superficie de los caminos con material para evitar una abundancia de material fino y usando aditivos que sean apropiado para mantener la eficiencia en el control de polvo en suspensión.
- Monitoreo de la precipitación de lluvia para asegurar que la superficie posea la humedad adecuada; y
- ·Mantener la humedad en las superficies en días secos.

Sin embargo, el titular usó un valor de 50% de reducción de emisiones desde un programa de mitigacion en base a riego de los caminos etc. y no el valor de 75% para tener un enfoque mas conservador.

Por otra parte, el titular estima que las conclusiones de Watson y Chow son aplicables a Pascua Lama. Según se desprende de este informe, el 75% de las partículas suspendidas permanecen dentro de 1-2 m sobre el nivel del suelo, para posteriormente, depositarse en el suelo pocos minutos después de la suspensión (para mayor información ver página vii Resumen Ejecutivo/Conclusiones)

En cualquier caso, el Proyecto se compromete a lograr este nivel de eficiencia mediante riego frecuente de los caminos, y en caso necesario, mediante la aplicación de estabilizadores al agua utilizada para el abatimiento.

10.2 Se solicita que se corrijan los siguientes errores de forma:

Se han detectado algunos detalles de edición, que se indican a continuación:

Tabla 2-16: Factor de emisión, unidades (kg/tronadura), debe ser (kg/operación de carga/ descarga)
Tabla 2-17 Tasa de emisión Fase de Remoción de Sobrecarga, para PM2.5, valor indicado para OPIT 7.4 es mayor que para PM y PM 10, no corresponde, En la misma Columna, Total para PM2.5 no corresponde.

Tabla 2-18, Emisión Anual Fase de Remoción de Sobrecarga, para PM2.5, valor indicado para OPIT es mayor que para PM y PM 10, no corresponde. En la misma Tabla, Totales no corresponden a las columnas.(corridos)
Tabla 2-21, Totales no corresponden a las columnas
Ecuación 2-10, C = capacidad del camión (ton/camión) va dividiendo en la ecuación.
Tabla 2-26 Horas de Operación de Cargador Frontal, Fase Inicial y Fase de Remoción de Sobrecarga, valor indicado 52466 igual para ambas, no es compatible con los resultados de Factores de Emisión (g/s), valores diferentes; y de Emisión Anual.
Titulo 3.3 Corregir, debe decir "Mezcla".

Respuesta:

CMN concuerda con la autoridad respecto de los errores de edición o forma identificados en el Anexo IV-A del Adenda N°2 (modelo actualizado de depositación de polvo). A continuación se indica la correspondiente Fe de Erratas:

ERROR DE DIGITACIÓN	**Fe Errata**
Tabla 2-16: Factor de emisión, unidades (kg/tronadura), debe ser (kg/operación de carga/ descarga)	El titular esta de acuerdo, es un error de digitación y es "(kg/operación de carga/ descarga)".
Tabla 2-17 Tasa de emisión Fase de Remoción de Sobrecarga, para PM2.5, valor indicado para OPIT 7.4 es mayor que para PM y PM 10, no corresponde, En la misma Columna, Total para PM2.5 no corresponde	Este es un error de digitación y no corresponde a un error en el modelo. Debería decir 0.74 y no 7.4 gramos/segundo
Tabla 2-18, Emisión Anual Fase de Remoción de Sobrecarga, para PM2.5, valor indicado para OPIT es mayor que para PM y PM 10, no corresponde. En la misma Tabla, Totales no corresponden a las columnas.(corridos)	Este es un error de digitación y no corresponde a un error en el modelo. Debería decir 23 y no 23.3 gramos/segundo.
Tabla 2-21, Totales no corresponden a las columnas Ecuación 2-10, C = capacidad del camión (ton/camión) va dividiendo en la ecuación.	Los totales de las columnas se desplazaron una columna hacia la derecha. No obstante el modelo usa los valores crudos y no los totales y por eso los resultados no estan efectados. Con respecto a C, esta debería estar

<table>
<tr><td></td><td>dividiendo tal como lo dice la autoridad.</td></tr>
<tr><td>Tabla 2-26 Horas de Operación de Cargador Frontal, Fase Inicial y Fase de Remoción de Sobrecarga, valor indicado 52466 igual para ambas, no es compatible con los resultados de Factores de Emisión (g/s), valores diferentes; y de Emisión Anual.</td><td>Error de digitación en el parte de la tabla de emisiones anual, pero el modelo usa los valores crudos y no los totales y el modelo no esta afectado.
<table><tr><th rowspan="2">Model Scenario</th><th colspan="3">Annual Emissions (tonmes/yr)</th></tr><tr><th>PM</th><th>PM_{10}</th><th>$PM_{2.5}$</th></tr><tr><td>Pioneering[a]</td><td>130</td><td>30</td><td>14</td></tr><tr><td>Pre-Stripping</td><td>129</td><td>30</td><td>14</td></tr><tr><td>Year 4</td><td>164</td><td>38</td><td>17</td></tr><tr><td>Year 12</td><td>132</td><td>31</td><td>14</td></tr></table></td></tr>
<tr><td>Titulo 3.3 Corregir, debe decir “Mezcla”.</td><td>El titular esta de acuerdo, es un error de digitación y es “Mezcla”.</td></tr>
</table>

10.3 Respecto a los lodos generados por la planta HDS, y a la incineración de éstos, es necesario considerar la incorporación de precipitadores electroestáticos de 3 o 4 campos en la salida de la chimenea de la unidad de incineración, en particular considerando la peligrosidad intrínseca tanto de los lodos, como en la eventual emisión de metales pesados a la atmósfera.

Respuesta:

No se contempla incinerar los lodos generados por la planta HDS. Estos tienen características húmedas (25%, Anexo II-K-2 de adenda N°2) y estos si no presentan características de peligrosidad según lo establecido en el DS 148, serán dispuestos en mono rellenos y recubierta su superficie una vez llenos (Anexo IX-A de la Adenda N°2).

Con respecto a las emisiones de material particulado generados producto de la incineración de residuos, el incinerador tendrá un sistema de tratamiento de gases, que retendrá las partículas en suspensión, haciendo despreciables las emisiones de material particulado, haciendo innecesaria la incorporación de precipitadores electroestáticos (para mayor información ver sección 4.3.2 del Anexo IX-A y en el el Anexo X-A-3 de la Adenda N°2).

10.4 Se solicita que se explique con detalle cual será el programa de mitigación para la reducción de las emisiones de polvo levantado desde caminos de tierra, con el cual

se lograrán eficiencias de retención de partículas del orden del 75% (riego de caminos, adición de sales u otros tratamientos). Esto es periodicidad de aplicación de cada medida, criterios y parámetros de decisión en la aplicación, etc.

Respuesta:

El Proyecto Pascua Lama empleará las mejores Prácticas de Manejo para minimizar las emisiones de polvo a través de todas las fases del proyecto. Según el modelamiento detallado de emisiones se determinó que los caminos no pavimentados representan las mayores fuentes de generación de polvo.

Los medios de mitigación de emisiones de polvo provenientes de los caminos comprenden:

- Mantención de la velocidad del tránsito de camiones en niveles indicados;
- Revestimiento de la superficie de los caminos con material para evitar una abundancia de material fino y usando aditivos que sean apropiado para mantener la eficiencia en el control de polvo en suspensión.
- Monitoreo de la precipitación de lluvia para asegurar que la superficie posea la humedad adecuada; y
- Mantener la humedad en las superficies en días secos.

La velocidad al interior del rajo y al exterior de este será estrictamente monitoreada por personal de Pascua Lama. Personal de Pascua Lama inspeccionará continuamente los caminos para asegurar que la superficie no experimente un deterioro significativo a través del tiempo de este. Las áreas asociadas a un alto potencial de polvo serán revestidas con material nuevo (es decir, material de chancador o triturado) a traves de un proceso de mantención regular.

El riego de la superficie de los caminos constituye un medio útil para la mitigación de las emisiones de polvo. La precipitación natural será monitoreada para determinar la cantidad de riego de la superficie necesario y el control de las emisiones se controlara mediante un programa sistematico de riego que el titular administrará.

11. PLAN DE SEGUIMIENTO

11.1 Respecto del conjunto de fichas que conforman el Plan de Seguimiento, presentadas junto al EIA (Capitulo 9), se requiere que éstas se actualicen de manera que contengan la información sobre las medidas de mitigación, reparación y/o compensación, que se adoptarán para minimizar los efectos adversos del proyecto, en cada etapa. Así mismo deberán contener las medidas de prevención de riesgos y de control de accidentes.

Respuesta:

Las fichas de seguimientos presentadas en el Capítulo 9 del EIA, fueron actualizadas en la sección 15 del Adenda N°2 de dicho EIA. El presente Adenda N°3 no introduce cambios al Proyecto que requieran abordar una nueva actualización de las fichas.

11.2 Se solicita incluir información digitalizada, en formato para Arc View, especificando uso y datum, que permita un mejor seguimiento posterior del proyecto, especialmente de los siguientes parámetros: Ubicación y características de puntos de monitoreo de agua superficial y subterránea, ubicación de canales perimetrales, delimitación actual de glaciares, delimitación áreas depósitos estériles, delimitación área mina (rajo), capa con información de flora y fauna existente en el lugar, ubicación de caminos existentes y proyectados y toda información que se considere relevante y que permita un mejor conocimiento, seguimiento y fiscalización de los compromisos asumidos por el proyecto.

Respuesta:

Se adjunta archivo electrónico solicitado por la autoridad en dos archivos:

- Archivo 1: Plano de instalaciones Pascua-Lama y detalle de las instalaciones.
- Archivo 2: Plano de sitios de monitoreo del Proyecto Pascua – Lama.

Además se adjuntan copias impresas de dichos archivos en Apéndice 1 del presente documento.

12. DISPOSICION DE RESIDUOS

12.1 Los residuos orgánicos generados en el período de mantención del incinerador, como también los lodos generados en el lavado de buses (aún cuando estos sean caracterizados como no peligrosos), no deberán ser dispuestos en el relleno sanitario, diseñado para recibir residuos no orgánicos, por lo que deberán disponerse en un relleno que cuente con un Plan de Monitoreo autorizado por la Superintendencia de Servicios Sanitarios.

Respuesta:

El Proyecto contempla disponer de dos unidades idénticas de incineración para asegurar que una de ellas esté siempre disponible durante las detenciones programadas y no programadas de la otra. Adicionalmente, el Proyecto contará con suficiente capacidad para almacenar los residuos orgánicos y manejarlos adecuadamente en contenedores cerrados en forma transitoria en el evento improbable que fallen las dos unidades de incineración, por un período de hasta una semana.

Respecto a los residuos generados en el lavado de buses y vehículos, las aguas de lavado y los lodos se captarán en el sistema de lavado del taller de la mina y se dispondrán adecuadamente y de manera controlada. Las grasas y aceites retirados de las aguas de lavado serán incinerados, en tanto los lodos serán dispuestos en monozanjas impermeabilizadas en un sector especial del relleno sanitario. Dichas zanjas estarán impermeabilizadas con HDPE, que contendrán cualquier líquido que se pudiera producir, impidiendo su infiltración. Por otro lado, los residuos orgánicos y los lodos que no presenten características de peligrosidad según lo establecido en el DS 148, pueden ser dispuestos sin ningún problema directamente sobre el suelo por sus características no peligrosas, pero CMN, para asegurar que estos residuos no peligrosos no generen ningún impacto ambiental, ha dispuesto como se mencionó anteriormente, disponerlos en monozanjas impermeabilizadas, las cuales contarán con un sistema de monitoreo debidamente aprobado por la autoridad competente (Superintendencia de Servicios Sanitarios).

Anexo X-A-4

12.2 En la pág. 4 se señala que para el control de las posibles infiltraciones desde el relleno sanitario, se procederá a monitorear mensualmente las aguas subterráneas. Al respeto se solicita al titular que indique cuales serán los parámetros a medir, y las medidas que se tomarán si se producen infiltraciones.

Respuesta:

Es importante tener presente que en el relleno sanitario no se dispondrán residuos sólidos de tipo orgánico ni residuos de caracteristicas peligrosas según lo establecido en el D.S. 148, por

lo que la generación de líquidos percolados será mínima (Sección 4.2 del Anexo IX-A). Además, las zanjas del relleno estarán impermeabilizados y contarán con drenes y sumideros para la recoleccion de infiltraciones y con una capa impermeabilizada de geotextil lo que reduce aun más la infiltración de eventuales líquidos lixiviados o percolados.

Sin perjuicio de lo anterior, CMN durante el primer año monitoreará la calidad de las aguas subterráneas de acuerdo a los parámetros establecidos en el DS 46/02 Norma de Emisión de Residuos Líquidos a aguas subterráneas. Según los resultados obtenidos se monitoreará desde el segundo año de operación y semestralmente los siguientes parámetros:

- pH
- cloruros
- Nitratos – nitritos
- Sulfatos
- Aceites y grasas
- Nitrógeno Total
- Metales: el monitoreo de metales se realizará para los parámetros que sobrepasen la norma.

En el caso que se produzca infiltración de un derrame por el revestimiento de las membranas, se utilizará el equipo de imagineria y monitoreo de filtración eléctrico (ELIM), que es una tecnología común para detectar filtraciones en sistema de membranas en rellenos (Ref pagina web www.leakchile.cl) Estos equipos permitirán localizar un eventual problema de infiltración, de modo que sea posible excavar el sector afectado y reparar el sistema de membrana. Si se hubiera afectad suelo subyacente, se procederá a su remediación o reposición.

13. PLAN DE CIERRE Y ABANDONO

Anexo X-A-4

13.1 Pág. 5, se menciona el plan de cierre, dado que es de suma importancia abarcar este tema con la debida anticipación, se hace necesario que el titular indique con cuanto tiempo de anticipación lo presentará a las autoridades pertinentes para la visación.

Respuesta:

CMN cumplirá a cabalidad con lo establecido en el D.S. N°72 modificado por D.S. N° 132/03 "Reglamento de Seguridad Minera" el cual establece, en sus Títulos I y X que conjuntamente con la presentación del método de explotación, CMN deberá presentar un Proyecto de Plan de Cierre de acuerdo a lo establecido en el Título X del Reglamento de Seguridad Minera.

CMN contempla tramitar todos los permisos sectoriales de Sernageomin (Método de Explotación, Depósitos de Estériles, Túneles, Aviso de Inicio de Faenas y Plan de Cierre) una vez que cuente con la aprobación ambiental del Proyecto Pascua – Lama por parte de COREMA III Región.

Finalmente, y en cuanto a la anticipación a la presentación del plan de cierre, CMN presentará actualizaciones al Proyecto de Plan de Cierre al menos cada cinco años, según lo establece la normativa vigente (Reglamento de Seguridad Minera). De esta forma existirán sucesivas instancias anticipadas para abordar el plan de cierre con las autoridades pertinentes.

14. PERMISOS AMBIENTALES SECTORIALES

Artículo N°90

14.1 Se informa al titular que el depósito de estériles debe ajustarse al artículo N°90 del D.S.95/2002, y no al artículo N°93 como se menciona en el Anexo X-A.-4, pág. N°1.

Respuesta:

La aplicación del permiso ambiental sectorial del artículo 90 del D.S. N°95/2002 al depósito de estériles se presentó en Adenda N°1 del EIA, incluyendo los requisitos y contenidos formales y técnicos establecidos en el Reglamento del SEIA para su otorgamiento.

En relación al permiso ambiental sectorial del artículo 93 del D.S. N°95/2002 para el depósito de estériles, se hace mención a que dicho permiso fue solicitado por la Autoridad en el ICSARA N°1 y por ello se incluyó en la Adenda 1, siendo actualizado en la Adenda 2.

14.2 El titular ha informado de modificaciones al sistema de tratamiento de aguas ácidas, señalando textualmente en el Anexo II-E que la piscina de pulido será usada para regular la cantidad de agua requerida para uso industrial de la mina y para regular la descarga al río Estrecho si fuera necesario en casos extraordinarios", al respecto se solicita definir estos casos.

Respuesta:

Bajo condiciones de operación normal, el manejo de los drenajes ácidos generados en el depósito de estériles contempla que estos sean captados al pie del depósito, conducidos a las piscinas de almacenamiento y leugo a la planta de tratamiento de drenaje ácido, cuando sobrepase los parámetros de línea base, donde serán tratados, para luego almacenar el agua tratada en la piscina de pulido, desde donde se impulsará 100% del agua tratada hacia los centros de consumo de la mina y del taller en la medida que sea necesario. Bajo esta estrategia, no se contempla descarga al río del Estrecho salvo que se vea sobrepasada la capacidad de las piscinas de almacenemiento en caso de un evento extremo. Se debe tener presente que existe un 96% de probabilidad de un periodo de retorno de 100 años que incluso no exceda la capacidad de las dos piscinas de almacenamiento durante la vida operativa de la mina y un 99% de probabilidad que no exceda la capacidad de una piscina de almacenamiento posterior al cierre de la mina. No obstante que si se tuviera que descargar este efluente se cumplirá con los parámetros establecidos en el DS 90.

Artículo N°93

Planta de Incineración

14.3 Se solicita al titular presentar el Plan de Manejo de Residuos Peligrosos, medidas de mitigación, reciclaje, tratamiento de residuos industriales peligrosos, equipos a utilizar, procedencia, etc., en virtud de la entrada en vigencia del D.S. 148/2003, Reglamento de Generación de Residuos Peligrosos.Residuos Hospitalarios

Respuesta:

El plan de manejo solicitado fue presentado en el Apéndice E del anexo IX-A del Adenda 2. En el se describen las medidas de mitigación, reciclaje, tratamiento (Alternativas de minimización y Procesos de eliminación a que serán sometidos los residuos), equipos a utilizar (Equipos de apoyo para el manejo de Rises).

14.4 El titular no responde la consulta relacionada con la disposición que hará de los residuos hospitalarios según clasificación 1.1 del artículo 18° del D.S. N°148/2003.

Respuesta:

Con respecto a los residuos peligrosos generados en el policlínico, que son de bajo volumen de generación, estos serán tratados con empresas externas autorizadas, algunas de las cuales se señalan en el punto b "Alternativas de Instalaciones de Eliminación Externa", del Apéndice E antes referidos.

Botadero de Residuos Inertes

14.5 El titular informa que en el relleno sanitario se dispondrán escombros y cerámicos, por lo que se informa que dichos residuos deberán disponerse, según lo señala la autoridad sanitaria, en un botadero de escombros, lugar que deberá definirse por el titular, y adjuntar los antecedentes necesarios para su evaluación ambiental en el presente proceso.

Respuesta:

Los escombros y cerámicos serán dispuestos en monozanjas, ubicadas dentro del sector solicitado para la construcción del relleno sanitario. Los antecedentes solicitados fueron acompañados en la sección 4.2.2 del Anexo IX-A del Adenda 2.

Artículo N°96

14.6 Respecto de la solicitud de Cambio de Uso de Suelo, Art. 96 del DS 95/01, se solicita al Titular entregar a la Seremi de Agricultura los originales de los certificados de avalúo fiscal y de la carta de solicitud de cambio de uso de suelo, firmada por dos cualesquiera de los señores a quienes unánimemente el Directorio de la Compañía entregó poder de representación, de acuerdo a lo contenido en reducción a escritura pública de Acta de Directorio número siete de Compañía Minera Nevada Limitada.

Así mismo, El plano de la Lámina 3 del Anexo X-C también debe estar firmado por el Representante Legal del Titular en 5 copias, para ser entregado a esta Secretaría Regional Ministerial

Todo lo anterior con el objeto de constituir la carpeta de expediente de la presente solicitud de cambio de uso de Suelo y de remitir los planos y resoluciones respectivas a los servicios técnicos correspondientes.

Respuesta:

En el Apendice 2 de esta Adenda se entregan los originales de los certificados de avalúo fiscal y de la carta de solicitud de cambio de uso de suelo firmada por dos de los representantes legales de Compañía Minera Nevada y las copias requeridas de la Lámina N° 3 del Anexo X–C debidamente firmadas.

URRUTIA & CIA.
ABOGADOS
ISIDORA GOYENECHEA 3250-9° PISO
LAS CONDES, SANTIAGO-CHILE
TELEFONO: (56-2) 335.1841
TELEFAX: (56-2) 335.1842

INFORME EN DERECHO

DE LA IMPOSIBILIDAD DE LA AUTORIDAD DE EVALUAR PORYECTOS DISTINTOS DEL PRESENTADO POR EL TITULAR DENTRO DEL SISTEMA DE EVALUACIÓN DE IMPACTO AMBIENTAL

Patricio Leyton Florez[1]
Abogado
Profesor de Derecho Ambiental
Facultad de Derecho
Universidad de Chile

*****

Se nos ha solicitado una opinión legal respecto de la procedencia de la exigencia planteada por la autoridad ambiental de solicitar, en el marco del proceso de evaluación de impacto ambiental de un proyecto minero, el análisis de métodos de explotación distintos del presentado a evaluación por el titular así como de los impactos generados por cada una de esas alternativas.

Para dar respuesta a la consulta planteada, hemos analizado la legislación general y ambiental, jurisprudencia y la doctrina, tanto nacional como comparada, existente sobre la materia.

[1] En colaboración con Valeria Ruz, abogado, especializada en derecho ambiental.

El presente informe se compone del análisis, en primer lugar, del Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental y sus objetivos. A continuación, revisaremos que se entiende por proyecto o actividad dentro del marco de este sistema de evaluación para posteriormente analizar el rol que desempeña el titular dentro de la evaluación ambiental. Finalmente revisaremos las facultades de la autoridad ambiental en la materia que nos ocupa para terminar con ciertas conclusiones al respecto.

I. Antecedentes del Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental

Hasta antes de la dictación, en el año 1994, de la Ley Nº 19.300 sobre Bases Generales del Medio Ambiente ("Ley 19.300"), existían en materia de protección ambiental en Chile una serie de normas sectoriales dispersas e inorgánicas. Asimismo, las competencias ambientales estaban repartidas entre diversos organismos, lo cual generaba un alto grado de confusión y un consecuente incumplimiento. La Ley 19.300 vino a constituir el primer cuerpo normativo que recogía en forma integrada y global los principales temas ambientales y los principios que debían ser el sustento y fundamento de cuerpos legales posteriores[2]. Además dicha Ley estableció un organismo encargado de la coordinación de la institucional ambiental al crear la Comisión Nacional del Medio Ambiente ("CONAMA")[3].

Dentro de las disposiciones de la Ley 19.300, específicamente en su título II respecto de los instrumentos de gestión ambiental, se establece el Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental ("SEIA"). Este sistema, según lo señalado por la CONAMA, es un instrumento de gestión diseñado para introducir la dimensión ambiental en el diseño y ejecución de proyectos o actividades que se realicen en el país. Se trata de asegurar que los proyectos del sector público y del sector privado sean sustentables desde el punto de vista ambiental.

[2] Mensaje de S.E. el Presidente de la República, don Patricio Aylwin Azocar, con el que envió al Congreso Nacional el Proyecto de Ley de Bases del Medio Ambiente.
[3] La CONAMA es un servicio público, funcionalmente descentralizado, con personalidad jurídica y patrimonio propio, sometido a la supervigilancia del Presidente de la República y con una función eminentemente coordinadora de la gestión ambiental de los distintos Servicios Públicos.

El SEIA, mecanismo establecido en la Ley 19.300, se encuentra en plena vigencia a partir del 3 de abril de 1997, fecha en la cual se publicó el Decreto Supremo Nº 30/97, del Ministerio Secretaría General de la Presidencia, que aprobó el Reglamento del Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (El "Reglamento")[4].

La Ley 19.300 establece que ciertos proyectos o actividades, en atención a sus características, localización o magnitud sólo podrán ejecutarse o modificarse previa evaluación de su impacto ambiental. Dichos proyectos o actividades se encuentran enumerados en el artículo 10 de la Ley 19.300.

El titular de todo proyecto o actividad que se someta al SEIA lo hará presentando una Declaración de Impacto Ambiental ("DIA"), salvo que dicho proyecto o actividad genere o presente alguno de los efectos, características o circunstancias contemplados en el artículo 11 de la Ley 19.300, en cuyo caso se deberá presentar un Estudio de Impacto Ambiental ("EIA").

La DIA es un procedimiento simplificado establecido para aquellos proyectos o modificaciones de los mismos que no generen ninguno de los impactos previstos en el artículo 11 de la Ley 19.300. En cambio, en un EIA el procedimiento es más complejo y detallado que respecto de una DIA, básicamente debido a que el proyecto produce uno o más impactos ambientales de los indicados en el artículo 11 de la Ley 19.300. El EIA requiere el desarrollo de una línea de base, análisis de los impactos, medidas de mitigación, compensación y reparación, así como la indicación del marco legal aplicable al proyecto. Generalmente, debido a la cantidad y calidad de la información requerida la elaboración de un EIA conlleva mayor tiempo de preparación y recursos que una DIA.

La respectiva Comisión Regional del Medio Ambiente ("COREMA") o la Dirección Ejecutiva de la CONAMA según el caso[5], se limita en una primera revisión del

[4] Posteriormente modificado por el D.S. 95/2002 de la SEGPRES.
[5] El artículo 9 de la Ley 19.300 señala que: "*Las DIAs o los EIAs se presentarán, para obtener las autorizaciones correspondientes, ante la Comisión Regional del Medio Ambiente de la Región en que se realizarán las obras materiales que contemple el proyecto o actividad, con anterioridad a su ejecución. En los casos en que la actividad o proyecto pueda causar impactos ambientales en zonas situadas en*

proyecto a verificar que la respectiva DIA o EIA cumpla con los requisitos formales establecidos en los artículos 12 al 16 del Reglamento.

El órgano administrativo entonces, sólo verifica el contenido de fondo de los documentos acompañados y sus impactos, una vez que la respectiva DIA o el EIA haya sido admitido a tramitación.

Este procedimiento, a grandes rasgos, está compuesto de los siguientes trámites: En primer lugar, como ya lo indicáramos, el titular del proyecto o actividad deberá efectuar la presentación del EIA o DIA ante el organismo ambiental competente. Una vez efectuada dicha presentación, la autoridad ambiental respectiva realizará un examen de admisibilidad el cual contempla aspectos formales de dicha presentación, sin entrar al fondo del asunto. Posteriormente se realizarán las medidas de publicidad pertinentes para dar a conocer la evaluación del proyecto o actividad a la comunidad. Asimismo, la autoridad procederá al envío de los ejemplares del respectivo estudio o declaración a los órganos con competencia ambiental, quienes pueden pronunciarse de forma favorable o bien solicitar aclaraciones, rectificaciones o ampliaciones al estudio o declaración, las que en ese caso deberán ser presentadas por el titular. Luego, se procederá a la formulación del informe técnico consolidado, el cual será visado por los órganos con competencia ambiental y remitido a la CONAMA o COREMA para la elaboración de la resolución final. Hay que destacar que el EIA, a diferencia del DIA, tiene contemplada una etapa de participación formal por parte de la ciudadanía, estableciendo un plazo de 60 días para ello desde la publicación del respectivo extracto. Las observaciones formuladas por la comunidad son vinculantes en cuanto a su consideración para la autoridad ambiental, quien deberá ponderarlas en la resolución de calificación ambiental.

Este procedimiento concluye con la dictación de un acto terminal cual es la resolución de calificación ambiental, la que como indica su nombre, califica ambientalmente el

---

distintas regiones, las Declaraciones o los Estudios de Impacto Ambiental deberán presentarse ante la Dirección Ejecutiva de la Comisión Nacional del Medio Ambiente".

proyecto, aceptando su realización, aprobando su ejecución sujeta a ciertas condiciones o exigencias (caso EIA) o bien denegándola.

II. Objetivo del SEIA

Una vez explicado sintéticamente en que consiste el SEIA, es importante determinar que se persigue con este sistema, cual es su finalidad y por tanto importancia y aporte dentro de la normativa ambiental. Al respecto podemos señalar que el SEIA es un instrumento de gestión ambiental que se encuentra reconocido en el título II de la Ley 19.300. Este sistema antes de ser establecido en Chile ya había sido reconocido en un grupo de países los cuales llevan casi cuarenta años implementándolo[6].

La Evaluación Ambiental, según lo indicado por el artículo 2 letra j) de la Ley 19.300, es "*el procedimiento a cargo de la Comisión Nacional del Medio Ambiente o Comisión regional respectiva, en su caso, que en base a un estudio o declaración de impacto ambiental determina si el impacto de una actividad o proyecto se ajusta a las normas vigentes*". (el subrayado es nuestro).

El SEIA, según lo señalado por la CONAMA, es un instrumento de gestión que permite introducir la consideración ambiental en los proyectos de inversión. El objetivo de la evaluación de impacto ambiental es asegurar que proyectos tanto del sector público como privado sean sustentables desde el punto de vista del medio ambiente. Así entonces el SEIA debe entenderse como "*el conjunto de procedimientos que tiene por objeto identificar y evaluar los impactos ambientales que un determinado proyecto o actividad generará o presentará; permitiendo diseñar medidas que reduzcan los impactos negativos y fortalezcan los impactos positivos. Parte importante de estos procedimientos se sustenta en la participación de los órganos de la Administración del Estado con competencia ambiental y/o que otorgan permisos ambientales sectoriales vinculados con el proyecto o actividad*" [7].

[6] Urrutia Riesco José Antonio. "Implementación del Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental en Chile". Derecho del Medio Ambiente. Congreso Internacional. Fundación Facultad de Derecho Universidad de Chile. Editorial Jurídica Conosur Ltda. Chile. 1997.
[7] Ver www.seia.cl.

Otro aspecto importante del SEIA que conviene destacar es su carácter de procedimiento reglado. Esto ha sido confirmado por la propia Contraloría General de la República al indicar que *"El procedimiento administrativo para evaluar los proyectos o actividades sometidos al Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental debe ajustarse a un procedimiento reglado en el que se ha contemplado las instancias necesarias para que, además del titular del proyecto, puedan intervenir en él las organizaciones ciudadanas y personas naturales interesadas y los órganos de la administración del Estado con competencia ambiental*". Por tanto este sistema configura, como lo indicáramos, un procedimiento reglado, es decir "*un conjunto de actos administrativos vinculados a una determinada decisión de la autoridad a cuyo respecto la ley establece reglas precisas que deben ser respetadas por el órgano emisor, el que en este ámbito carece de facultades discrecionales, sin que pueda apartarse de tales normas en lo concerniente a los requisitos de forma y fondo de cada uno de dichos actos ni en cuanto a la secuencia procesal que los vincula. Por tanto la incorporación de trámites no previstos en dicho procedimiento (...) infringe el principio de juridicidad*"[8].

Así podemos concluir que el SEIA es un instrumento preventivo en el cual se analizan las variables ambientales de un proyecto determinado y en donde lo evaluado *"es la sujeción de un proyecto a las normas vigentes, por ello que este procedimiento viene a representar un desafío para el estado como ente tutelado del bien común ello debido al hecho que la ley le asigna al Estado el establecer las normas que serán ambientalmente deseables*"[9].

Hay que destacar, por último, que el SEIA considera la evaluación de proyectos individuales dejando de lado orientaciones tales como la evaluación ambiental estratégica cuyo objetivo es superar la evaluación de proyectos, obras o actividades individualmente considerados, comprendiendo dentro de la evaluación planes y

[8] Dictamen Nº 20477 de fecha 20 de mayo de 2003 de la Contraloría General de la República.
[9] Puchi Zurita Rodrigo. "Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental como Instrumento de Gestión Ambiental dentro del Derecho Ambiental". Tesis para optar al Grado de Licenciado en Ciencias Jurídicas y Sociales. Facultad de Derecho. Departamento de Derecho Económico. Universidad de Chile. Chile. 1997. Pág. 220 y 221.

programas y de esta forma contar con un SEIA que abarque todo tipo de planificación[10]. Este tipo de evaluación permite la evaluación ambiental en la etapa de concepto de diseño[11].

III. Definición de Proyecto o Actividad

El artículo 10 de la Ley 19.300 establece los proyectos o actividades que deberán someterse al SEIA en forma obligatoria. Al respecto es importante establecer que se debe entender por proyecto o actividad. Si bien el artículo 10 establece un listado positivo de exclusión respecto a que tipo de proyecto debe ingresar a este sistema, es importante determinar el sentido y alcance de la expresión "proyectos o actividades" en sentido abstracto. Para estos efectos analizaremos el artículo 2 del Reglamento del SEIA que en sus letras b) y d) establece la definición de ejecución y modificación de un proyecto o actividad respectivamente.

El Reglamento entiende por ejecución de un proyecto o actividad "*la realización de obras, acciones o medidas contenidas en un proyecto o actividad y la adopción de las medidas tendientes a materializar una o más de sus fases de construcción, aplicación u operación y cierre y/o abandono*".

Asimismo, por modificación de un proyecto o actividad se entiende "*la realización de obras, acciones o medidas tendientes a intervenir o complementar un proyecto o actividad ya ejecutado, de modo tal que éste sufra cambios de consideración*".

Conjuntamente con esto, el artículo 12[12] y 15[13] del Reglamento establecen dentro de los contenidos que debe tener un EIA o DIA, respectivamente, la descripción del

[10] Si bien se consideró incluir este concepto en el proyecto de Ley de Bases, esto fue descartado en el Congreso.
[11] Astorga Jorquera Eduardo. "Régimen Jurídico de la Evaluación de Impacto Ambiental aplicado a la Actividad Minera Chilena". Memoria de Investigación de presentada para la obtención del grado de Doctor. Universidad de Alicante. Facultad de Derecho. España. 1998. Págs. 69 y 70.

[12] El artículo 12 del Reglamento precisa que el EIA deberá considerar materias tales como una descripción del proyecto o actividad que deberá contener lo siguiente:

- Los antecedentes generales de identificación del titular.

proyecto o actividad. Además, respecto de un EIA y según lo señalado en el artículo 12 del Reglamento, los requisitos, medidas, acciones y otros aspectos deberán cumplirse tomando en consideración las características propias de cada proyecto o actividad.

Hay que señalar que la ejecución de un proyecto o actividad incluye la etapa de levantamiento de información, según puede concluirse del artículo 12 letra c.2) del Reglamento[14], por tanto podemos señalar que ya en esta etapa de levantamiento de información, previa a su presentación, el proyecto o actividad se encuentra definido por el titular.

De lo anteriormente expuesto podemos concluir que proyecto o actividad son aquellas obras, acciones o medidas susceptibles de causar impacto ambiental, en cualquiera de sus fases, que deben someterse al SEIA. Estas obras deben ser descritas en el correspondiente EIA o DIA respecto de sus obras físicas, superficie, monto de inversión, descripción de sus fases, localización, fecha de inicio etc., antecedentes todos que conforman las características propias del proyecto o actividad.

- Su localización según división político-administrativa a nivel regional, provincial y comunal;
- Su localización representada cartográficamente, especificando la siguiente información cartográfica: escala, norte, simbología, grilla de referencia indicando coordenadas, fuente de información y datos geodésicos, cuando corresponda. Se entenderá por datos geodésicos el tipo y parámetros de la proyección, el elipsoide y el DATUM;
- La definición de las partes, acciones y obras físicas que lo componen;
- La superficie que comprenderá;
- El monto estimado de la inversión y la mano de obra asociada, si corresponde;
- La vida útil y la descripción cronológica de sus distintas fases;
- la justificación de su localización, y
- La fecha estimada de inicio de la ejecución o modificación del proyecto o actividad.
- La descripción de la fase de construcción, si la hubiere, indicando las acciones y requerimientos necesarios para la materialización de las obras físicas del proyecto o actividad.
- La descripción de la fase de operación, si la hubiere, detallando las acciones, obras y requerimientos, los procesos unitarios y globales, y el manejo de materias primas, productos terminados e intermedios necesarios para el funcionamiento del proyecto o actividad, considerando sus medidas de mantención y conservación, según corresponda.
- La descripción de la fase de cierre y/o abandono, si la hubiere, detallando las acciones, obras y medidas que implementará el titular del proyecto o actividad.

[13] Por su parte el artículo 15 del Reglamento señala que: *"Las Declaraciones de Impacto Ambiental deberán contener, a lo menos, lo siguiente (...) La descripción del proyecto o actividad que se pretende realizar o de las modificaciones que se le introducirán, definiendo las partes, acciones y obras físicas que lo componen; su vida útil; el plazo estimado de inicio de la ejecución o modificación del proyecto o actividad; y la descripción cronológica de sus distintas fases"*.

[14] Astorga Jorquera Eduardo. Ob. Cit. Pág. 487.

IV. El titular es un sujeto activo en el SEIA

Desde el punto de vista doctrinario podemos señalar que los elementos de evaluación de impacto ambiental son de dos tipos: subjetivo y objetivo. Nos centraremos en este acápite en el elemento subjetivo. Este elemento "*tiene por objeto determinar quien será el responsable de llevar adelante el estudio y será el responsable frente a la autoridad administrativa*"[15], es decir quien será en definitiva el autor del proyecto. En derecho comprado francés dicha responsabilidad puede recaer en el autor del proyecto; en un organismo público; en un organismo independiente o bien puede ser realizado por el autor del proyecto pero sometido al control de un organismo público. Por su parte en el derecho español el estudio puede ser realizado por el promotor del proyecto o bien por una tercera persona extraña al proyecto[16]. En el caso particular de Chile es "*el titular del proyecto el que lleva adelante el procedimiento, ahora es la administración y la ley los encargados de velar por una objetividad que en principio pudiera verse afectada por el hecho de que es el promotor quien lleva adelante el estudio. Aquí es donde surge el principio de responsabilidad que puede tener distintas vías (...)*"[17].

En el mismo sentido se ha pronunciado Eduardo Astorga al señalar que "*dada la capacidad técnica y económica de los Estados latinoamericanos pareciera muy difícil entregar esta responsabilidad a una persona o instancia distinta a la del titular o promotor del proyecto, quien lo puede ejecutar a través de un tercero (empresa consultora), cuya capacidad y seriedad técnica puede quedar avalada mediante un sistema de lista oficial (caso mexicano) o por el propio mercado, el cual va orientando a los privados respecto de cuáles empresas consultoras tienen un mayor prestigio frente a la administración (caso chileno)*".

A mayor abundamiento, del análisis de las normas que regulan la materia no se puede si no concluir que el titular de un proyecto o actividad tiene dentro del marco del

[15] Puchi Zurita Rodrigo. Ob. Cit. Pág.214.
[16] Rosa Moreno Juan. "Régimen Jurídico de la Evaluación de Impacto Ambiental". Editorial Trivium. España. 1993. Pág. 208.
[17] Puchi Zurita Rodrigo. Ob. Cit. Pág. 215.

SEIA un rol activo. A fin de validar esta afirmación, a continuación expondremos una serie de situaciones, en las cuales se pone de manifiesto dicho rol, así como el fundamento jurídico que las sustenta.

1. El titular decide si su proyecto o actividad ingresa al SEIA, no obstante la existencia de un listado obligatorio de actividades o proyectos.

El artículo 10 de la Ley 19.300 es el que establece que proyectos o actividades se encuentran obligados a someterse al SEIA. Este articulo señala un listado positivo de proyectos o actividades que, por sus características, localización o magnitud, deben ingresar al SEIA. Si bien este listado es de carácter obligatorio, dado que en la propia Ley 19.300 se establece que los proyectos o actividades del artículo 10 de dicha ley sólo podrán ejecutarse o modificarse previa evaluación de su impacto ambiental, no se establece una sanción específica para el caso de que un proyecto que, por sus características debió haber ingresado al SEIA no lo haya hecho. En todo caso, esto no importa la impunidad total del titular del proyecto ya que en el evento de que se produzca un daño ambiental y el proyecto hubiere transgredido las normas de protección del medio ambiente establecidas en la Ley 19.300 (entre las cuales está el SEIA) se presume legalmente la responsabilidad (debe entenderse que se refiere a la culpabilidad) del autor del daño ambiental. Además, existen algunos permisos de carácter sectorial y no sectorial que para su otorgamiento requieren de la presentación de la resolución de calificación ambiental favorable, por lo que su no obtención dificultaría o implicaría el no otorgamiento de tales permisos.

Por tanto el titular podría determinar el no ingreso de su proyecto sin riesgo de que se le aplique una sanción específica por ello, salvo las "sanciones" indirectas mencionadas anteriormente.

2. El titular del proyecto o actividad debe determinar las características propias de dicho proyecto o actividad.

El Articulo 17 del Reglamento señala que: "*la Evaluación de Impacto Ambiental se iniciará mediante la presentación del Estudio o de la Declaración de Impacto*

Ambiental, por el titular del proyecto o actividad o su representante, ante la Comisión Regional del Medio Ambiente respectiva o ante la Dirección Ejecutiva de la Comisión Nacional del Medio Ambiente, según lo dispuesto en los incisos segundo y tercero del artículo 9 de la Ley".

Aquella persona natural o jurídica que desee realizar un proyecto o actividad de los descritos en el artículo 10 de la Ley 19.300 deberá elaborar y presentar una DIA o un EIA.

Además y según lo establecido en el artículo 2 letra i) de la Ley 19.300 el EIA *"es el documento que describe pormenorizadamente las características de un proyecto o actividad que se pretenda llevar a cabo o su modificación. Debe proporcionar antecedentes fundados para la predicción, identificación e interpretación de su impacto ambiental y describir la o las acciones que ejecutará para impedir o minimizar sus efectos significativamente adversos*". (El subrayado es nuestro).

En consecuencia es el titular quien, en forma previa a la presentación de su proyecto al SEIA, determina las características propias del proyecto a ejecutar, a través del análisis de distintas alternativas considerando factores económicos, sociales de localización y ambientales, ya que el factor ambiental también implica costos económicos.

A mayor abundamiento, el Reglamento establece, en su Título III, los contenidos que deberá tener la Declaración o en su caso el Estudio de Impacto Ambiental, siendo el titular quien lo elabora y quien en definitiva lo presenta[18]. Dentro de estos contenidos, el artículo 12 del Reglamento precisa, como se indicado anteriormente, que el EIA deberá considerar materias tales como una descripción del proyecto o actividad que deberá contener lo siguiente[19]:

[18] Astorga Jorquera Eduardo. Ob. Cit. Pág.135.
[19] Para el caso del DIA, según lo ya indicado, artículo 15 del Reglamento señala que: *"Las Declaraciones de Impacto Ambiental deberán contener, a lo menos, lo siguiente (...) La descripción del proyecto o actividad que se pretende realizar o de las modificaciones que se le introducirán, definiendo las partes, acciones y obras físicas que lo componen; su vida útil; el plazo estimado de inicio de la ejecución o modificación del proyecto o actividad; y la descripción cronológica de sus distintas fases*".

- Los antecedentes generales de identificación del titular.
- Su localización según división político-administrativa a nivel regional, provincial y comunal;
- Su localización representada cartográficamente, especificando la siguiente información cartográfica: escala, norte, simbología, grilla de referencia indicando coordenadas, fuente de información y datos geodésicos, cuando corresponda. Se entenderá por datos geodésicos el tipo y parámetros de la proyección, el elipsoide y el DATUM;
- La definición de las partes, acciones y obras físicas que lo componen;
- La superficie que comprenderá;
- El monto estimado de la inversión y la mano de obra asociada, si corresponde;
- La vida útil y la descripción cronológica de sus distintas fases;
- la justificación de su localización, y
- La fecha estimada de inicio de la ejecución o modificación del proyecto o actividad.
- La descripción de la fase de construcción, si la hubiere, indicando las acciones y requerimientos necesarios para la materialización de las obras físicas del proyecto o actividad.
- La descripción de la fase de operación, si la hubiere, detallando las acciones, obras y requerimientos, los procesos unitarios y globales, y el manejo de materias primas, productos terminados e intermedios necesarios para el funcionamiento del proyecto o actividad, considerando sus medidas de mantención y conservación, según corresponda.
- La descripción de la fase de cierre y/o abandono, si la hubiere, detallando las acciones, obras y medidas que implementará el titular del proyecto o actividad. (el subrayado es nuestro).

Además, el citado artículo 12 del Reglamento establece que las acciones y obras se deberán describir en consideración a la posibilidad de generarse o presentarse los efectos, características o circunstancias establecidos en el artículo 11 de la Ley.

De lo anterior podemos señalar que los contenidos de los EIA y DIA se encuentran determinados en la normativa ambiental, lo que otorga certeza jurídica en relación a qué es lo que se va a evaluar por la autoridad y determina las características propias del proyecto siendo el titular entonces quien define su proyecto y quien posteriormente lo presenta.

3. El proponente de un proyecto o actividad tiene que determinar si ingresa al SEIA a través de un DIA o EIA.

Tal y como se señala en el artículo 4 del Reglamento: "*el titular de un proyecto o actividad que se someta al Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental, lo hará presentando una Declaración de Impacto Ambiental, salvo que dicho proyecto o actividad genere o presente algunos de los efectos, características o circunstancias contemplados en el artículo 11 de la Ley y en los artículos siguientes de este Título, en cuyo caso deberá presentar un Estudio de Impacto Ambiental*".

Si bien el titular debe atender a los efectos, características y circunstancias generados por el proyecto o actividad, es en definitiva el proponente, quien luego del análisis de los impactos de su proyecto, determina directamente la vía a través de la cual presentará el mismo, sea una DIA o un EIA.

La autoridad ambiental podría realizar, en el caso de la DIA, un examen ex post, al calificar el proyecto, de la decisión adoptada por el titular pero no tiene injerencia al momento de la presentación de la misma por parte del titular. En efecto, esto queda de manifiesto por lo señalado en el artículo 30 del Reglamento el cual señala, a propósito de la evaluación del DIA, que el informe consolidado podrá contener opiniones respecto de sí el proyecto o actividad requiere o no de la presentación de un EIA. Esto obedece a que la autoridad ambiental al momento de efectuar el examen de admisibilidad en virtud del cual se admite a tramitación el EIA o DIA realiza un examen de aspectos formales pero no del fondo del asunto, lo cual puede conducir a que una vez realizada la evaluación del correspondiente DIA, la autoridad ambiental en definitiva determine que el proyecto debió haber ingresado vía EIA.

4. El titular propone las rectificaciones, aclaraciones y/o ampliaciones del proyecto o actividad solicitadas por las autoridades ambientales.

El artículo 23 y 29 del Reglamento, a propósito de las aclaraciones, rectificaciones o ampliaciones de un EIA o DIA respectivamente señala que *"de ser necesario se solicitarán fundadamente las aclaraciones, rectificaciones o ampliaciones que se estimen pertinentes para la adecuada comprensión de dicho estudio"* o *"dicha declaración"*.

Es el titular el que debe preparar y presentar estas aclaraciones, rectificaciones o ampliaciones en el plazo otorgado para ello cuando las autoridades han estimado como no aceptable el grado de información proporcionada por el estudio o la declaración y por tanto requieren mayores antecedentes para una adecuada comprensión del documento presentado. Estas adendas involucran*"una mayor profundización en determinados capítulos del estudio o declaración como también la corrección de errores e inexactitudes"*[20]. Asimismo, en el caso de un EIA, de estimarse por la autoridad que algunas de las medidas de mitigación, compensación o reparación no son suficientes o apropiadas para hacerse cargo de los efectos, características y circunstancias del artículo 11 de la Ley 19.300, el titular podrá proponer a consideración de la autoridad nuevas medidas adicionales o modificaciones.

La autoridad evaluará si con las respuestas contenidas en el o los Adendas se satisface los requerimientos de información solicitados y sobre la base de ello podrá solicitar mayores antecedentes o bien proceder a la elaboración del Informe Consolidado.

Por tanto es el titular quien responde las aclaraciones, rectificaciones o ampliaciones a través del o los adenda(s) pero no es facultad de la autoridad indicar la forma de hacerlo sino sólo el señalar que el proyecto o actividad adolece de inexactitudes, errores, está incumpliendo la normativa ambiental o bien no se está haciendo cargo adecuadamente de los efectos adversos del proyecto.

[20] Astorga Jorquera Eduardo. Ob. Cit. Pág. 153.

V. Facultades de la Autoridad Ambiental en el SEIA

Para los efectos de analizar las facultades de la autoridad ambiental en el SEIA es importante precisar cuál es el objetivo perseguido por dicho sistema y por ende qué es lo que compete a la autoridad ambiental dentro de este proceso.

1. Finalidad de la Evaluación en el SEIA.

Tal y como lo señaláramos en el punto II de este informe, el SEIA busca determinar si el impacto ambiental de una actividad o proyecto se ajusta a las normas ambientales vigentes. Esta finalidad es concordante con aquello que la autoridad debe evaluar y sobre lo cual por tanto debe pronunciarse, encontrándose esto establecido respecto de un EIA en el artículo 37 del Reglamento al señalar que: "*Tratándose de un Estudio de Impacto Ambiental, si la resolución es favorable pura y simplemente o sujeta a condiciones o exigencias, ésta certificará que se cumple con todos los requisitos ambientales aplicables; que el proyecto o actividad cumple con la normativa de carácter ambiental, incluidos los requisitos de carácter ambiental contenidos en los permisos ambientales sectoriales que se señalan en el Título VII de este Reglamento, cuando corresponda, y que, haciéndose cargo de los efectos, características o circunstancias establecidos en el artículo 11 de la Ley, se proponen medidas de mitigación, compensación y reparación apropiadas*". Respecto de una DIA el artículo 38 del Reglamento señala que: "*si la resolución es favorable, ésta certificará que se cumplen con todos los requisitos ambientales aplicables y que el proyecto o actividad cumple con la normativa de carácter ambiental, incluidos los requisitos de carácter ambiental contenidos en los permisos ambientales sectoriales que se señalan en el Título VII de este Reglamento*". (el subrayado es nuestro).

Las facultades de los órganos de la Administración del Estado competentes que participen en la evaluación del EIA también tienen esta orientación, tal y como se señala en el artículo 23 del Reglamento, al indicar que los informes de dichas autoridades "*deberán indicar fundadamente si el proyecto o actividad cumple con la normativa de carácter ambiental en el ámbito de sus respectivas competencias, incluidos los permisos ambientales sectoriales, si corresponde. Asimismo, deberán*

opinar fundadamente si las medidas propuestas en el Estudio de Impacto Ambiental se hacen cargo de los efectos, características y circunstancias establecidas en el artículo 11 de la Ley". (el subrayado es nuestro).

Por último y a mayor abundamiento, esto también se recoge en el Informe Consolidado elaborado previo a la dictación de la resolución de calificación ambiental, tal y como se indica en el artículo 25 del Reglamento: *"Asimismo, en dicho informe consolidado sólo se incluirán las opiniones fundadas y aquellas solicitudes de aclaraciones, rectificaciones o ampliaciones al Estudio de Impacto Ambiental que (...) se refieran a materias relativas a acreditar que el proyecto o actividad cumple con la normativa de carácter ambiental, incluidos los permisos ambientales sectoriales, si fuere el caso, o que correspondan a opiniones respecto de las medidas propuestas en el Estudio de impacto Ambiental para hacerse cargo de los efectos, características y circunstancias establecidas en el artículo 11 de la Ley"*. (el subrayado es nuestro).

Queda claro entonces de los artículos transcritos que la finalidad de la evaluación es que la autoridad ambiental, en el evento de una calificación favorable, certifique el proyecto o actividad que se pretende ejecutar cumple con todos los requisitos ambientales aplicables; que el proyecto o actividad cumple con la normativa de carácter ambiental, incluidos los requisitos de carácter ambiental contenidos en los permisos ambientales sectoriales y que respecto de un EIA el titular se hace cargo de los efectos, características o circunstancias establecidos en el artículo 11 de la Ley, 19.300 proponiendo las respectivas medidas de mitigación, compensación y reparación apropiadas.

Una vez determinado cuál es el objetivo de la evaluación se debe establecer la forma en que la autoridad ambiental puede resolver la evaluación de un proyecto o actividad presentada. Al respecto, el artículo 36 del Reglamento establece a propósito de la resolución de calificación ambiental que *"la resolución que califique el proyecto o actividad contendrá, a lo menos: (...) d) La calificación ambiental del proyecto o actividad, aprobándolo, rechazándolo o, si la aprobación fuere condicionada, fijando las condiciones o exigencias ambientales que deberán cumplirse para*

ejecutar el proyecto o actividad y aquéllas bajo las cuales se otorgarán los permisos ambientales sectoriales que de acuerdo con la legislación deben emitir los organismos del Estado". (el subrayado es nuestro).

Por tanto, la autoridad ambiental está facultada para aprobar o rechazar un proyecto o actividad. Además, en el caso de tratarse de una evaluación de un EIA dicha autoridad podría aprobar condicionalmente un proyecto o actividad. Esto último es especialmente interesante. Estimamos que si bien es cierto la aprobación condicional es una facultad reconocida a dicha autoridad está encuentra sus limites en los principios de certeza jurídica y de juridicidad. En efecto, la aprobación condicional de un proyecto no puede importar la imposición al titular del proyecto de condiciones tan gravosas que transformen en la práctica la ejecución de su proyecto o actividad en inviable. Asimismo tampoco pueden ser estas de una naturaleza tal que impliquen desvirtuar completamente el proyecto original transformándolo en un proyecto completa o sustancialmente distinto.

Entendemos que en la medida que el titular dé cumplimiento a las exigencias de las normativas ambientales vigentes y se haga cargo de los efectos, características y circunstancias del artículo 11 de la Ley 19.300, a través de las medidas de mitigación, reparación o compensación propuestas, se cumple el objetivo del SEIA y por tanto la finalidad que la autoridad ambiental tuvo al evaluar el proyecto. Por lo demás el artículo 19 Nº 21 de la Constitución Política de la República así lo establece al señalar que: "*La Constitución asegura a todas las personas el derecho a desarrollar cualquiera actividad económica que no sea contraria a la moral, al orden público o a la seguridad nacional, respetando las normas legales que la regulen*". Pretender lo contrario importaría en la práctica imponer una traba al desarrollo de una actividad económica más allá del establecimiento de meras restricciones para proteger el medio ambiente o del resguardo del bien común.

En la práctica esto podría dar lugar al absurdo de que un titular presente un proyecto con determinadas características, cuyos costos económicos, sociales y ambientales fueron fruto de un estudio previo y termine, por imposición de la autoridad, con un proyecto completamente distinto, que agrave su situación inicial y que en definitiva

implique la inviabilidad del proyecto y por ende el desistimiento del titular de efectuarlo.

2. Análisis de alternativas en el SEIA.

En Chile, a diferencia de otros países, no está contemplado dentro del SEIA el diagnóstico ambiental de alternativas, dejándose entregado algunos aspectos de la definición del proyecto tales como su localización a los dictámenes del mercado[21]. En Chile es el titular el que elabora un proyecto en base a los contenidos determinados en la propia normativa aplicable y posteriormente lo presenta a la autoridad ambiental competente por la vía que estime aplicable a las características de su proyecto, sea esta una DIA ó un EIA. En consecuencia es el titular quien, en forma previa a la presentación de su proyecto al SEIA, determina las características propias del proyecto a ejecutar, a través del análisis de distintas alternativas considerando factores económicos, sociales, de localización y ambientales, ya que el factor ambiental también implica costos económicos. Por tanto, no corresponde analizar dentro del proceso de evaluación de un proyecto determinado otras alternativas distintas de las propuestas por el titular en la medida que su proyecto cumpla con la normativa ambiental y se haga cargo, si se trata de un EIA, de mitigar los efectos adversos.

En otras legislaciones el análisis de alternativas se encuentra expresamente recogido dentro de la propia legislación en los contenidos de un EIA, de manera tal que el titular debe exponer dichas alternativas al momento de la presentación del proyecto. Así sucede en el derecho francés[22] y en derecho español[23]. Sin perjuicio de esto, este requerimiento sólo implica exponer aquellas otras alternativas posibles al proyecto

[21] Así lo señala Eduardo Astorga al indicar que "*otras grandes falencias que corresponden a la esencia del SEIA chileno son la omisión del diagnostico ambiental de alternativas y que el sistema en cuanto tal, está concebido más que como un instrumento que contempla efectivamente la posibilidad de aprobación y rechazo como un sistema de mitigación*" Jorquera Astorga Eduardo. Ob. Cit.Pág. 71 y 111.
[22] Así el derecho francés reconoce un esquema de EIA en el cual se deben señalar "*las razones especialmente desde la perspectiva ambiental, por las que la alternativa propuesta ha sido adoptada entre las examinadas*". Astorga Jorquera Eduardo. Ob. Cit. Pág. 162.
[23] Por su parte en el derecho español los estudios de impacto se encuentran integrados por puntos tales como "*una parte comparativa. A lo largo del estudio deben ser analizados las diversas alternativas posibles al proyecto y las variantes al mismo, así como justificar la elección de la solución retenida*". Rosa Moreno Juan. Ob. Cit. Pág. 225.

consideradas por el titular pero señalando expresamente aquella alternativa que en definitiva fue adoptada por el proponente y en la cual se basa el proyecto. Por tanto, el análisis de alternativas es una etapa previa al proyecto, como queda manifestado en la legislación comparada citada que ha recogido esta materia. Entendemos que no podría ser de otra forma ya que el titular debe presentar un proyecto concreto a la autoridad ambiental, el cual es el que debe ser evaluado y aprobado, aprobado condicionalmente o rechazado por dicha autoridad. Esta es por lo demás la única forma de definir los aspectos pormenorizados que deben contenerse en un EIA y de evaluar los efectos adversos concretos que generaría ese proyecto determinado. Un análisis detallado de alternativas dentro del EIA llevaría a una determinación conjunta entre el titular y la autoridad del proyecto que finalmente aquel tendría que implementar, lo cual no está contemplado ni cercanamente en la normativa ambiental actual. Por último, un planteamiento de este tipo ocasionaría una indefinición del proyecto de tal naturaleza, que el titular en definitiva no tendría ninguna certeza o seguridad jurídica respecto del proyecto que va a implementar finalmente.

Estimamos que este principio de seguridad jurídica en conjunto con el principio de juridicidad es el fundamento que mueve a nuestro legislador al establecer los contenidos tanto de los EIA y las DIA en la normativa ambiental. Así es fundamental que el ordenamiento otorgue seguridad jurídica al titular de un proyecto respecto a que se evaluará el proyecto que él está presentando en el respectivo documento. Tanto es así que justamente estamos en presencia de un procedimiento reglado, en los términos indicados en el punto II de este informe.

VI. Conclusiones

En base a lo precedentemente expuesto podemos concluir lo siguiente:

1. El objetivo del SEIA es determinar si el impacto de una actividad o proyecto se ajusta a la normativa vigente.

2. El SEIA es un procedimiento reglado de manera que no se pueden incorporar trámites no previstos en dicho procedimiento so pena de infringir el principio de juridicidad.

3. Por tanto en el marco del SEIA, la autoridad ambiental **debe aprobar, aprobar con condiciones o rechazar**. Dicha autoridad ambiental, en el evento de una calificación favorable, debe certificar que el proyecto o actividad que se pretende ejecutar cumple con todos los requisitos ambientales aplicables; que el proyecto o actividad cumple con la normativa de carácter ambiental, incluidos los requisitos de carácter ambiental contenidos en los permisos ambientales sectoriales y que respecto de un EIA el titular se hace cargo de los efectos, características o circunstancias establecidos en el artículo 11 de la Ley, 19.300 proponiendo las respectivas medidas de mitigación, compensación y reparación apropiadas. En el caso de tratarse de una evaluación de un EIA dicha autoridad además podría aprobar condicionalmente un proyecto o actividad. Estimamos que si bien es cierto la aprobación condicional es una facultad reconocida a dicha autoridad está encuentra sus limites en los principios de certeza jurídica y de juridicidad. En efecto, la aprobación condicional de un proyecto no puede importar la imposición al titular del proyecto de condiciones tan gravosas que transformen en la práctica la ejecución de su proyecto o actividad en inviable. Asimismo tampoco pueden ser estas de una naturaleza tal que impliquen desvirtuar completamente el proyecto original transformándolo en un proyecto completa o sustancialmente distinto.

4. En Chile, a diferencia de otros países, no está contemplado dentro del SEIA el diagnóstico ambiental de alternativas. Siendo el titular un sujeto activo dentro del SEIA, es él quien elabora un proyecto en base a los contenidos determinados en la propia normativa aplicable y posteriormente lo presenta a la autoridad ambiental competente por la vía que estime aplicable a las características de su proyecto, sea esta una DIA ó un EIA.

5. En consecuencia es el titular quien, en forma previa a la presentación de su proyecto al SEIA, determina las características propias del proyecto a ejecutar, a través del análisis de distintas alternativas considerando factores económicos, sociales, de localización y ambientales, ya que el factor ambiental también implica costos económicos.

6. De esta manera, y en atención a todo lo anterior, no corresponde analizar dentro del proceso de evaluación de un proyecto determinado otras alternativas distintas de las propuestas por el titular en la medida que su proyecto cumpla con la normativa ambiental y se haga cargo, si se trata de un EIA, de mitigar los efectos adversos.

Santiago, 10 de enero de 2006.

INFORMES RELACIONADOS

Anexo 2.1.A.
Titulo: Estabilidad General de los Glaciares Impactados, Proyecto Pascua Lama
Autores: Golder Associates.

Anexo 2.1.B.
Titulo: Areas de las Cuencas Carmen y Transito v/s Areas del Futro Proyecto.
Autores: CMN LTDA.

Anexo 2.1.C.
Titulo: Comentarios sobre Hielo en Sondajes de Camino y Tunel Proyecto Pascua -Lama
Autores: CMN LTDA

Anexo 2.1.D.
Titulo. Glaciar de Roca en el Sector Nevada Norte.
Autores: Golder Associates.

MEMORANDUM TÉCNICO

Golder Associates S.A.
Av 11 de Septiembre 2353 Piso 2
Providencia, Santiago-Chile

Teléfono: + 56 2 5942000
Fax: + 56 2 5942001

PARA: Mark Rookes **FECHA:** Enero 10, 2006

CC: Dave Maarse; Jeff Schmok

DE: Joaquín Cabello **REF. No:** 059-2701-22000-006

EMAIL:

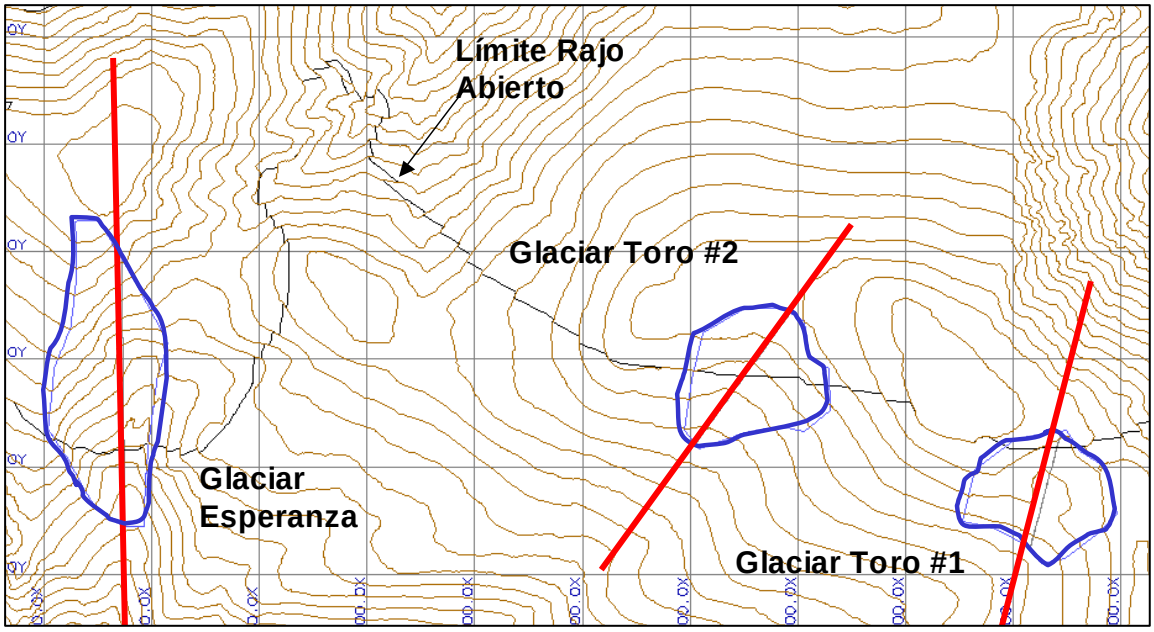
RE: ESTABILIDAD GENERAL DE LOS GLACIARES IMPACTADOS PROYECTO PASCUA LAMA

1.0 INTRODUCCION

El proyecto Pascua Lama incluye la intervención de tres glaciares reservorios de la cuenca El Toro: Toro #1, Toro #2 y Esperanza. La intervención declarada en el EIA tiene relación con la excavación de las partes superiores de cada uno de estos glaciares, y además en el caso de Toro #1, con la construcción de un depósito de hielo sobre su superficie que reciba los hielos excavados.

En ninguna de estas situaciones se planea intervenir el sector del pie de los glaciares o la construcción de obras situadas en las trayectorias de un eventual deslizamiento. La intersección del límite del rajo con los glaciares, o partes de ellos en el caso de Esperanza, Toro #1 y Toro #2, se muestra en la Figura 1.

FIGURA 1: INTERVENCIÓN DE GLACIARES



Todos los glaciares mencionados, sin dejar espacio a la disensión, han sido clasificados como “fríos”, lo cual implica una base del glaciar adherida a la fundación. La fundación por su lado, de acuerdo al plano geomorfológico presentada en la Adenda 2, está afectada por permafrost, la cual proporciona consistencia y resistencia efectiva a los materiales que lo constituyen, trátese éste de depósitos de suelos o roca.

El comentario 2.E del Tercer ICSARA al EIA del Proyecto Pascua Lama señala la caracterización necesaria para evaluar el potencial de deslizamientos catastróficos de glaciares intervenidos, como es el caso de Toro #1. Complementariamente al Anexo III-E, del Segundo Adenda, en el que revisa la estabilidad local del depósito de hielo de Toro #1.

El presente memorando aborda la estabilidad general del Toro #1 en su situación actual y situación con sobrecarga inducida por el depósito de hielo. Además aborda la situación de estabilidad de los restantes cuerpos de hielo después de la intervención por el proyecto. En los análisis de estabilidad se incorpora el supuesto de que la interfase de los glaciares son temperados de modo incorporar una componente conservadora en el análisis; esto significa parámetros de resistencia disminuidos.

2.0 CONTEXTO DEL ESTUDIO

Un deslizamiento catastrófico está asociado al desprendimiento de glaciares enteros, o de partes de glaciares en forma súbita, pendiente abajo y con altas velocidades de desplazamiento.

Lo anterior se entiende como la generación de una superficie de falla que se desarrolla por la base, total o parcialmente, del glaciar relacionado con estados tensionales que exceden las envolventes de falla del hielo, haciéndolo reducir sus propiedades de resistencia las que pueden variar desde un aceleramiento de las deformaciones hasta un deslizamiento súbito.

El presente estudio considera como caso de análisis la generación de una superficie de falla que se desarrolla a lo largo del contacto entre el glaciar y la fundación e involucra el comportamiento global del glaciar. Los análisis serán desarrollados en forma bidimensional mediante técnicas de equilibrio límite con sensibilización de los parámetros de resistencia de la componente crítica del modelo, vale decir del contacto del glaciar con la fundación.

Los análisis son desarrollados mediante el uso del programa computacional SLIDE 5.0 y con los resultados de las prospecciones de terreno. La formulación de parámetros geotécnicos está basada en experiencia adquirida por Golder en el modelamiento y retro análisis de cuerpos de hielo. La resistencia del hielo es función de la temperatura y de la tasa de deformación. En el corto plazo, el hielo presenta una resistencia al corte muy alta, pero en el largo plazo, o a tasas de deformación bajas, el hielo presenta una baja resistencia al corte.

El caso de análisis considera un comportamiento del hielo del corto plazo, es decir una alta respuesta al corte del cuerpo de hielo; sin embargo se modelará un contacto “débil” entre el hielo glaciar y la fundación de modo de inducir una superficie de falla que involucre la estabilidad global del glaciar.

3.0 CARACTERIZACION GEOTÉCNICA

Las prospecciones sobre los tres glaciares ubicados en el entorno de Pascua señalan que en general se trata de glaciares fríos. Estas prospecciones basadas en levantamientos geofísicos con equipos de radar de alta frecuencia (200 Mhz) y observaciones de terreno y de clima, confirman esta condición.

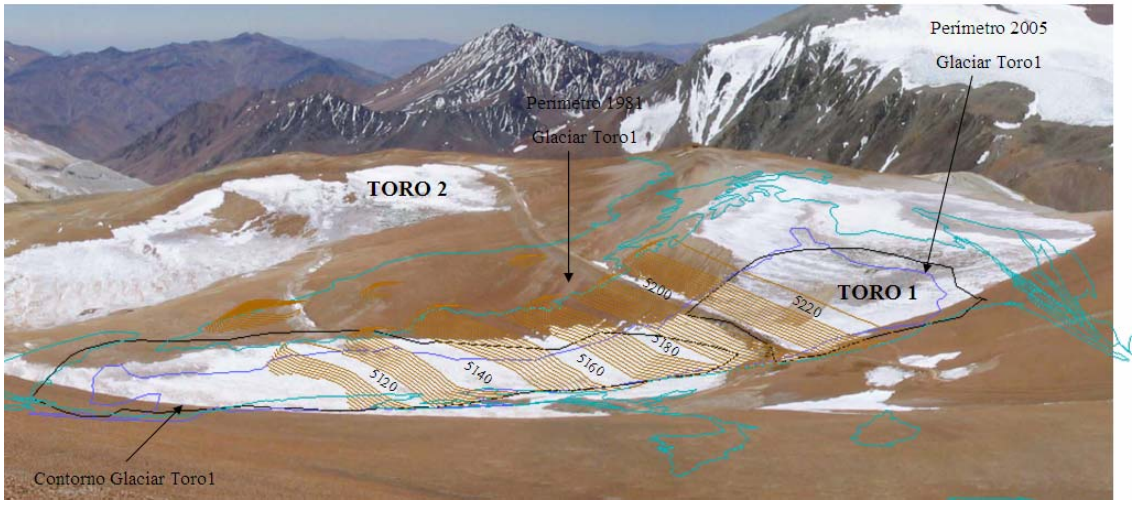
De las observaciones de terreno y de la geología local se asume que los materiales de la fundación están conformados por roca de fundación o suelos congelados, que mientras estén en esa condición trabajarán con esfuerzos efectivos, sin afectación de las presiones de poros.

4.0 ANALISIS DE ESTABILIDAD DE TORO #1

El glaciar Toro # 1 será excavado en su extremo superior en una proporción aproximada de 4% de su volumen total. Más importantemente, este glaciar será usado para la construcción del depósito de hielo requerido por el proyecto con una capacidad de 800.000 m^3 cuya configuración se muestra en la Figura 2.

En la siguiente sección se analiza la estabilidad general del glaciar Toro #1 bajo condiciones de carga asociadas al depósito de hielo. Sin embargo por el impacto menor asociado a la excavación de la parte superior del glaciar, no se analizará el efecto de la excavación sobre el glaciar.

FIGURA 2: CONSTRUCCIÓN DEL DEPÓSITO DE HIELO SOBRE TORO #1



Para los análisis de estabilidad se modeló el perfil longitudinal del glaciar Toro #1, el cual incorpora los mayores espesores de este cuerpo. Las condiciones de borde laterales, de menor espesor del glaciar y de mayor confinamiento 3D, son consideradas factores favorables a la estabilidad general de glaciar.

El modelamiento se realizó considerando el Toro #1 en su condición actual y en su condición con proyecto, es decir con sobrecarga inducida por el depósito de hielo. Las bases topográficas y perfiles GPR longitudinales y transversales, señalan lo siguiente:

i. El glaciar Toro #1 presenta en la superficie una pendiente longitudinal de aproximadamente 17% (10°); la pendiente longitudinal se extiende por 400 m en proyección horizontal;

ii. La superficie reflectora en la base del glaciar se muestra subhorizontal bajo el tercio inferior del glaciar y con pendiente promedio de 27% (15°) en los tramos superiores; el sector subhorizontal se desarrolla aproximadamente en la elevación 5275 m. El depósito de hielo que se propone se desarrolla en el segundo de éstos;

Para la caracterización geotécnica de los materiales se ha recurrido a un modelo de Mohr-Coulomb el cual ha mostrado ser un enfoque razonable:

- depósito de hielo c=0 y phi=30° (c= cohesión phi= ángulo de fricción interna)
- hielo glaciar c=0 y phi=30°;
- interfase entre glaciar y fundación c=0 a 50 kN/m^2; y phi=10° a 30°;
- fundación c=100 a 1000 kN/m^2 y phi=30° a 40°.

El sismo de análisis es el máximo creíble (MCE) equivalente a aceleraciones efectivas máximas del suelo de 0,30 g. Para desarrollar los análisis de estabilidad pseudo estáticos como los que se implementan en equilibrio límite, se recomienda usar el 50% de la aceleración del MCE.

El análisis de sensibilidad de las propiedades geotécnicas de la interfase consideró un rango de variación de la cohesión (c) y del ángulo de fricción interna (phi). Los casos analizados y los resultados obtenidos son los mostrados en la Tabla 1.

TABLA 1: FACTORES DE SEGURIDAD PARA ESTABILIDAD GENERAL DEL TORO #1

Cohesión (kN/m^2)	Ángulo de Fricción (°)	FS estático	FS pseudo estático	Comentario
Glaciar Toro #1 sin depósito de hielo				
0	30	5,8	2,7	
0	20	4,3	2,0	
0	10	2,9	1,3	Caso Más Conservador, Ver Figura 3
25	30	7,1	3,3	
50	30	7,3	3,4	Caso Realista
Glaciar Toro #1 con depósito de hielo				
0	30	2,7	1,7	
0	20	2,1	1,3	
0	10	1,5	1,0	Caso Más Conservador, Ver Figura 4
25	30	3,0	1,9	
50	30	3,0	1,9	Caso Realista

FIGURA 3: MODELO DE DESLIZAMIENTO PARA TORO #1 ACTUAL (CASO ESTATICO)

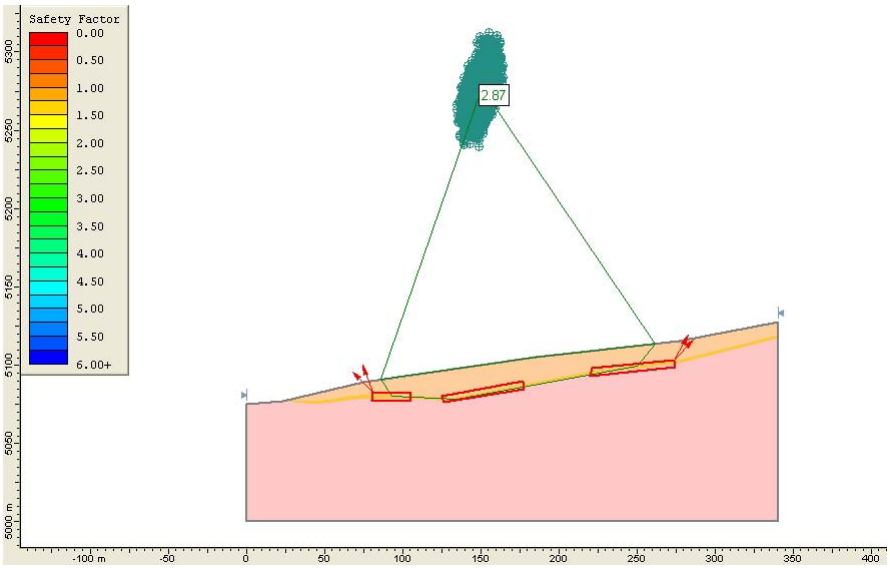
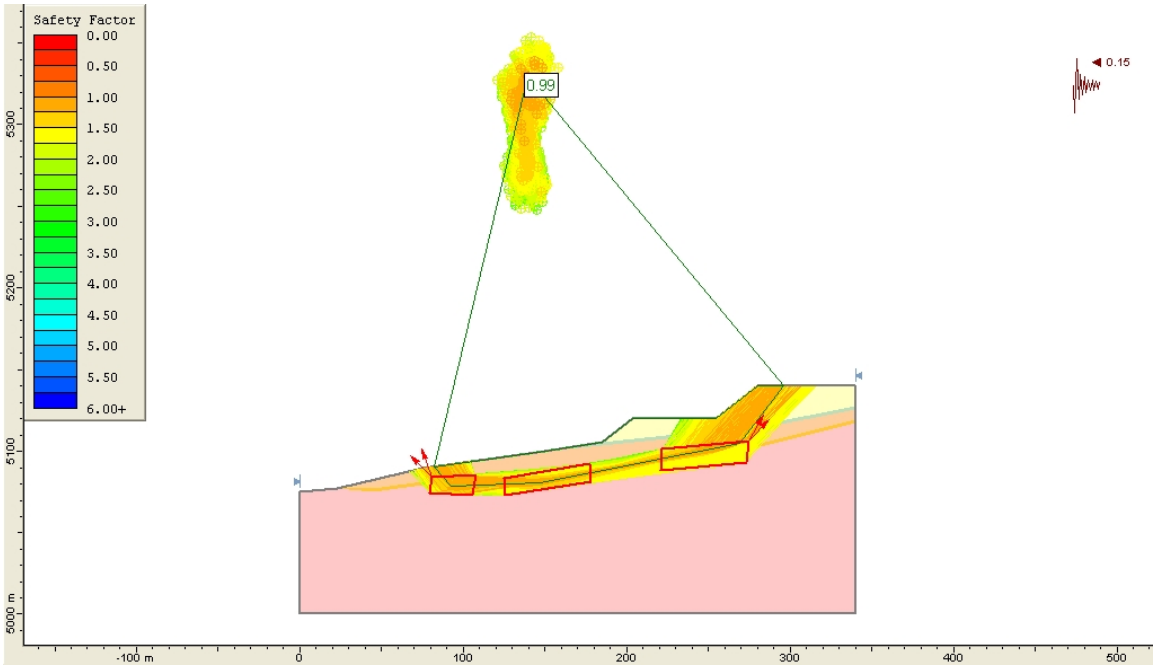


FIGURA 4: MODELO DE DESLIZAMIENTO PARA TORO #1 CON DEPOSITO DE HIELO (CASO SISMICO)



Para Toro #1, donde se construirá el depósito de hielo, se observan condiciones favorables de la fundación:

i. se observa, en el sector de la base del glaciar, parches de afloramientos rocoso indicativo de una roca basal subsuperficial, y/o de depósitos de suelos de pocos espesor;

ii. el mapeo geomorfológico ha definido zonas de permafrost en este entorno

iii. la fundación en el sector del pie del glaciar presentaría, de acuerdo a las prospecciones con GPR un perfil longitudinal subhorizontal

iv. la superficie del glaciar presentaría una pendiente de 10°

Los análisis de estabilidad efectuados para estudiar el comportamiento del Toro #1 consideraron lo siguiente:

i. análisis bidimensionales usando técnicas de equilibrio límite;

ii. la situación actual del glaciar Toro #1, como la que le correspondería considerando la construcción del depósito de hielo sobre él;

iii. propiedades geotécnicas de los materiales, especialmente del hielo glaciar proveniente de estudios de retro análisis que involucran cuerpos de hielo;

iv. un potencial deslizamiento generado a partir de una superficie de falla a lo largo de la interfase de la fundación y el glaciar modelado como bloque;

v. un análisis de sensibilidad de los parámetros de resistencia de la interfase de la fundación y del glaciar;

vi. un sismo de análisis equivalente al máximo creíble de la zona del proyecto, asociado a aceleraciones máximas de 0,30 g.

Los resultados de la Tabla 1 indican primeramente que la construcción del depósito de hielo sobre el glaciar Toro #1 manifiestan un impacto en los factores de seguridad calculados con las premisas previamente indicadas respecto a las propiedades geotécnicas del hielo glaciar y la interfase con la fundación.

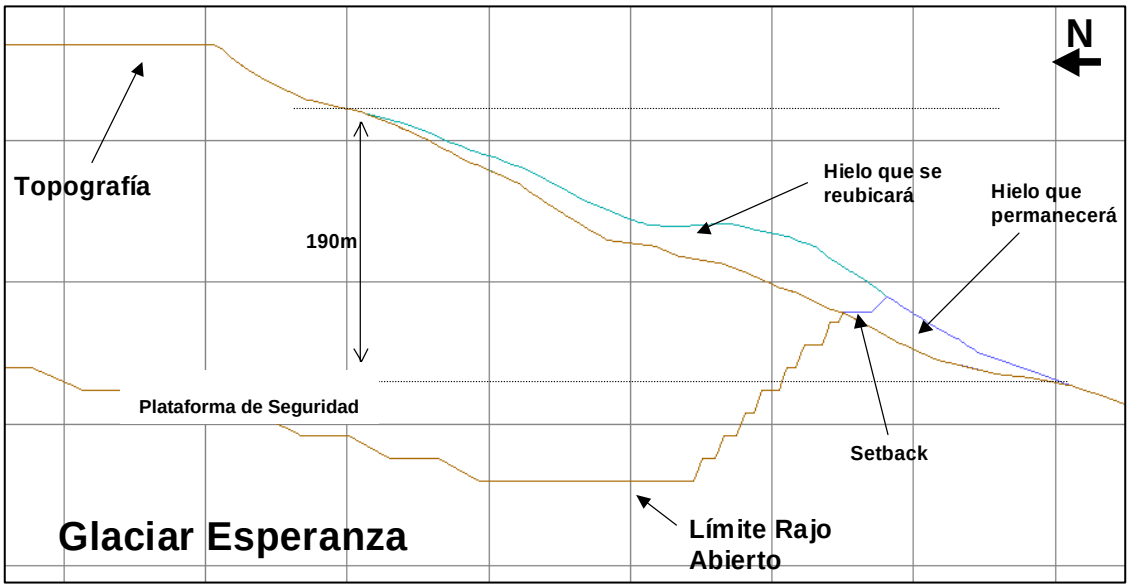
En segundo lugar, los resultados de la Tabla 1 indican que para estados de carga asociados a la construcción del depósito de hielo, se obtiene un factor de seguridad estático de 1,5 considerando una interfase no cohesiva y con un ángulo de fricción de 10° en conjunto con condiciones de la fundación modeladas como c= 100 kPa; phi =30°. Este escenario es considerado conservador aplicable a una condición de hielo temperado sobre la fundación. Los factores de seguridad pseudo estáticos para un MCE es de FS = 1,0.

Para valores de los parámetros de resistencia de la interfase considerados realistas, es decir para los comprendidos en torno a c= 25 a 50 kN/m^2 y phi =30° o superiores, los factores de seguridad estáticos calculados resultan en valores del orden de FS=3.0 para el glaciar cargado con el depósito de hielo.

5.0 ANALISIS DE LA ESTABILIDAD DE ESPERANZA

La Figura 5 presenta la sección longitudinal trazada sobre el glaciar Esperanza indicado en la Figura 1. La pendiente longitudinal de la fundación de Esperanza presenta inclinaciones promedio comprendidas en el rango de 25° (45%) a 30° (60%). La superficie del glaciar presenta un abultamiento en su mitad inferior con espesores máximos de 36 m; la inclinación máxima de la superficie del glaciar es de 35°, pero presenta sectores subhorizontales. Como se aprecia en la Figura 5, la excavación del rajo significará la remoción de un 80% de la porción superior sin intervención directa en el área del pie del glaciar.

FIGURA 5: SECCION LONGITUDINAL DE ESPERANZA



El análisis de las condiciones de estabilidad para este glaciar se desarrolló con las mismas premisas del análisis de Toro #1. Se analizaron los casos para la situación actual del glaciar y la situación cuando el glaciar es excavado de acuerdo al perímetro del rajo.

Los resultados de los análisis, para el rango de los parámetros de resistencia de la interfase son los presentados en la Tabla 2.

TABLA 2: FACTORES DE SEGURIDAD PARA ESTABILIDAD GENERAL DEL ESPERANZA

	Ángulo de Fricción Interna de la Interfase (°)		
Cohesión (KPa)	10	20	30
Situación Actual			
0	0,7 / 0,6	1,0 / 0,7	1,2 / 0,9
25	0,7 / 0,6	1,0 / 0,8	1,3 / 0,9
50	0,8 / 0,6	1,1 / 0,8	1,3 / 1,0
Situación Glaciar Intervenido			
0	0,7 / 0,5	1,1 / 0,8	1,6 / 1,1
25	0,8 / 0,6	1,3 / 0,9	1,6 / 1,2
50	1,0 / 0,7	1,4 / 1,0	1,7 / 1,2
Nota: los pares de puntos representan el factor de seguridad del glaciar Esperanza en su situación actual, y en su situación cuando es excavado con fines mineros.			

El glaciar Esperanza se ha mostrado en la actualidad estable, sin deformaciones detectables, incluso posterior a eventos sísmicos, que no son los máximos registrados. Su condición de estabilidad hace suponer que el factor de seguridad mínimo del glaciar es de FS=1.

Para esta situación, verificando los valores de la parte superior de la Tabla 2, para la situación actual, el ángulo de fricción interna mínimo compatible con este comportamiento es de 20° a 30° posiblemente con cohesiones entre 25 a 50 kPa como mínimo. A modo ilustrativo, las Figuras 6 y 7 representan los escenarios analizados, y muestran los resultados para el caso en que la cohesión c=25 kPa; y el ángulo de fricción interna phi=20°.

FIGURA 6: MODELO DE DESLIZAMIENTO PARA ESPERANZA ACTUAL

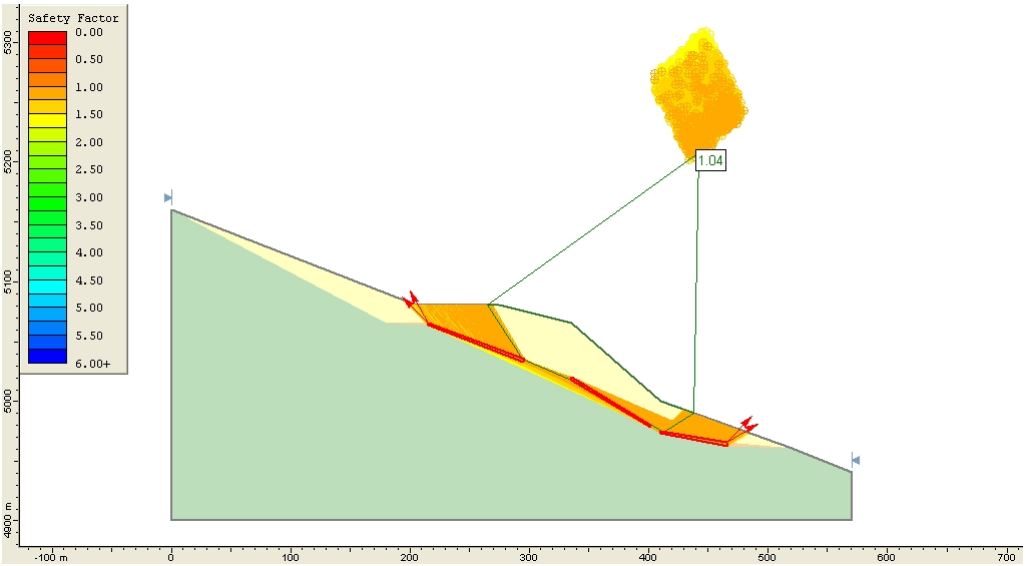
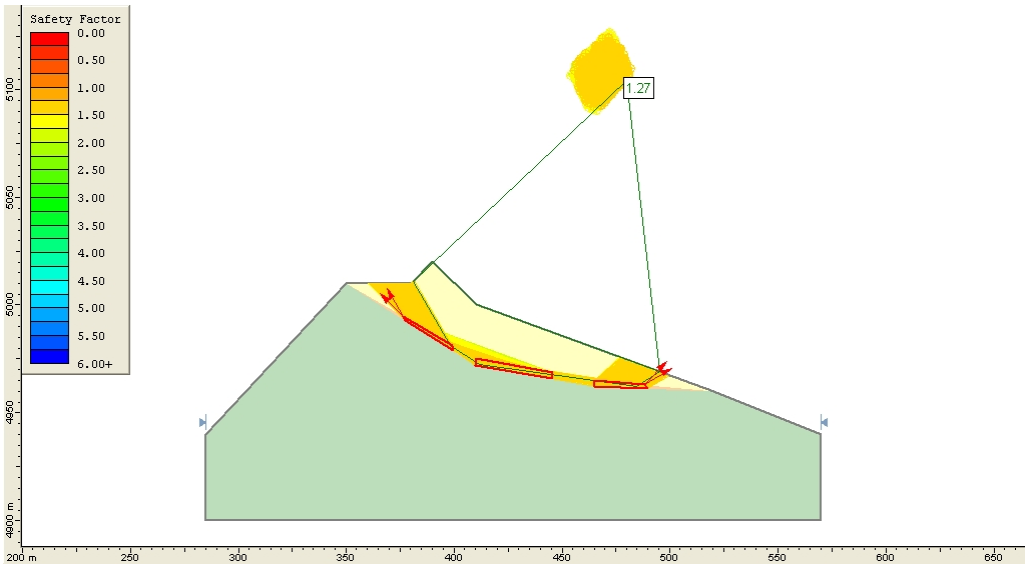


FIGURA 7: MODELO DE DESLIZAMIENTO PARA ESPERANZA INTERVENIDO

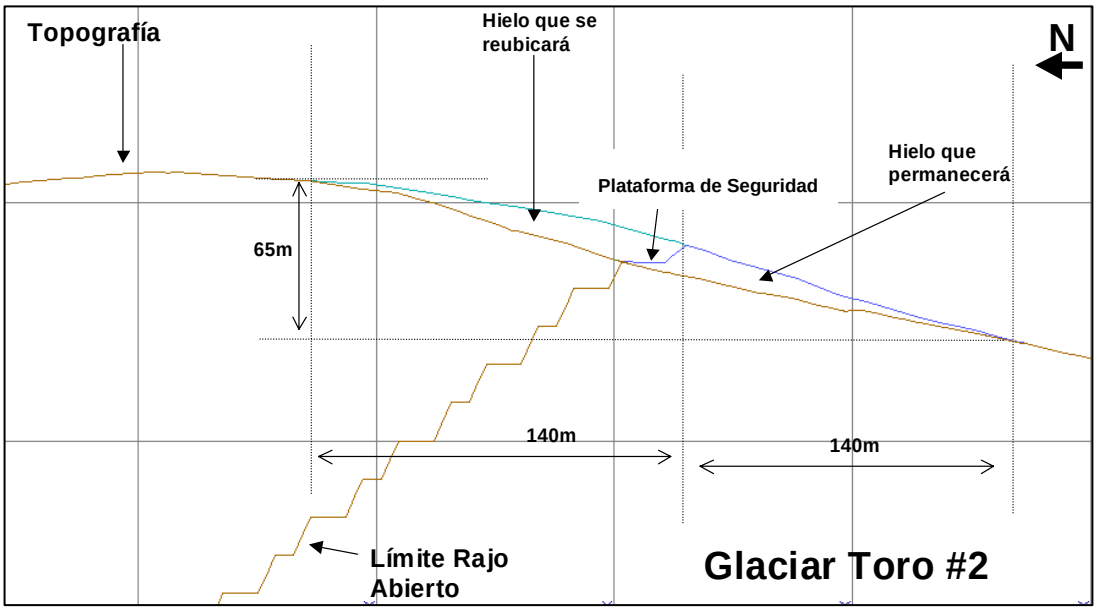


Con cierto grado de independencia de los valores de los parámetros de resistencia que se adopten, pero en particular para valores del ángulo de fricción superiores a 20°, las operaciones de excavación del hielo de la parte superior del Esperanza significarán un impacto positivo en los factores de seguridad del cuerpo de hielo remanente.

6.0 ANALISIS DE LA ESTABILIDAD DE TORO #2

La Figura 8 presenta la sección longitudinal trazada sobre la parte superior del glaciar Toro #2 indicado en la Figura 1. La pendiente longitudinal de la fundación del Toro #2 presenta una inclinación promedio de 25° (45%), siendo la inclinación de la superficie del glaciar levemente superior a este valor. Como se aprecia en la Figura 8, la excavación del rajo significará la remoción de un 50% de la porción superior (28% del total del glaciar) sin intervención directa en el área del pie del glaciar.

FIGURA 8: SECCION LONGITUDINAL DE TORO #2



Siguiendo una argumentación similar a la resultante del análisis de Esperanza, el impacto de la excavación de la parte superior del glaciar Toro #2 implicará condiciones más favorables en la estabilidad del cuerpo de hielo remanente.

7.0 COMENTARIOS

Los glaciares reservorio Toro #1, Toro #2 y Esperanza serán intervenidos por operaciones inherentes al proyecto. Los glaciares serán excavados en su porción superior lo que en general representa un impacto positivo en los factores de seguridad para la estabilidad general. Efectivamente, como se desprende de la Tabla 2, los factores de seguridad aumentan, independientemente de los valores que adopten los parámetros de resistencia.

Para Toro #1, además, las operaciones mineras involucrarán la depositación de los hielos excavados en los tres glaciares sobre su superficie. La evaluación de estabilidad de esta operación, a nivel local fue presentado en el Anexo III-E del segunda adenda, en la que se indicaba que con la secuencia de construcción correcta, la estabilidad de los bancos permitiría una operación segura.

En el presente memorando se presentan resultados que indican que la estabilidad general del Toro #1 sometido a la sobrecarga de este depósito de hielo presenta factores de seguridad sobre los valores permisible, obteniéndose FS del orden de 2. Esto se debe principalmente a la geometría favorable de la fundación en la parte inferior del glaciar la que contribuye con una gran cuña pasiva que logra estabilizar las partes superiores del glaciar; efectivamente, el tercio inferior del glaciar está fundado sobre un terreno sub horizontal el que mejora las condiciones de estabilidad global del Toro #1; los esfuerzos de corte son reducidos como asimismo las deformaciones, aumentando el factor de seguridad. Esto es consistente con el comportamiento observado actual del glaciar donde no se aprecian deformaciones más allá de la atribuidas al comportamiento viscoso del hielo, lo cual es consistente con la hipótesis de glaciar frío.

La construcción del depósito de hielo produce un impacto sobre los factores de seguridad globales haciéndolos disminuir; sin embargo, los factores de seguridad se mantiene muy por sobre los niveles aceptables, sujeto a las condiciones de análisis indicadas: glaciar frío y superficie de falla por el contacto del glaciar y fundación. El confinamiento tridimensional de la cuenca que contiene el glaciar y la disminución de los espesores tanto del glaciar como del depósito de hielo propuesto permiten estimar condiciones de estabilidad superiores a las obtenidas en estos análisis.

La probabilidad de un deslizamiento catastrófico del Toro #1 en su estado actual o futuro con proyecto son estimadas en bajas a muy bajas.

JC/jc

Arch.: Correl. MT0592701-22000-006 Ene 04

BARRICK

COMPAÑÍA MINERA NEVADA LTDA.

Memorandum

M-BDGT001/2006

PARA : Mark Rookes

DE : **Gilberto Traslaviña C.**

FECHA : **09 Enero 2006.**

REF. : **Áreas de las cuencas Carmen y Tránsito v/s áreas del futuro proyecto.**

La temperatura del aire, la radiación solar y el manto de nieve, se consideran como los factores más importantes que influyen sobre la distribución del permafrost de montaña (Hoelzle, 1996). Dichos factores pueden ser modelados para simular la distribución del permafrost en las regiones alpinas con terrenos complejos. Los modelos relacionan observaciones en terreno sobre ocurrencia de permafrost, a factores topoclimáticos tales como altura, pendiente, aspecto, temperatura del aire, radiación solar y manto de nieve, todos los cuales pueden ser medidos o calculados. Estos factores constituyen variables proxy de los factores seleccionados de energía-balance y reflejan una relación simplificada entre el clima y la distribución de permafrost.

En ambientes montañosos, la temperatura del aire se relaciona a la altura y las mediciones se pueden extrapolar utilizando tasas de lapso vertical. El análisis de los registros disponibles en el área de Pascua-Lama, indica que puede presentarse permafrost discontinuo (o posible) desde los 4200 m hacia arriba (utilizando como indicadores glaciares rocosos activos), mientras que se puede anticipar permafrost continuo en cualquier lugar sobre los 5200 m.

A fin de examinar en forma preliminar las áreas relativas de posible/probable permafrost en Pascua-Lama, se utilizó el modelo de elevación digital de toda la cuenca del Huasco para medir las áreas de terreno que se sitúan sobre los 4200 m y sobre los 4800 m. Luego, estas mismas elevaciones se usaron para examinar las zonas en varias sub-cuencas, en el rajo abierto y en el botadero de estériles propuesto.

Los resultados se detallen en la tabla adjunta.

Además se adjunta una lista de papers relacionados con permafrost.

Sobre 4200 msnm

Cuenca Estrecho Superior :

Su área total es de 15.464.880 m2, lo que hace 1.547 hectáreas y el área que intercepta a esta cuenca con la cota 4200, es de 14.335.623,7632 m2, lo que hace 1.433,5 hectáreas, un 92,7%.

En relación al Pit, su área total es 3.439.814 m2, lo que hace 344 hectáreas, y el área del pit que se encuentra en la cuenca es de un 59,2%, es decir, 2.036.545 m2 lo que hace 204 hectáreas.

El Botadero Nevada, su área total es de 3.171.644 m2, lo que hace 317 hectáreas, su totalidad se encuentra e impacta en la cuenca del estrecho, pero solo el 92% del botadero abarca desde la cota 4200.

En resumen, un 92,7% del área de la cuenca es sobre la cota 4200, un 13,2% del área de la cuenca es impactada por el Pit.(204 hectáreas), y un 20,0% del área de la cuenca es impactada por el Botadero.(317 hectáreas).

Cuenca Estrecho Intermedio:

Su área total es de 20.469.959,3473 m2, lo que hace 2.047,0 hectáreas y el área que intersecta a esta cuenca con la cota 4200 para arriba, es de 12.509.699,6231 m2, lo que hace 1.433,5 hectáreas (61,0%). En resumen, un 61% del área de la cuenca es sobre la cota 4200.

Cuenca Toro:

Su área total es de 7.576.061,50 m2, lo que hace 757,6 hectáreas.
La cuenca Toro, se encuentra en su totalidad sobre la cota 4200.

El Pit, impacta con un 10% de su área en la cuenca el Toro, es decir 34,3 hectáreas sobre la cota de 4200.

En resumen, un 100% del área de la cuenca está sobre los 4200 y un 4,5% del área de la cuenca es impactada por el Pit.(34,3 hectáreas)

La subcuenca EL Carmen:

Tiene un área de 3.065.103.964,00 m2, traducido a 306.510 hectáreas. Y el 20% de su área está sobre los 4200 m.s.n.m., es decir 62.215 hectáreas.

La Subcuenca El Transito:

Tiene un área de 4.103.730.994,00 m2, traducido a 410.373 hectáreas. Y el 18% de su área está sobre los 4200 m.s.n.m., es decir 74.601 hectáreas.

Sobre 4800 msnm

Cuenca Estrecho Superior :

Su área total es de 1.547 hectáreas y el área que que se encuentra sobre los 4800, es de 847 hectáreas, es decir, un 55% de la cuenca.

En relación al Pit, su área total es 344 hectáreas y el área del pit que se encuentra en la cuenca es de 204 hectáreas, es decir, 13% de la cuenca lo impacta el pit y el área del pit que se encuentra sobre los 4800, es de 171 hectáreas, es decir, un 11% de la cuenca.

El Botadero Nevada, su área total 317 hectáreas, su totalidad se encuentra e impacta en la cuenca del estrecho, pero el botadero se encuentra bajo la cota 4800.

Cuenca Estrecho Intermedio:

Su área total es de 2.047,0 hectáreas y el área que intersecta a esta cuenca con la cota 4800 para arriba, es de 213 hectáreas, es decir un 10,4% de la cuenca.

Cuenca Toro:

Su área total es de 757,6 hectáreas.
El área sobre los 4800, es de 481 hectáreas, es decir un 63.5% de la cuenca.

El área del Pit sobre los 4800, es de 34 hectáreas, es decir un 4% de la cuenca.

La Subcuenca EL Carmen:

Tiene un área de 3.065.103.964,00 m2, traducido a 306.510 hectáreas. Y el 3,28% de su área está sobre los 4800 m.s.n.m., es decir 10.058 hectáreas.

La Subcuenca El Transito

Tiene un área de 4.103.730.994,00 m2, traducido a 410.373 hectáreas y el 4,44% de su área está sobre los 4800 m.s.n.m., es decir 18.233 hectáreas.

Nota: Debemos destacar que estos cálculos son aproximado y donde se usaron cartas IGM 1:50.000.

Atentamente,

Gilberto Traslaviña C.
Administrador de Base Datos
Departamento de Geologia
Proyecto Pascua-Lama
Cía. Minera Nevada Ltda

c.c. : Archivo

Papers relacionados con el tema:

Corte, A.E. 1976. The hydrological significance of rock glaciers. *Journal of Glaciology17,* 157-158.

Funk, M. & Hoelzle, M. 1992. A model of potential direct solar radiation for investigating occurrences of mountain permafrost. *Permafrost and Periglacial Processes 3,* 139-142.

Garleff, K. & Stingl, H. 1986. Geomorphologische Aspekte aktuellen und vorzeitlichen Permafrostes in Argentiniens. *Zentralblattes für Geologie und Paläontologie 9/10,* 1367-1374.

Schrott, L. 1991. Global solar radiation, soil temperature and permafrost in the central Andes, Argentina: a progress report. *Permafrost and Periglacial Processes 2,* 59-66.

Trombotto, D., Buk., E. & Hernández, J. 1997. Monitoring of Mountain Permafrost in the Central Andes, Argentina. *Permafrost and Periglacial Processes 8,* 123-129.

ESTIMACIONES PRELIMINARES DE POSIBLES ÁREAS DE PERMAFROST, PROYECTO PASCUA LAMA

ÁREAS ASOCIADOS CON EL RAJO Y BOTADERO

Áreas - Hectáreas	Rajo Estrecho	Botadero Estrecho	Rajo Toro	Botadero Toro	Total Rajo	Total Botadero	Total
Sobre 4200 - posible permafrost	204	292	34	0	238	292	530
Bajo 4200	0	25	0	0	0	25	25
Total	204	317	34	0	238	317	555

Sobre 4800 - probable permafrost	171	0	34	0	205	0	205
Bajo 4800	33	317	0	0	33	317	350
Total	204	317	34	0	238	317	555

ÁREAS DE HIELO Y PERMAFROST CONTRA LA CUENCA DE HUASCO (AGUAS ARRIBA DE ALGODONES)

	Área cuenca Km2	Área Glaciares en cuenca Km2	% glaciares in cuenca	Impacto sobre área de glaciares en la cuenca %	Estim Área en la cuenca > 4200m (km2)	Área sobre 4200m. (% de la cuenca)	Área de mina sobre 4200m (% del área total sobre 4200m)	Estim Área en la cuenca > 4800m (km2)	Área sobre 4800m. (% de la cuenca)	Área de mina sobre 4800m (% del área total sobre 4200m)
Carmen	3.065	11,8			622	20%		100	3%	
Transito	4.103	10,8			746	18%		182	4%	
Total	7.168	22,6	**0,3%**	**0,2%**	1368	19%	0,4%	282	4%	0,7%

Área impacto sobre glaciares (5 hectáreas)	0,05	km2
Área impacto mina mas botadero en "posible" permafrost (usando 4200m)	5,3	km2
Área impacto mina mas botadero en "probable" permafrost (usando 4800m)	2,1	km2

Areas del rajo en la cuenca Toro (hectareas)

Sobre TO1A	757
Area sobre 4200m	757
Area sobre 4200m % cuenca	100%
Mina sobre 4200m	34
Mina % cuenca	4%
Mina % area sobre 4200m	4%

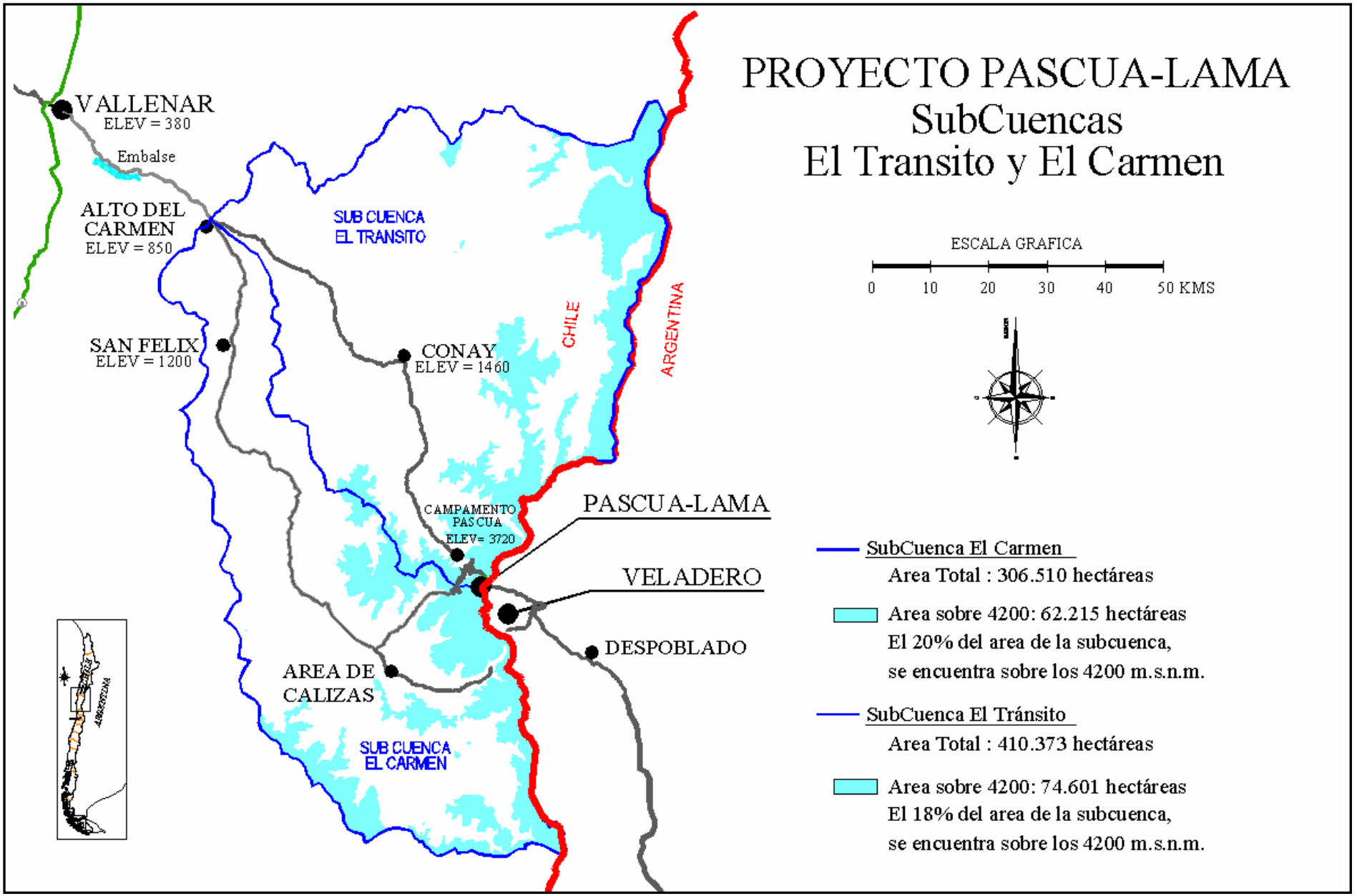
Area sobre 4800m	481
Area sobre 4800m % cuenca	64%
Mina sobre 4800m	34
Mina % cuenca	4%
Mina % area sobre 4800m	7%

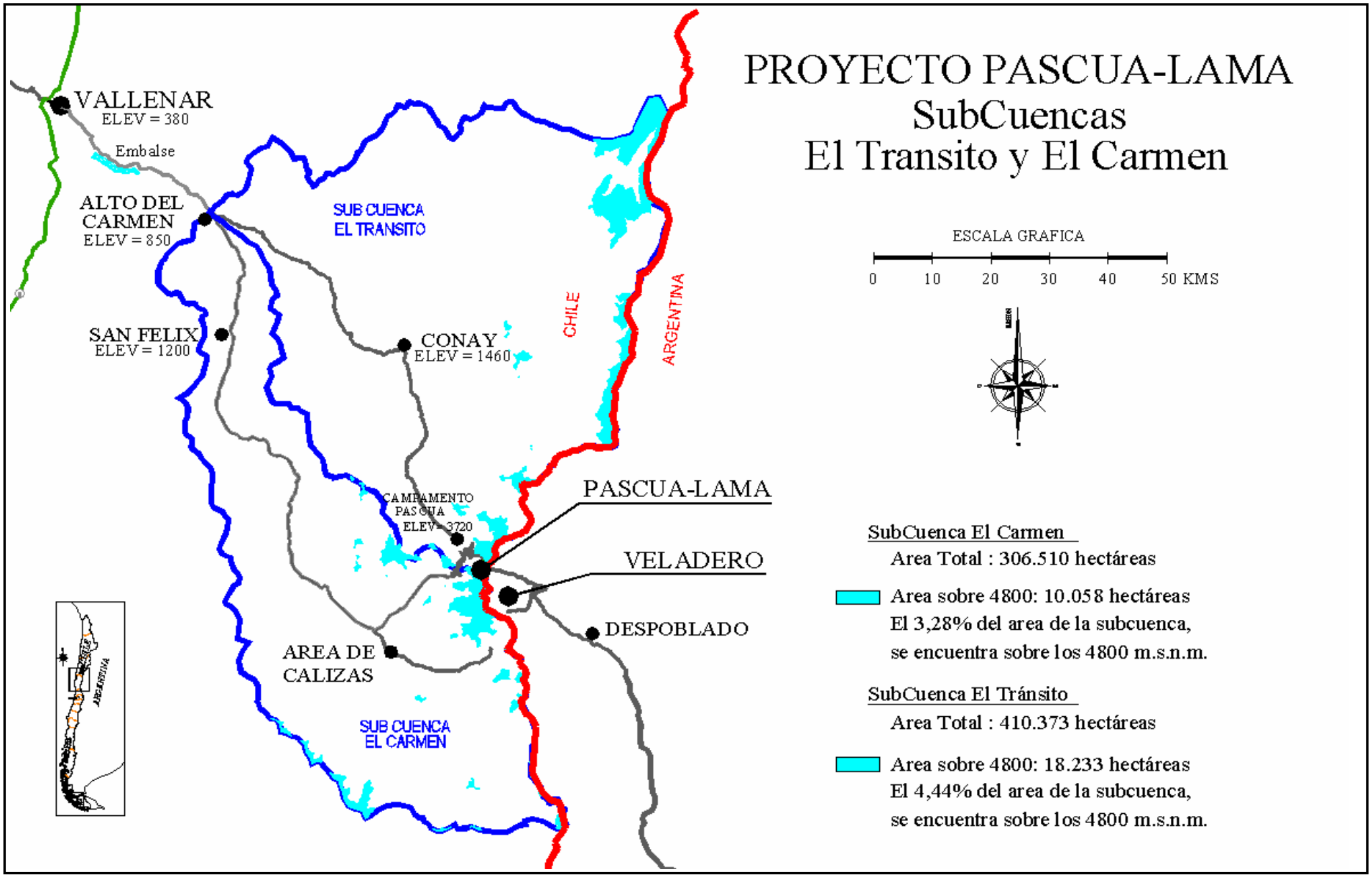
Resumen - Áreas en la cuenca usando 4200m

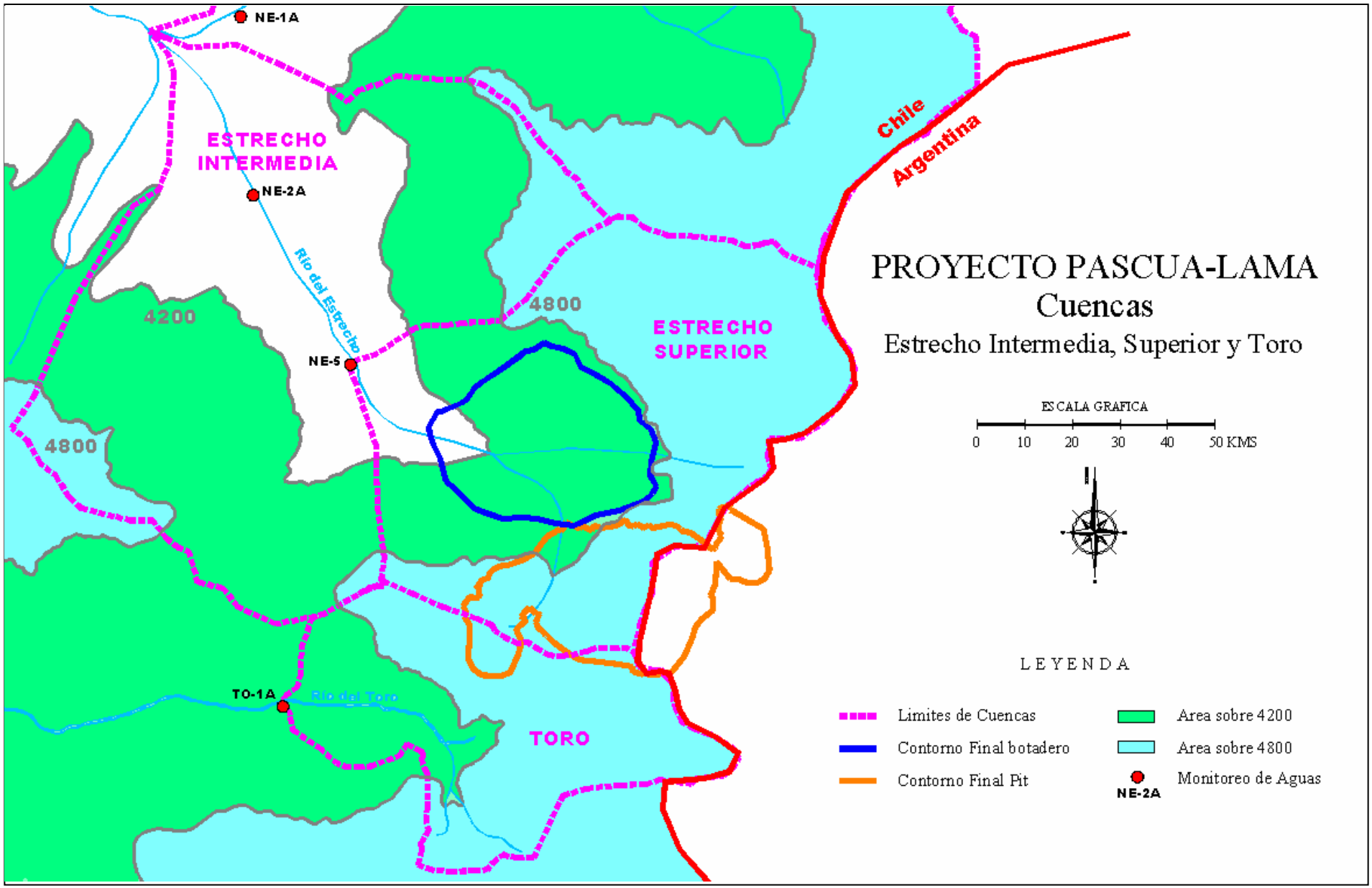
	Km2	% de la cuenca
Glaciares impactadas	0,05	0,001%
Glaciares no impactadas	22,6	0,315%
Área de la mina sobre 4200m	5,3	0,074%
Área de la cuenca sobre 4200m no cubierto por la mina	1340	19%
Terreno normal	5800	81%
Total	7168	100%

Resumen - Áreas en la cuenca usando 4800m

	Km2	% de la cuenca
Glaciares impactadas	0,05	0,001%
Glaciares no impactadas	22,6	0,315%
Área de la mina sobre 4800m	2,1	0,029%
Área de la cuenca sobre 4800m no cubierto por la mina impactado	257	4%
Terreno normal	6886	96%
Total	7168	100%


PROYECTO PASCUA-LAMA
SubCuencas
El Transito y El Carmen
VALLENAR
ELEV = 380
Embalse
ALTO DEL CARMEN
ELEV = 850
SUB CUENCA EL TRANSITO
SAN FELIX
ELEV = 1200
CONAY
ELEV = 1460
CHILE
ARGENTINA
CAMPAMENTO PASCUA
ELEV= 3720
PASCUA-LAMA
VELADERO
DESPOBLADO
AREA DE CALIZAS
SUB CUENCA EL CARMEN
ESCALA GRAFICA
0 10 20 30 40 50 KMS
SubCuenca El Carmen
Area Total : 306.510 hectáreas
Area sobre 4200: 62.215 hectáreas
El 20% del area de la subcuenca,
se encuentra sobre los 4200 m.s.n.m.
SubCuenca El Tránsito
Area Total : 410.373 hectáreas
Area sobre 4200: 74.601 hectáreas
El 18% del area de la subcuenca,
se encuentra sobre los 4200 m.s.n.m.


PROYECTO PASCUA-LAMA
SubCuencas
El Transito y El Carmen
VALLENAR
ELEV = 380
Embalse
ALTO DEL CARMEN
ELEV = 850
SUB CUENCA EL TRANSITO
SAN FELIX
ELEV = 1200
CONAY
ELEV = 1460
CHILE
ARGENTINA
CAMPAMENTO PASCUA
ELEV = 3720
PASCUA-LAMA
VELADERO
DESPOBLADO
AREA DE CALIZAS
SUB CUENCA EL CARMEN
ESCALA GRAFICA
0 10 20 30 40 50 KMS
SubCuenca El Carmen
Area Total : 306.510 hectáreas
Area sobre 4800: 10.058 hectáreas
El 3,28% del area de la subcuenca,
se encuentra sobre los 4800 m.s.n.m.
SubCuenca El Tránsito
Area Total : 410.373 hectáreas
Area sobre 4800: 18.233 hectáreas
El 4,44% del area de la subcuenca,
se encuentra sobre los 4800 m.s.n.m.


NE-1A
ESTRECHO INTERMEDIA
NE-2A
Río del Estrecho
4200
4800
NE-5
ESTRECHO SUPERIOR
4800
Chile
Argentina
TO-1A
Río del Toro
TORO
PROYECTO PASCUA-LAMA
Cuencas
Estrecho Intermedia, Superior y Toro
ESCALA GRAFICA
0 10 20 30 40 50 KMS
LEYENDA
Limites de Cuencas
Contorno Final botadero
Contorno Final Pit
Area sobre 4200
Area sobre 4800
Monitoreo de Aguas
NE-2A

COMUNICACIÓN INTERNA - CMN

A: Mark Rookes
De: Pedro Silva, Geólogo Señor, CMN
Ref.: Comentarios sobre hielo en sondajes, caminos y Túneles, Proyecto Pascua Lama.
Fecha: 09 de Enero de 2006

Estos datos han sido compilados desde la base de Datos Geológica del Proyecto Pascua Lama, donde se ha considerado todos los sondajes realizados durante las distintas campañas de exploración tanto en superficie como desde interior túnel.

Breve Reseña Historica.

La exploración de Pascua Lama data del año 1977, con el descubrimiento de las primeras anomalías en el sector de Esperanza, hacia el año 1996 se descubre el área central del depósito denominado Pascua, dos años posterior a la adquisición de la propiedad por parte de Barrick. A partir de ese año los esfuerzos del grupo de exploración se concentraron en la evaluación de Brecha Central (BC, Cuerpo mineralizado principal), con lo que se da inicio a la construcción del que hoy en día es el primer túnel binacional, Túnel Alex (4680m.s.n.m, 4,8 Km. de galerías y estocadas). Los objetivos de este trabajo fueron reconocer y evaluar BC, conocida sólo a través de sondajes de circulación reversa y algunos sondajes diamantinos. Por otra parte evaluar metalúrgicamente el depósito. En Septiembre 2001, se realiza la construcción del Túnel geometalúrgico cota 4810 m.s.n.m., con claros propósitos de evaluar metalúrgicamente algunas zonas definidas en el nuevo modelo geológico. Las reservas, para fines del 2001 se había incrementado a 17 Moz de Oro y 560 Moz de plata, y ahora no sólo considerando el lado Chileno sino el Argentino. La distribución de las reservas considera que cerca del 75% de ellas se encuentra en el lado Chileno y 25% en el sector Argentino, siendo la principal mena en el país vecino la plata (ver figura adjunto).

Los primeros años de la vida de este proyecto las exploraciones sólo consideraron muestreos en superficie de los escasos caminos existente y de las primeras mallas geoquímicas, sólo después de haber reconocido ciertas anomalías se tomo la decisión en entre los años 1979- 1984 de realizar la primera campaña de sondajes en el área (3734 metros perforados). Intermitentemente desde los años 1984 a 1993 se continuaron con campañas pequeñas, sólo a partir del año 1994 las campañas de perforación fueron más intensas. Desde año 1996, con la construcción del Túnel Alex se realizaron trabajos geológico durante todo el año, antes de eso sólo se había trabajado sólo en verano.

Antecedentes de Sondajes

Con esta historia, en el lado de Chile se realizó un total de 1253 sondajes (327.283m perforados), los que consideraron en superficie 175 sondajes diamantinos (30.094m) y 833 sondajes de circulación reversa (229.566m.), y desde túnel 245 sondajes diamantinos (67.623 m). Para el lado Argentino se realizó un total de 596 perforaciones tanto en superficie como túnel, las que se distribuyen en 201 sondajes Diamantinos

(59.864 m) y 395 sondajes aire reverso (192.401 m). Los objetivos en la perforación de sondajes desde superficie y túnel fueron en principio la búsqueda de nuevos recursos (circulación reversa, RC) y luego la definición y evaluación de estos (Diamantina, DDH y Circulación Reversa, RC). Porcentualmente, el 99% de todos los sondajes perforados en chile, se encuentran por sobre la cota 4200 m.s.n.m, y la mineralización económica se encuentra entre las cotas 4350 m.s.n.m. y los 4950 m.s.n.m. Los registros provenientes del mapeo geológicos de los sondajes realizados en Pascua Lama, en el sector Chileno y Argentino consideraron la descripción sistemática de parámetros geológicos como litología, alteración, estructuras y mineralización, y sólo en casos de presencia evidente de otros parámetros como presencia de hielo, agua. Así se conformó una base de datos bastante consiste donde además se les incluyó leyes, análisis de PIMA, petrografía y geotecnia.

En la oficina de CMN en Alto Penuealas existen todos los logs de los sondajes y entre ellos ellos que muestran que posiblemente podrían haber contenido hielo, principalmente porque no se tuvo recuperación de la muestra, sólo en dos sondajes (DDH169 y DD-055) se menciona “permafrost ó agua, ellos se ubican en el sector de Esperanza (parte central alta) y Pascua Central (Cotas aproximadas sobre 4800 m.s.n.m.).

Los contenidos de hielo en las rocas perforadas y rellenos evidentemente fueron sólo en los inicios de los sondajes en superficie y **del total de los sondajes perforados menos de 5% encontró hielo**. Generalmente el hielo encontrado se ubicaba en el material de relleno coluvial, que corresponde a los primeros metros de roca meteorizada o a francamente rellenos conformados por incluso en mismo material de la plataforma. Cuando se evidenciaba hielo en roca, sólo se encontraba en fracturas pequeñas abiertas y rellenándolas.

Trabajos realizados bajo la cota de 4800m, como sondajes geotécnicos en la actual posición del chancado no han mostrado presencia de hielo, ni siquiera en el material de relleno al inicio de las perforaciones.

Antecedentes de Caminos.

La ejecución de estos 1253 sondajes, la ejecución de los túneles, las mallas geoquímicas y toda la actividad relacionada a la exploración consideraron la construcción de 165Km. de caminos, accesos y plataformas. Caminos de exploración de ancho no superiores a 4 metros y pendientes máximas de 12%, con promedios de 10%. Sólo en las partes altas del área sobre la cota 4800 m.s.n.m., se reconoció la presencia de zonas congeladas que coinciden bien con las descritas como Pascua Central y Esperanza Superior. Nuevamente este hielo se aloja en el coluvio el que corresponde a roca meteorizada y/o suelo, sólo cementado por escaso hielo. La gran mayoría de estas zonas de hielo son estacionarias, acumuladas en invierno y tendientes a desaparecer en verano, tal como se puede apreciar hoy en el terreno. (Fotografías 1,2,3,y 4)



Fotografía 1. Mostrando Estado caminos, sector Pascua Central, sobre cota 4800 m.s.n.m., tomada en Primavera 2004



Fotografía 2. Mostrando Estado caminos, sector Curva Blanca, hacia Esperanza, bajo la cota 4800 m.s.n.m., tomada en Primavera 2004.



Fotografía 32. Mostrando Estado caminos, sector Trece Curvas, bajo la cota 4800 m.s.n.m., tomada en Marzo 2004.



Fotografía 4. Mostrando Estado caminos, sector Pascua Central, cerca cota 4800 m.s.n.m., tomada en Primavera 2004.

Antecedentes de Túnel.

Todos los túnel desarrollados en Pascua a distintas cotas desde la cota 4360 m.s.n.m. a la cota 4944 m.s.n.m., fueron desarrollados en áreas sin aguas, nunca en ninguna galería se encontró napas de agua, ó bolsones de estas, al igual que en los sondajes perforados desde superficie ó desde túnel. Los principales túneles desarrollados en Pascua Lama corresponden a Túnel Alan, (Cota 4369 m.s.n.m., 2 km de desarrollo), Túnel Alex, binacional (4690 m.s.n.m., 4,8 km de desarrollo) y Geometalúrgico (4810 m.s.n.m., con 600 metros de desarrollo). Sólo en los portales de cada Túnel se tuvo y se tiene presencia de humedad, que proviene evidentemente de la fusión de nieve acumulada en la temporada, que percala sin llegar como líquido, sólo humedad y es evidencia por estalactititas de sulfatos que la absorben formada en los primeros metros. (Figura 1)

Otros Antecedentes.

Trabajos más actuales, inclusive todavía en ejecución sólo han mostrado presencia de hielo sobre la cota 4800 m.s.n.m., por ejemplo calicatas realizadas en el. Sector antiguo del chancado y truck shop, mostraron escaso hielo en finas capas o primeros bloques en los primeros metros de suelo meteorizado. (ver Anexo - Observaciones de contenido de hielo en el sector de cabecera del estrecho, proyecto Pascua-Lama)

Proyecto Pascua Lama
Túneles de Exploración

TUNEL	COTA	Metros Lineales
Alan	4360	1584
Nevada	4555	147
Maria	4674	520
Frontera	4678	617
Alex	4690	4606
4715	4715	230
Esperanza	4764	536
Geometalúrgico	4810	445
4922	4922	92
4944	4944	103
	Total	8880 m

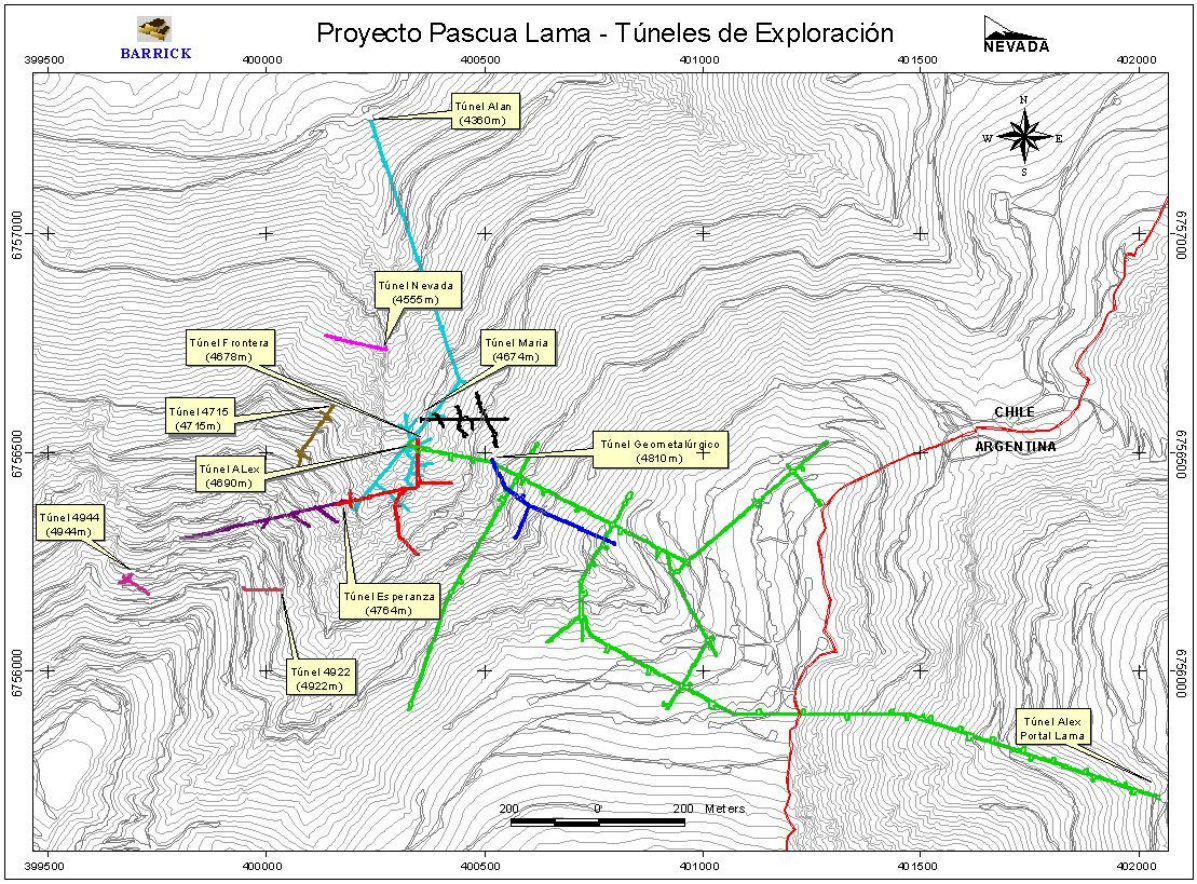
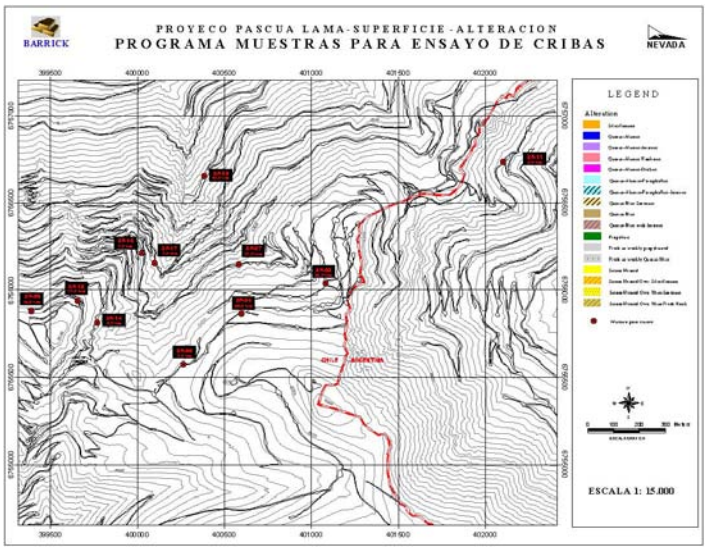


Figura 1. Tabla con la Estadística de los Túneles realizados en el Proyecto Pascua Lama y Mapa de Distribución de ellos.

Resumen

En general, la existencia de hielo encontrado en los sondajes, caminos y Túneles contenidos en los suelos y/o rocas en el Proyecto Pascua Lama, es escaso, sólo evidenciándose en los sectores por encima de la cota 4800, y en forma sectorizada como Pascua Central y Esperanza Superior.

Datos de muestras de superficie, tomadas desde los 0 a 2 metros de profundidad a través de ripeos utilizando un buldózer D8R, mostraron promedios de humedad de 2,3% y muestras tomadas en interior Túnel Alex, presentaron promedios de humedad de 0,9%. Estos datos ayudan a entender la escasa cantidad de humedad, agua ó hielo presente en los primeros metros de suelo y/o roca. (Figura 2).



Porcentaje de humedad muestras Barrick

Pesos en Kgrs.

N° muestra	Peso humedo	Peso seco	% Humedad
SF-03	1,825	1,735	4,93
SF-04	2,080	2,050	1,44
SF-06	2,615	2,575	1,53
SF-07	2,755	2,730	0,91
SF-09	2,040	2,015	1,23
SF-10	2,010	2,005	0,25
SF-11	2,145	2,100	2,10
SF-14	2,020	1,885	6,68
SF-15	2,750	2,630	4,36
SF-16	2,100	2,085	0,71
SF-17	2,230	2,215	0,67
UG-01	2,515	2,495	0,80
UG-03	2,670	2,650	0,75
UG-04	3,085	3,050	1,13
UG-05	2,770	2,755	0,54
UG-06	2,435	2,410	1,03

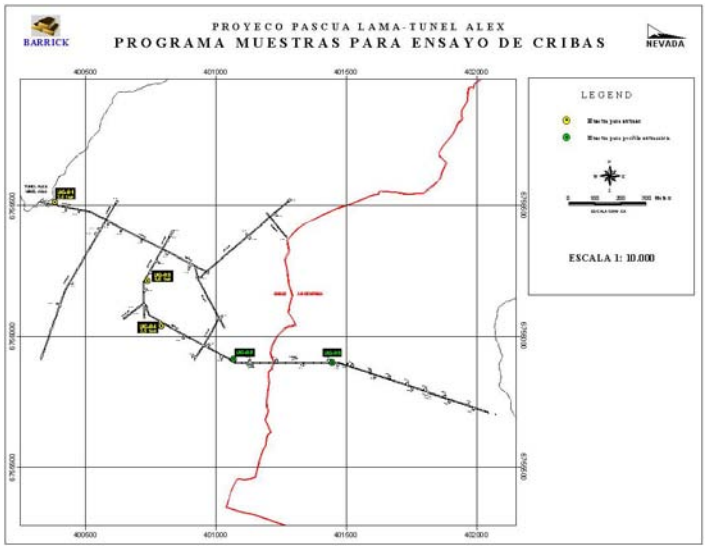


Figura 2. Mostrando ubicación de muestras en Superficie y Túnel, donde se obtuvieron datos de humedad mostrados en tabla arriba. Muestras tomadas en los primeros dos metros desde la Superficie en roca/roca meterorizada, mes de Abril-Mayo 2005.

Anexo

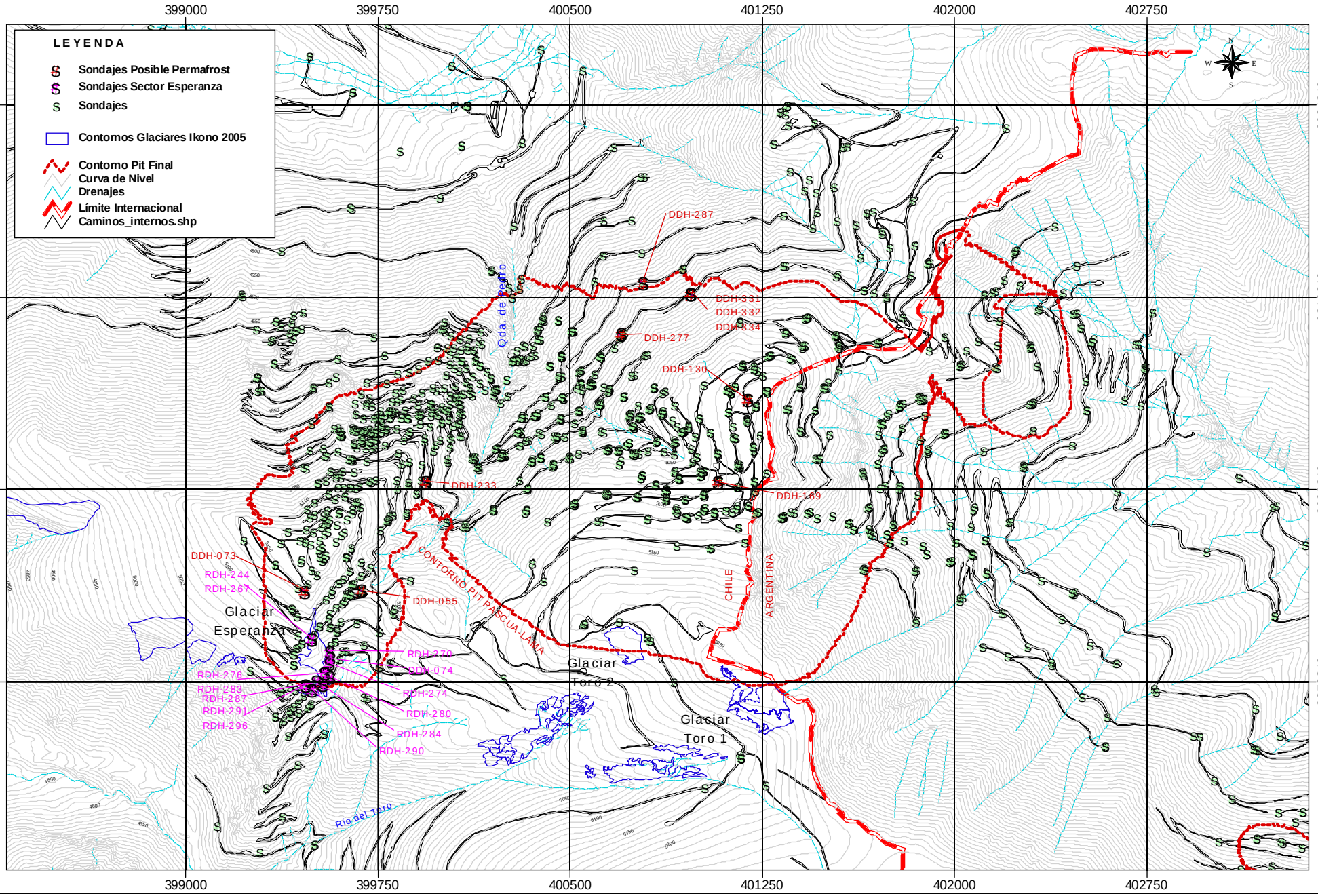
Observaciones de Contenido de Hielo en el Sector de Cabecera del Estrecho, Proyecto Pascua-Lama

Proyecto Pascua -Lama - Sondajes

Escala 1:20.000

0 250 500 750 1000 Meters

Escala Gráfica



MEMORANDUM TÉCNICO

Golder Associates S.A.
Av 11 de Septiembre 2353 Piso 2
Providencia, Santiago-Chile

Teléfono: + 56 2 5942000
Fax: + 56 2 5942001

PARA: Mark Rookes; Pedro Silva **FECHA:** Enero 6, 2006

CC: Jeff Schmok

DE: Joaquín Cabello **REF. No:** 059-2701-2200-008

EMAIL:

RE: OBSERVACIONES DE CONTENIDO DE HIELO EN EL SECTOR DE CABECERA DEL ESTRECHO, PROYECTO PASCUA LAMA

El programa de terreno realizado por Golder en Abril de 2005 en Pascua Lama incluyó 6 calicatas en el sector de la cabecera del valle del Estrecho a elevaciones de terreno comprendidas entre los 4800 m y 4900 m. De estas 6 calicatas, 4 presentaron lentes de hielo contenidos en suelos coluviales e incluso los estratos superiores de rocas intensamente meteorizadas.

El objetivo de las calicatas era el de prospectar preliminarmente los suelos de fundación del área para identificar y clasificar la geología subsuperficial local en apoyo de la ingeniería de las obras contempladas en este sector, vale decir canales, piscinas de acumulación de drenaje ácido de los stockpiles y del chancador que entonces estaba planeado en superficie; no se incluyó en el programa un mapeo detallado de suelos desde el punto de vista del permafrost, por lo que las determinaciones de la presencia de hielo se limitó a su ocurrencia sin presentarse estimaciones exactas de su contenido.

Actualmente (temporada de verano de 2005) se encuentra en curso un programa geotécnico de sondajes diamantinos en este sector de la cabecera del Río del Estrecho y del río Turbio consistente en 3 perforaciones en el sector del chancador y 4 pozos en el trazado del túnel correa. La observación de las características de esta roca, indican que a una profundidad de 20 m la roca se muestra competente, poco fracturada y de baja permeabilidad. Con esto el aporte de agua es limitado y la formación de hielo en profundidad es poco probable.

1.0 PROGRAMA DE CALICATAS

Las calicatas fueron prospectadas con apoyo de una excavadora CAT320 proporcionada por CMN; las ubicaciones fueron definidas por Golder atendiendo a la ubicación de las principales estructuras propuestas en el área. Las calicatas fueron mapeadas durante la excavación, fotografiadas y posteriormente tapadas con el material excavado.

Las profundidades de prospección fueron en todos los casos limitados por la consistencia del estrato excavado, más que por alcance de la excavadora; las profundidades máximas alcanzaron entre 0,7 m y 4,0 m, según se muestra en la Tabla 1. Las calicatas excavadas fueron denominadas CC-17 a CC-20.

Tabla 1: Coordenadas de las Calicatas en el área del Chancador

Calicata	Profundidad máxima excavada (m)	Coordenadas UTM (CMN)	
		Norte	Este
CC-17	4,0	6.757.466	401.812
CC-18	4,8	6.757.434	402.019
CC-19	4,7	6.757.308	401.815
CC-20	5,0	6.757.391	401.518
Nota: calicatas CC-16 y CC-21 no presentaron indicios de lentes de hielo.			

El Anexo A presenta ubicación de las calicatas del sector de la cabecera, los resultados del mapeo geotécnico y algunas fotografías de acercamientos de las calicatas. En todos los casos excavados la consistencia de los materiales es densa permitiendo paredes verticales estables.

2.0 PROGRAMA DE SONDAJES

El programa de sondajes actualmente en curso en el sector del Chancador tiene propósitos geotécnicos solamente, lo cual involucra el mapeo y orientación de los testigos de roca; esta labor se realiza al pie de la máquina perforadora, con que el intervalo de tiempo entre la obtención del testigo y su mapeo detallado es breve. Los sondajes son verticales e inclinados hasta profundidades de 200 m aproximadamente. Las observaciones realizadas no acusan contenidos de hielo pre-existentes en profundidad. En el área del chancador se encuentra en desarrollo un programa más detallado, consistente en la instalación de termistores y mapeo complementario de calicatas para investigar los estratos de suelos más superficiales.

3.0 COMENTARIOS

Las condiciones de temperatura promedio en la estación meteorológica de Frontera (4927 m) indican que las temperaturas oscilarían desde -0,9° en Febrero y -12,3° en Julio.

La ocurrencia de hielo en las calicatas CC-17 a CC-20 se presenta en forma de lentes intersticiales en una matriz de finos de suelos coluviales. Por la ubicación espacial de estas calicatas, el origen más probable de estos hielos está relacionado con la infiltración de las aguas de deshielo que escurren sub-superficialmente desde el glaciar Amarillo (ver Figura 1) en épocas en que de estiaje cuando las temperaturas superan temporalmente los promedios calculados. Los lentes de hielo fueron observados hasta profundidades variables entre 0,7m (CC-20) y 4,0 m (CC-17).

Las dos calicatas restantes (CC-16 y CC-21) consistentemente con su ubicación fuera de las vías de drenaje del glaciar Amarillo, presentada en la Figura B1, no mostraron indicios de lentes de hielo.

La ocurrencia de lentes de hielo en las cuatro calicatas es circunstancial y posiblemente no representa la condición normal. Áreas lejanas a las vías de drenaje del glaciar pueden presentarse secas.

Los sondajes perforados en el reciente programa en las proximidades de CC-21 responden a esta condición donde en general no se evidenció presencia de lentes de hielo.

Para las calicatas CC-17 a CC-20 y debido a que las calicatas y las observaciones realizadas corresponden a Abril de 2005, dando cierre al período de verano y posterior a una reciente precipitación, por un lado, y a término de un ciclo hidrológico relativamente seco del 2004, puede inferirse preliminarmente que los hielos observados comprenden el permafrost en esa área en particular. Para esas calicatas, los contenidos de hielo se restringen a los estratos de suelo. Los porcentajes en peso, basados en las observaciones generales de cada calicata varía entre 10% a 20%. Mediciones adicionales deberían permitir establecer la durabilidad de estos hielos intersticiales para definir el espesor de la capa activa.

En otros sectores, la capa activa puede presentarse a profundidades muy superficiales de pocos decímetros. Para las observaciones realizadas, no fue posible distinguir el aporte de humedad del hielo in situ con el aporte de agua recientemente precipitada pocos días antes de excavar y observar las calicatas.

JC/jc

Arch.: Correl. MT0592701-22000-008 Ene 6

ANEXO A

DESCRIPCIONES ESTRATIGRAFICAS Y

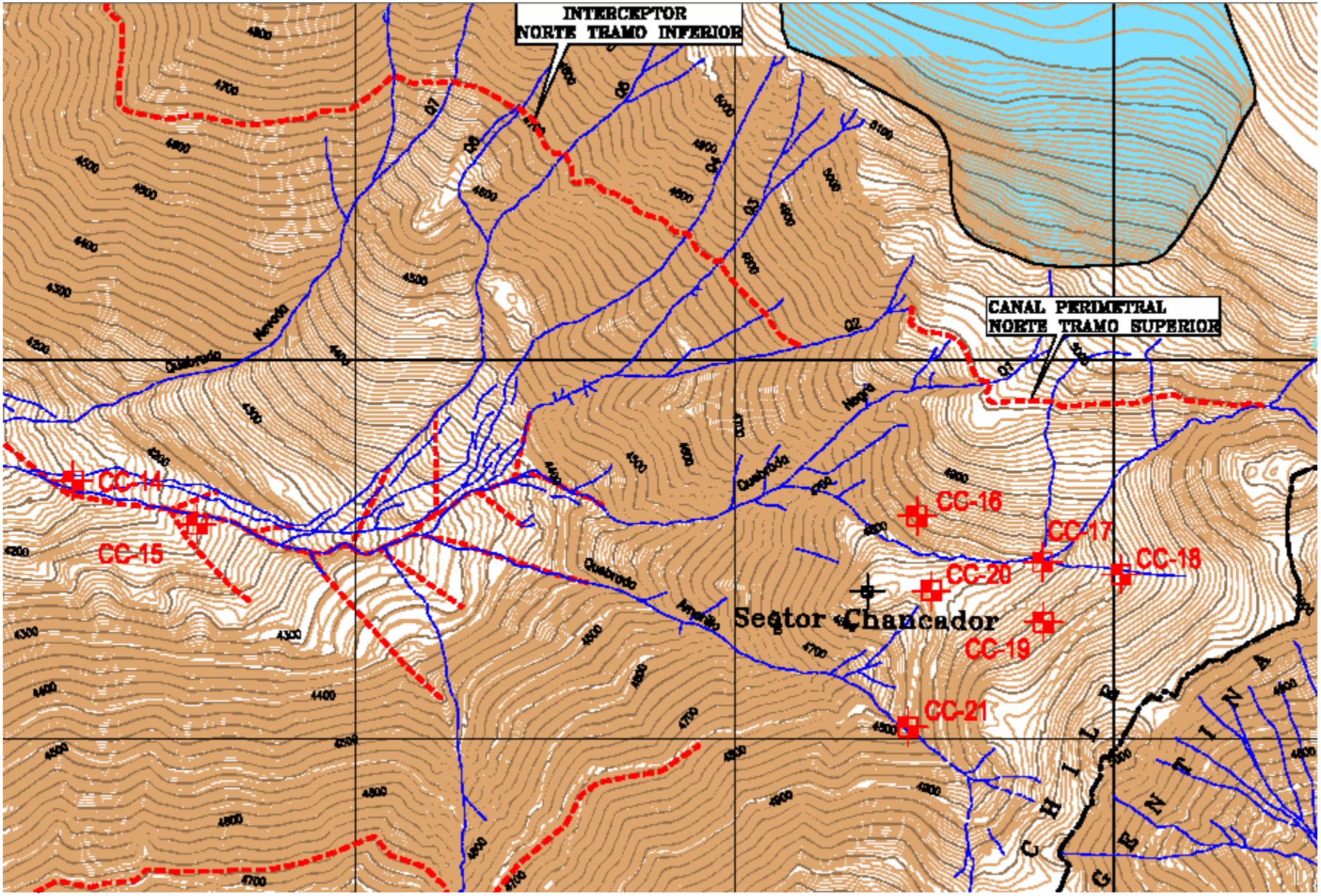
FOTOGRAFÍAS DE LAS CALICATAS

Golder Associates

CALICATAS EXCAVADAS EN EL SECTOR DEL CHANCADOR

Programa de Investigaciones – Proyecto Pascua Lama

FIGURA A1



MAPEO GEOTECNICO CC-17

Programa de Investigaciones – Proyecto Pascua Lama

FIGURA A2

DESCRIPCION ESTRATIGRAFICA VISUAL

Proyecto Manejo de Aguas Superficiales-Pascua Lama/ 059 - 2701

Calicata Nro. CC-17

Ubicación : Pascua Lama-Stockpile
Profundidad Total (m) : 4,00 — Norte : 6.757.466 — Reconoció: Carlos López
Profundidad Napa (m) : No se detecta — Este : 401.812 — Revisó: Loreto Cifuentes
Fecha: 9 de Abril de 2005

Profundidad		Desde (m)	0,00	Horizonte	1	0,60	Horizonte	2	1,20	Horizonte	3
		Hasta (m)	0,60	Espesor	0,60	1,20	Espesor	0,60	4,00	Espesor	2,80
Granulometria Estimada	Total	Tam. Máx (pulg.)	4"			2"			1"		
		Bolones (%>3")	5			--			--		
	Fracción < 3" (76 mm)	Grava (%)	25			25			20		
		Arena (%)	45			40			50		
		Finos (%)	30			35			30		
Color en estado natural :			Pardo Rojizo			Pardo			Pardo Amarillento		
Olor :			--			--					
Graduación :			Mal Graduado			Mal Graduado			Mal Graduado		
Dilatancia :			--			--					
Plasticidad :			Baja			Media			Media a Alta		
Forma de la particula :			Angular a Subangular			Angular a Subangular			Angular a Subangular		
Resistencia seca :			--			--			--		
Humedad :			Media			Alta			Alta		
Consistencia o compacidad :			Densa			Densa			Densa		
Estructura :			Estratificada			Estratificada			Homogénea		
Cementación :			--			--					
Origen :			Coluvial			Coluvial			Roca altamente meteorizada		
Materia orgánica :			--			--					
Simbolo estimado del grupo USCS bajo 3":			SM			SM			SC-SM		
Nombre local del suelo :			Arena gravo limosa con escasos clastos			Arena limosa con gravas			Arena limosa con gravas		
Muestreo	Nro. Muestra / Profundidad (m)										
	Cantidad (kg)										

Nota: Desde el Horizonte N°2 a N°3 se detectan lentes de hielo. A mayor profundidad aumenta la dureza de la roca.

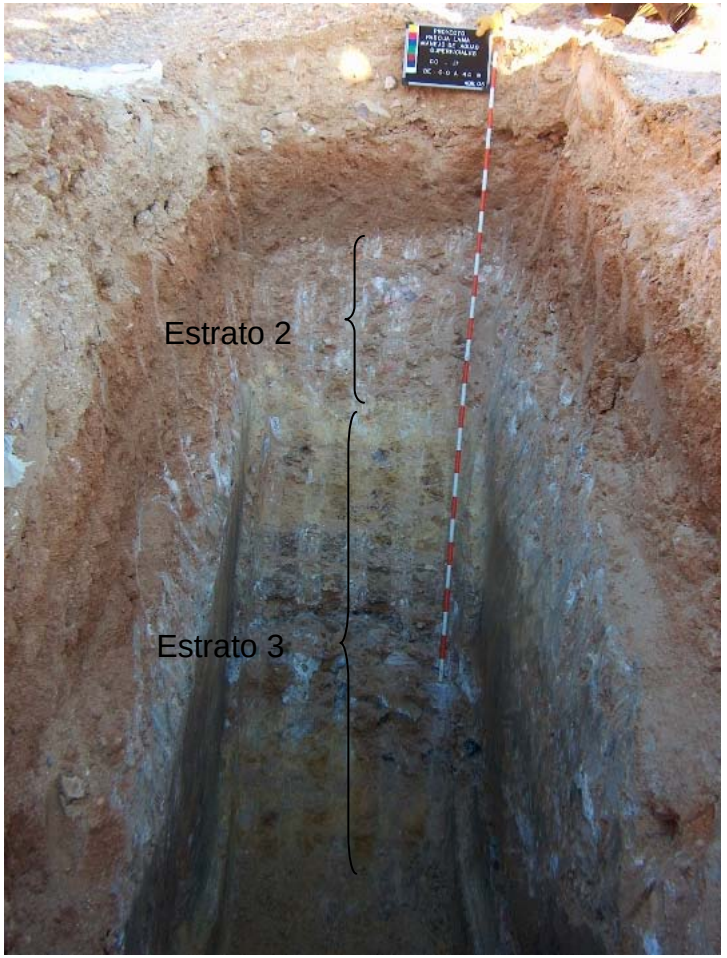




Fecha: Enero 2006

Proyecto MT-059-2701-008





Fecha: Enero 2006

Proyecto MT-059-2701-008

MAPEO GEOTECNICO CC-18

Programa de Investigaciones – Proyecto Pascua Lama

FIGURA A4

DESCRIPCION ESTRATIGRAFICA VISUAL

Proyecto Manejo de Aguas Superficiales-Pascua Lama/ 059 - 2701

Calicata Nro. CC-18

Ubicación : Pascua Lama-Stockpile
Profundidad Total (m) : 4,80 — Norte : 6.757.435 — Reconoció: Carlos López
Profundidad Napa (m) : No se detecta — Este : 402.019 — Revisó: Loreto Cifuentes
Fecha: 9 de Abril de 2005

Profundidad		Desde (m)	0,00	Horizonte	1	0,30	Horizonte	2	3,80	Horizonte	3
		Hasta (m)	0,30	Espesor	0,30	3,80	Espesor	3,50	4,80	Espesor	1,00
Granulometria Estimada	Total	Tam. Máx (pulg.)	--			6"			2"		
		Bolones (%>3")	--			10			--		
	Fracción < 3" (75 mm)	Grava (%)	--			25			15		
		Arena (%)	--			45			50		
		Finos (%)	--			30			35		
Color en estado natural :			--			Pardo Amarillento			Pardo Amarillento		
Olor :			--			--					
Graduación :			--			Mal Graduado			Mal Graduado		
Dilatancia :			--			--					
Plasticidad :			--			Media			Media a Alta		
Forma de la particula :			--			Angular a Subangular			Angular		
Resistencia seca :			--			--			--		
Humedad :			--			Alta			Alta		
Consistencia o compacidad :			--			Densa			Densa		
Estructura :			--			Homogénea			Homogénea		
Cementación :			--			--					
Origen :			--			Coluvial			Roca altamente meteorizada		
Materia orgánica :			--			Sin Indicios			Sin Indicios		
Simbolo estimado del grupo USCS bajo 3":			--			SM			SC-SM		
Nombre local del suelo :			Nieve			Arena limosa con gravas			Arena limo arcillosa con gravas		
Muestreo	Nro. Muestra / Profundidad (m)										
	Cantidad (kg)										

Nota: En el Horizonte N°2 se detectan lentes y estratos de hielo. La dureza del Horizonte N°3 compuesto por roca meteorizada aumenta en profundidad.

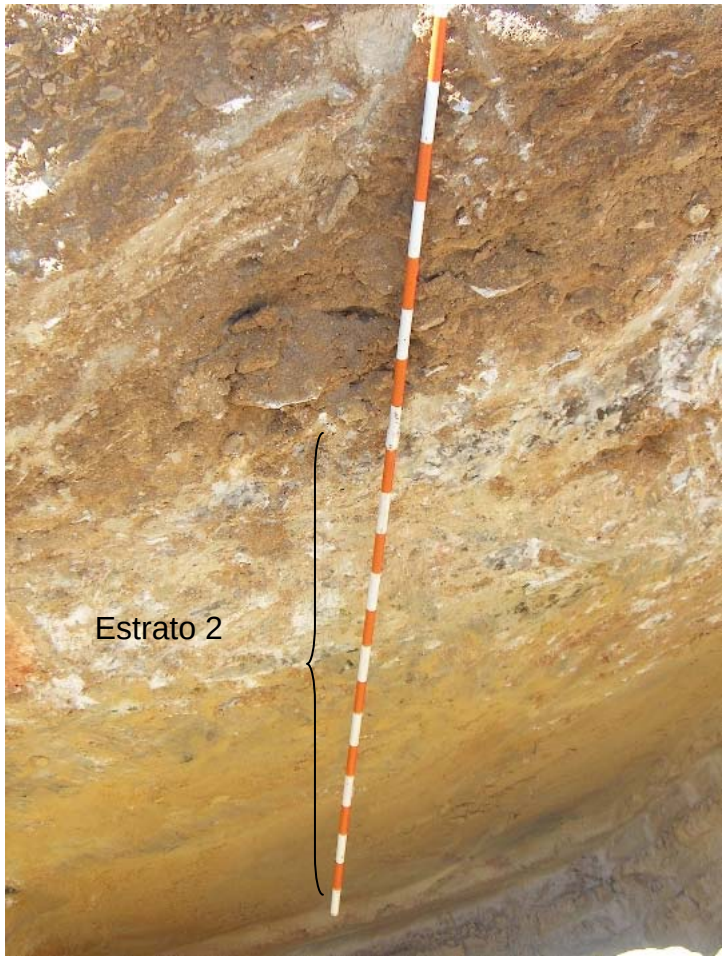




Fecha: Enero 2006

Proyecto MT-059-2701-008





Fecha: Enero 2006

Proyecto MT-059-2701-008

DESCRIPCION ESTRATIGRAFICA VISUAL

Proyecto Manejo de Aguas Superficiales-Pascua Lama/ 059 - 2701

Calicata Nro. CC-19

Ubicación : Pascua Lama-Chancador

Profundidad Total (m) : 4,70 — Norte : 6.757.308 — Reconoció: Carlos López

Profundidad Napa (m) : No se detecta — Este : 401.815 — Revisó: Loreto Cifuentes

Fecha: 9 de Abril de 2005

Profundidad		Desde (m)	0,00	Horizonte	1	0,40	Horizonte	2	2,50	Horizonte	3
		Hasta (m)	0,40	Espesor	0,40	2,50	Espesor	2,10	4,70	Espesor	2,20
Granulometria Estimada	Total	Tam. Máx (pulg.)	7"			1"			1"		
		Bolones (%>3")	30			--			--		
	Fracción < 3" (76 mm)	Grava (%)	55			15			10		
		Arena (%)	25			55			55		
		Finos (%)	20			30			35		
Color en estado natural :			Pardo			Pardo			Pardo Amarillento		
Olor :			--			--					
Graduacion :			Mal Graduado			Mal Graduado			Mal Graduado		
Dilatancia :			--			--					
Plasticidad :			Baja			Media a Alta			Media a Alta		
Forma de la particula :			Angular a Subangular			Angular a Subangular			Angular a Subangular		
Resistencia seca :			--			--			--		
Humedad :			Media			Alta			Alta		
Consistencia o compacidad :			Densa			Densa			Densa		
Estructura :			Estratificado			Lenticular			Homogénea		
Cementación :			--			--					
Origen :			Coluvial			Roca altamente meteorizada			Roca altamente meteorizada		
Materia organica :			Sin Indicios			Sin Indicios			Sin Indicios		
Simbolo estimado del grupo USCS bajo 3" :			GM			SC			SC		
Nombre local del suelo :			Grava areno limosa con bolones			Arena limo arcillosa con gravas			Arena limo arcillosa con gravas		
Muestreo		Nro. Muestra / Profundidad (m)									
		Cantidad (kg)									

Nota: El Horizonte N°2 corresponde a una roca altamente meteorizada que presenta lente y estratos de hielo. A partir del Horizonte N°3 la roca aumenta su dureza en profundidad.



CALICATA CC-19

Programa de Investigaciones – Proyecto Pascua Lama

FIGURA A7



Fech

Proy

DESCRIPCION ESTRATIGRAFICA VISUAL

Proyecto Manejo de Aguas Superficiales-Pascua Lama/ 059 - 2701

Calicata Nro. CC-20

Ubicación : Pascua Lama-Chancador

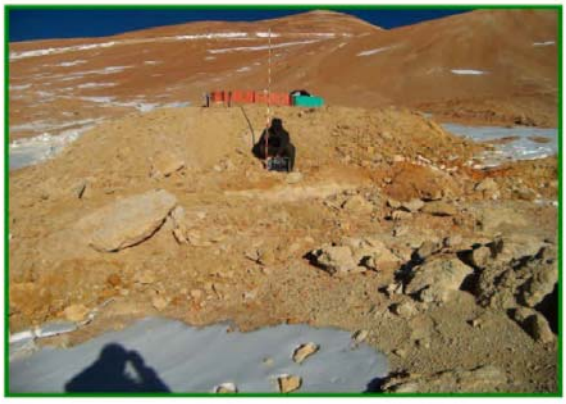
Profundidad Total (m) : 5,00 — Norte : 6.757.391 — Reconoció: Carlos López

Profundidad Napa (m) : No se detecta — Este : 401.519 — Revisó: Loreto Cifuentes

Fecha: 9 de Abril de 2005

Profundidad			Desde (m)	Horizonte	1	0,70	Horizonte	2		Horizonte	
			Hasta (m)	Espesor	0,70	5,00	Espesor	4,30		Espesor	
Granulometria Estimada	Total	Tam. Máx (pulg.)		1"		1"					
		Bolones (%>3")		--		--					
	Fracción < 3" (76 mm)	Grava (%)		10		10					
		Arena (%)		55		55					
		Finos (%)		35		35					
Color en estado natural :				Pardo Amarillento		Pardo Amarillento					
Olor :				--		--					
Graduación :				Mal Graduado		Mal Graduado					
Dilatancia :				--		--					
Plasticidad :				Media a Alta		Media a Alta					
Forma de la particula :				Angular a Subangular		Angular a Subangular					
Resistencia seca :				--		--					
Humedad :				Alta		Alta					
Consistencia o compacidad :				Densa		Densa					
Estructura :				Homogéneo		Homogéneo					
Cementación :				--		--					
Origen :				Roca altamente meteorizada		Roca altamente meteorizada					
Materia orgánica :				Sin Indicios		Sin Indicios					
Simbolo estimado del grupo USCS bajo 3":				SC		SC					
Nombre local del suelo :				Arena limo arcillosa con gravas		Arena limo arcillosa con gravas					
Muestreo	Nro. Muestra / Profundidad (m)										
	Cantidad (kg)										

Nota: El Horizonte N°1 corresponde a una roca altamente meteorizada que presenta lentes y estratos de hielo. A partir del Horizonte N°2 la roca aumenta su dureza en profundidad.

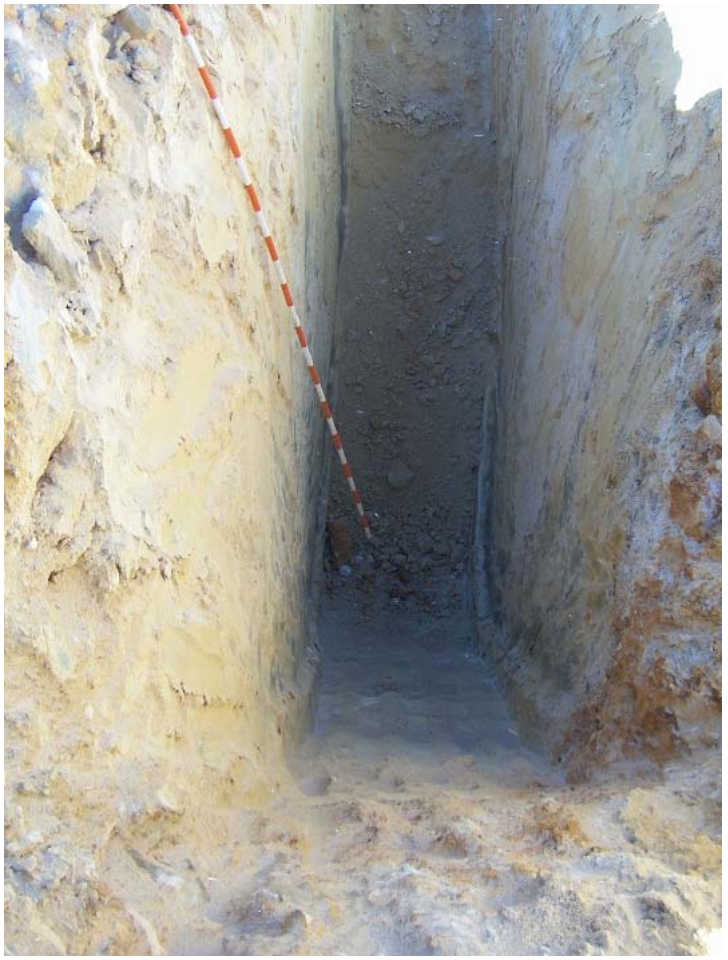




Fecha: Enero 2006

Proyecto MT-059-2701-008


Estrato 1
PROYECTO
PASCUA LAMA
MANEJO DE AGUAS
SUPERFICIALES
CC - 20
DE 0.0 A 5.0 M
ABR.05



MEMORANDUM TÉCNICO

Golder Associates S.A.

Av 11 de Septiembre 2353 Piso 2 Teléfono: + 56 2 5942000

Providencia, Santiago-Chile Fax: + 56 2 5942001

PARA: Mark Rookes, CMN **FECHA:** Enero 07, 2006

CC: Dave Maarse; Jeff Schmok

DE: Joaquín Cabello; Terry Eldridge **REF. No:** 059-2701-22000-007

EMAIL:

RE: GLACIAR DE ROCA EN EL SECTOR DE NEVADA NORTE PROYECTO PASCUA LAMA

1.0 INTRODUCCION

Dentro el perímetro del futuro botadero Nevada Norte (Nevada Norte), existe una pequeña geoforma que presenta un pequeño frente escarpado, y una superficie irregular que en términos generales corresponde a un glaciar de roca; sin embargo, el término técnico que le corresponde es el de pro-talus rampart (protalus). La extensión areal de este cuerpo es de alrededor de 2 ha. Este protalus se encuentra en la ladera norte del valle del Río del Estrecho, entre las elevaciones 4550 m y 4600 m, como se muestra en la Figura 1 y presenta un frente con taludes, en las caras del lóbulo, del orden de 40°.

Este protalus será, en el largo plazo, completamente cubierto por el Nevada Norte por una columna de roca estéril de aproximadamente 200 m de altura. El protalus se encontrará a una distancia aproximada de 250 m al interior del botadero, medidos desde la cresta final del botadero.

Al presente se han comenzado estudios e investigaciones conducentes a la caracterización de este protalus, en la estimación de la cantidad de hielo presente y su régimen térmico los cuales no han sido a la fecha finalizados.

En el presente memorando se abordan los principales posibles impactos que representaría este protalus en la estabilidad del botadero de estéril y en la componente hídrica.

2.0 FORMACION DE UN PROTALUS RAMPART

Los protalus ramparts son en general atribuidos a la acumulación de detritos en el frente de mantos de nieve o incluso de glaciaretes pequeños. Esta asociación con condiciones y cuerpos glaciares los colocaría en el ámbito de los glaciares más que de permafrost. Sin embargo, existen autores [*Barsch*, 1996] que los clasificarían como incipientes glaciares de roca con origen en el permafrost. Nuevamente, puede ser que ambos sean modelos realistas, de acuerdo a los antecedentes locales y factores contingentes, y que han sido considerados como parte de una misma geoforma en evolución [*Shakesby et al.*, 1987][1]. Un esquema de este proceso se presenta en la Figura 2.

3.0 MEDICIÓN DE DESPLAZAMIENTOS DE PUNTO DE CONTROL SOBRE EL PROTALUS

El control topográfico de un monolito ubicado sobre el protalus permite obtener una estimación de las tasas de deformación. El período de medición incluye 23 años las que han proporcionado 4 mediciones arrojando los resultados indicados en la Tabla 2. Las coordenadas informadas están referenciadas al sistema UTM PSAD56.

Tabla 1: Medición de las deformaciones del protalus

	Coordenadas Estaca			Delta Horiz (m)		Delta Total (m)	
Fecha	Este	Norte	Cota	Parcial	Anual	Parcial	Anual
01-07-1982	400.172,9	6.758.346,5	4.585,4	0,00	0,00	0,00	0,00
24-11-1993	400.171,1	6.758.343,7	4.584,4	3,35	0,29	3,50	0,31
15-10-2005	400.168,3	6.758.340,4	4.583,2	4,27	0,36	4,45	0,37
09-01-2006	400.168,3	6.758.340,4	4.583,1	0,10	0,41	0,10	0,43

Los vectores del desplazamiento del monolito de control acusan una consistencia en la dirección del movimiento, con rumbo NW (azimuth de 215°), en la dirección del eje longitudinal del protalus. Las tasas de desplazamiento son del orden de 31 a 43 cm/año con un promedio de 34 cm para el período de monitoreo.

Las lecturas son todas realizadas a gran distancia del monolito, y los valores presentados tienen inherentes los valores de precisión correspondientes. La Figura 3 muestra la evolución del movimiento del monolito de control.

[1] Whalley, W. B., and F. Azizi, Rock glaciers and protalus landforms: Analogous forms and ice sources on Earth and Mars. *J. Geophys. Res.*, *108*(E4), 8032,, 2003 http://www.agu.org/pubs/sample_articles/cr/2002JE001864/3.shtml.

4.0 VOLUMEN DEL PROTALUS

La interpretación de los datos generados de un levantamiento topográfico usando un RTK GPS durante diciembre de 2005 sobre el área del protalus permitió obtener una estimación más actualizada del volumen de este cuerpo de roca y hielo. Durante el levantamiento se definió el perímetro del protalus, y se levantaron puntos que definen su superficie. Con el levantamiento se obtuvieron 152 datos georeferenciados con su correspondiente elevación. La Figura 4 muestra la distribución de los puntos levantados.

El modelamiento de la superficie del protalus con los datos adquiridos con el RTK GPS, y el modelamiento de la base del protalus con la unión de los puntos del perímetro permitieron el cálculo del volumen. Los resultados muestran un cuerpo de aproximadamente 3 ha en superficie, y un volumen del orden de 170.000 m^3. Estos valores son preliminares, y deberían ser confirmados en la medida de que se disponga de datos de terreno especialmente de la profundidad del protalus.

5.0 MEDICIONES CONTENIDO DE HUMEDAD DEL PROTALUS DEL ESTRECHO

Para el protalus del Estrecho se determinaron las condiciones de terreno en base a la observación de las paredes y piso de una zanja excavada hasta 5 m bajo el nivel original de la superficie. El procedimiento tuvo lugar el 9 de Enero de 2006 siguiendo las pautas de la USCS permitiendo discernir un mínimo contenido de hielo hasta profundidades de 5 m. La Figura 5 presenta un corte estratigráfico del protalus.

La ocurrencia de hielo observada en esta zanja corresponde a recubrimientos de partículas sólidas (Vc) y de pequeñas ‘vetillas’ de hielo (Vx). En términos generales, el contenido de humedad de los suelos excavados en esta zanja, dentro del intervalo de 2 a 5 m es de 2% a 5% en peso (estimación de terreno), sin observarse evidencia de lentes o estratos de hielo. Esporádicamente, la matriz de suelo se presenta cementada y pobremente adherida.

6.0 DESARROLLO DEL BOTADERO NEVADA NORTE

El botadero de estéril Nevada Norte será en general desarrollado siguiendo una dirección de avance desde el Este al Oeste por el valle del Estrecho. El área del protalus será inicialmente cubierto desde el año 4 hasta el año 7; luego, la secuencia de llenado del botadero indica colocación de material adicional en los años 9, 11, y del 15 al 17. En la

medida que el botadero es construido, el pie del botadero avanza ascendentemente por las laderas del protalus. La Figura 6 muestra esquemáticamente el avance del pie del botadero sobre una sección longitudinal del protalus.

7.0 ESTABILIDAD DEL NEVADA NORTE

El pie del botadero avanzará rodeando y ascendiendo por el protalus y, como se muestra en la Figura 6, proporcionará desde el Año 5 un contrafuerte al protalus.

Los análisis de estabilidad desarrollados consideraron, como caso extremo, que el protalus contiene un núcleo de hielo. La resistencia del hielo es función de la temperatura y de la tasa de deformación. En el corto plazo, el hielo presenta una resistencia al corte muy alta, pero en el largo plazo, o a tasas de deformación bajas, el hielo presenta una baja resistencia al corte.

Para los análisis de estabilidad se asumió que la temperatura del hielo es de aproximadamente de -1°C, y que la resistencia a la compresión del hielo en el corto plazo es de 1 MPa, mientras que en el largo plazo es de 100 kPa. Estos valores equivalen a valores de cohesión del hielo de 500 kPa y 50 kPa, respectivamente.

Un análisis adicional asumió que el hielo presenta una cohesión de sólo 5kPa (similar a una arcilla de consistencia muy blanda). Para los análisis, se asumió que una capa de hielo de 10 m de espesor se extendió 50 m bajo el botadero. La roca estéril fue modelada como un material friccional con un ángulo de fricción interna de 37° y los suelos de fundación como material friccional con un ángulo de fricción interna de 35°. Sólo se analizaron superficies de falla que involucran el hielo contenido en la fundación del botadero.

En la Tabla 2 se resumen los resultados de los análisis.

Tabla 2: Resumen de los Factores de Seguridad

Resistencia del hielo (Cohesión) (kPa)	Factor of Safety
500	2,35
50	2,27
5	2,26

Los análisis de estabilidad muestran que con el pie del botadero apoyado sobre terreno ascendente, con suelos de fundación formados por hielo, o incluso suelos de baja resistencia, no se reducirá la estabilidad del talud del botadero construido sobre el protalus. Por el otro lado, el protalus será confinado y no presentará deslizamientos.

8.0 CONDICIONES TÉRMICAS

La construcción del Nevada Norte sobre el protalus modificará el régimen térmico. La depositación de una capa de 200 m de espesor aislará cualquier hielo contenido en la fundación de cualquier variación estacional de la temperatura ambiente. La experiencia en operaciones mineras en el Ártico indica que el hielo no se deshiela rápidamente o en muchos casos que se preserva bajo los botaderos. Por ejemplo, en Red Dog Mine, Alaska, un cuerpo masivo de hielo en la fundación de un botadero ha perdurado sin derretirse desde su construcción en las postrimerías de los ’80. Las temperaturas del terreno en el área, previo al desarrollo del botadero eran de aproximadamente -0,6°C. En Whistle Mine, cercana a Sudbury Ontario, se detectó congelamiento al interior del botadero mientras se excavaba para rellenar la mina a rajo abierto. El permafrost no ocurre en forma natural en Sudbury, por lo que las condiciones desarrolladas son necesariamente consecuencia de la construcción del botadero.

La segregación de la roca estéril producto de su depositación a lo largo del talud promueve el desarrollo de bajas temperaturas en la base del botadero. En la medida que la temperatura ambiental es menor que la temperatura promedio de la roca del botadero se produce una circulación de aire. Durante el invierno, el aire tibio asciende dentro del botadero mientras que el aire frío desciende enfriando la base del botadero con roca más gruesa. En verano, cuando la temperatura ambiental se eleva sobre la temperatura dentro del botadero, el aire frío y más denso es atrapado en el botadero y la circulación de aire se detiene.

Este proceso derivó en técnicas de construcción, implementadas a finales de los años 90 en Alaska, tendientes a mejorar el enfriamiento y aislamiento térmico de fundaciones ricas en permafrost. La técnica es denominada Air Convection Embankment (ACE) y es usada en minas del norte de Canadá y construcción de líneas férreas y carreteras de gran altitud en China para mejorar el congelamiento del terreno.

9.0 POTENCIAL DESHIELO E IMPACTO HÍDRICO

Aunque la experiencia en otras operaciones mineras en climas fríos indica que el hielo contenido en la fundación del botadero de estéril Nevada Norte no se derretirá, el presente memorando presta consideración al potencial impacto sobre la estabilidad del botadero debido a deshielo.

El deshielo del hielo contenido en la fundación tendría dos impactos sobre el botadero: i) aumento de la infiltración en la fundación y en el botadero y; ii) asentamientos diferenciales causados por la pérdida de volumen en la fundación.

Para estimar el cambio que experimentaría el nivel freático en la fundación asociado al deshielo del protalus se recurrió a la evaluación de BGC[2]. La evaluación de BGC, con los datos disponibles a la fecha estimó el volumen del protalus en 240.000 m^3 con contenidos de hielo entre 50% y 90% en peso de acuerdo a los antecedentes de la literatura técnica disponible. Con una contracción del 9% de hielo a agua, el volumen de agua contenido en el protalus puede llegar a ser del orden de 190.000 m^3.

Junto con su evaluación BGC desarrolló un caso hipotético en el que el deshielo del protalus ocurre debido a la generación de condiciones exotérmicas del estéril, por un período de 50 años. Para este escenario y considerando muy conservadoramente un contenido de hielo de 90% en peso, los caudales de deshielo alcanzan a un 0,12 l/s, basado en un caudal subterráneo que fluye directamente pendiente abajo por el abanico coluvial, en una sección de 100 m de ancho (dimensión aproximada del protalus). El aumento del nivel freático estaría comprendido entre 3 y 30 centímetros; esta pequeña variación no tendría impacto alguno sobre la estabilidad del botadero. En el fondo del valle, donde el caudal indicado sería distribuido a lo ancho del valle, la variación del nivel freático se incrementaría por 3 centímetros o menos. Nuevamente, este pequeño cambio no tendrá impacto alguno sobre la estabilidad del botadero.

10.0 POTENCIAL DESHIELO E IMPACTO EN LA ESTABILIDAD

El deshielo del protalus causaría asentamientos en la superficie del botadero. Los asentamientos ocurrirían sólo si el hielo se presenta como lentes o estratos y no como relleno de los intersticios entre las partículas de roca.

El asentamiento sería esencialmente proporcional a su contenido volumétrico. Para un cuerpo de hielo de 50 m de espesor, y contenidos de hielo de 50% y 90%, los asentamientos esperados en caso de deshielo sería de 25 a 45 m, equivalentes a un 3,5% a 6,4% de la altura máxima del botadero de estéril (700 m).

Por el otro lado, los asentamientos propios de la roca estéril asociados a su consolidación, sin influencia del protalus, ocurrirán durante y después de la construcción del botadero. El asentamiento total podría ser un 5% del espesor del botadero. Dada la magnitud del asentamiento esperado durante la construcción y operación del botadero, asentamientos debido al deshielo serán difíciles de cuantificar. No obstante, la nivelación de las plataformas del botadero será parte de las operaciones habituales y posiblemente de

[2] BGC Engineering Inc en su memorando “Rock Glacier Hydrology Work Plan” con fecha del 18 de Octubre, 2005 (Anexo III-F Adenda 2 del EIA)

cierre, con que cualquier asentamiento relacionado con el deshielo será reparado como parte normal de las operaciones del botadero.

11.0 INTERACCIÓN CON LAS OBRAS DE MANEJO DE AGUAS

En el corto plazo, el efecto de las obras del Canal Perimetral Norte desviará los aportes de agua de la cuenca superior al protalus del Estrecho. Efectivamente, como parte de los compromisos ambientales del proyecto se considera la construcción del canal perimetral para captar las escorrentías que alimentarían el Nevada Norte y con el propósito de restringir la generación de aguas ácidas.

En el sector del protalus, la construcción de este canal perimetral será realizado en la elevación 4700m aproximadamente, en faldeos rocosos de la ladera norte del Estrecho. El protalus se ubica en torno a los 4600 m aproximadamente, 100 m menos que el nivel del canal. Con la construcción del canal perimetral norte en los faldeos rocosos será posible interceptar con buen nivel de eficiencia los escurrimientos superficiales y subsuperficiales de la cuenca superior, y con ello limitar los aportes de agua que actualmente o en el pasado han alimentado el sistema del protalus; la fuente directa de agua en el período posterior a la construcción del canal norte, y previo a ser cubierto por el botadero de estéril, estará representada por:

i) el agua de deshielo que infiltra y es congelada en el glaciar de roca producto de la acumulación directa de nieve;

ii) el agua de deshielo que infiltra y es congelada en el glaciar de roca producto de avalanchas de nieve;

iii) la infiltración de flujos subsuperficiales de la cuenca superior no interceptadas por el canal perimetral y que no son captadas por los drenajes naturales alrededor del protalus.

En definitiva, el aporte de agua al protalus es limitado a un porcentaje significativamente menor al de la situación actual o pasada.

En el largo plazo, la configuración del Nevada Norte presentará una plataforma en la elevación 4800 m; aproximadamente 200 m sobre la elevación del protalus. El botadero no interferirá con el funcionamiento del canal perimetral norte propuesto en el diseño.

Para el Nevada Norte no existe una conexión física entre los aportes hídricos de la cuenca superior del protalus, con la superficie del botadero; por el otro lado, los únicos aportes de agua al sistema del botadero están relacionados con el deshielo de la nieve acumulada, el que podría parcialmente formar parte de una posible capa activa sub superficial del permafrost en la elevación 4700 m o superiores..

12.0 REFERENCIAS

Williams, Peter J. and Smith, Michael W., "The Frozen Earth, Fundamentals of Geocryology", Cambridge University Press, 1989.

Air Convection Embankment for Roadways: Field Experimental Study in Alaska

(03-2603)

Steve Saboundjian, Alaska Department of Transportation and Public Facilities *

Douglas J. Goering, University of Alaska, Fairbanks.

In Situ Test on Cooling Effectiveness of Air Convection Embankment with Crushed

Rock Slope Protection in Permafrost Regions by Sun Zhizhong, (Doctoral Student, State Key Lab. of Frozen Soil Engr., Cold and Arid Regions Envir. and Engrg. Res. Inst., Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, P.R. China, Journal of Cold Regions Engineering, Vol. 19, No. 2, June 2005, pp. 38-51

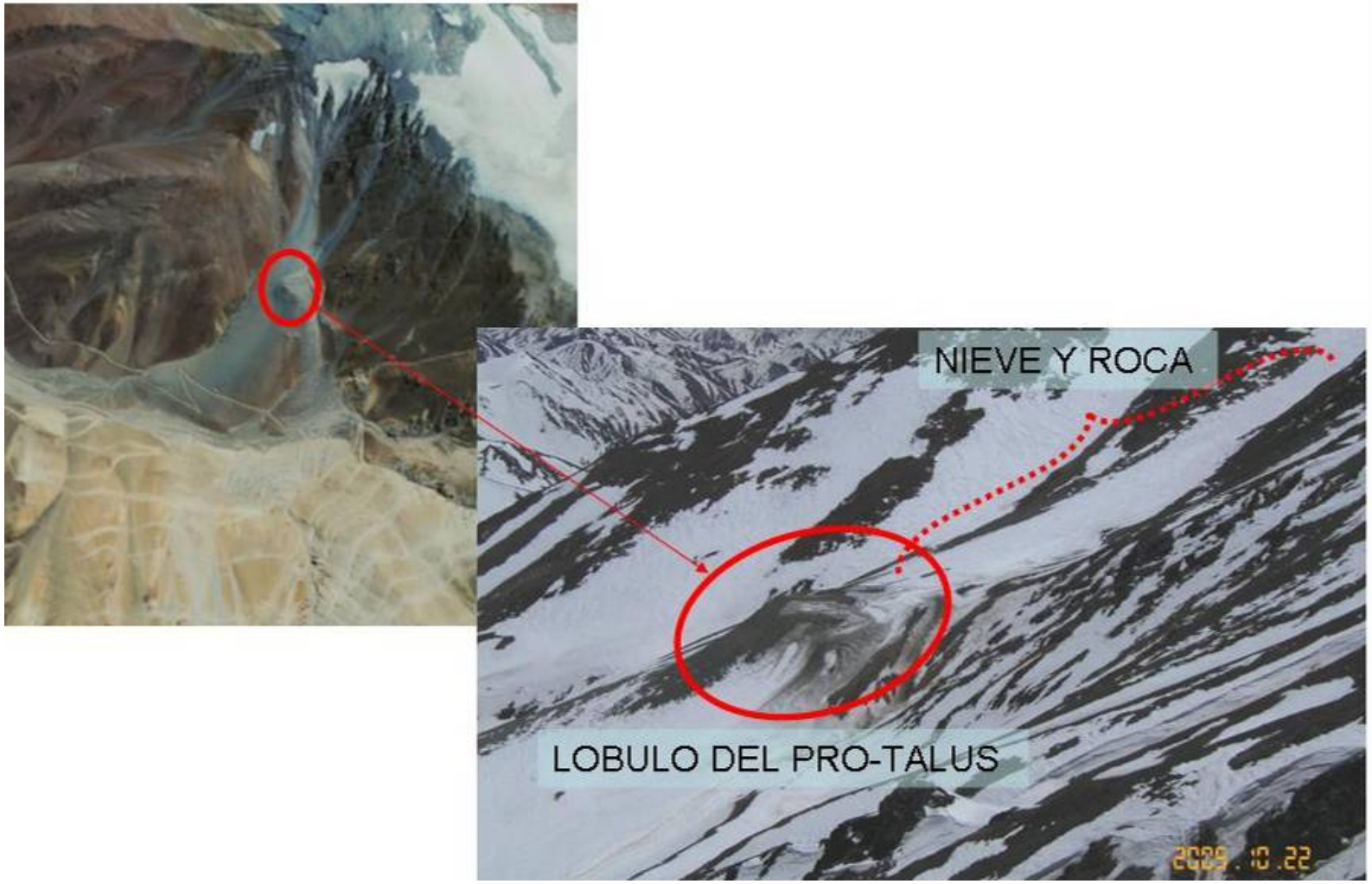
TLE/JC/jc

Arch.: Correl. MT0592701-20000-006 Ene 04

UBICACIÓN DEL PROTALUS RAMPART EN EL ESTRECHO

Impacto del Glaciar de Roca – Proyecto Pascua Lama

FIGURA 1



Fecha: Enero 2006

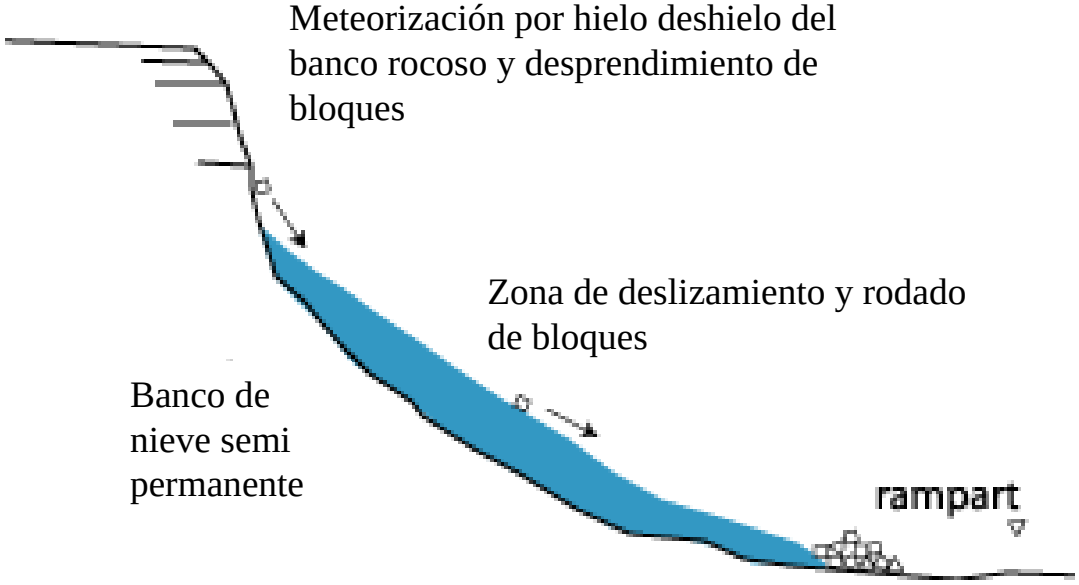
Documento: MT-059-2701-007

ESQUEMA DE FORMACIÓN DE UN PROTALUS

Impacto del Glaciar de Roca – Proyecto Pascua Lama

FIGURA 2

- Pro talus rampart: masa de coluvios angulosos pobremente graduada, cementados con hielo intersticial que se desplaza lentamente por acción de la gravedad.





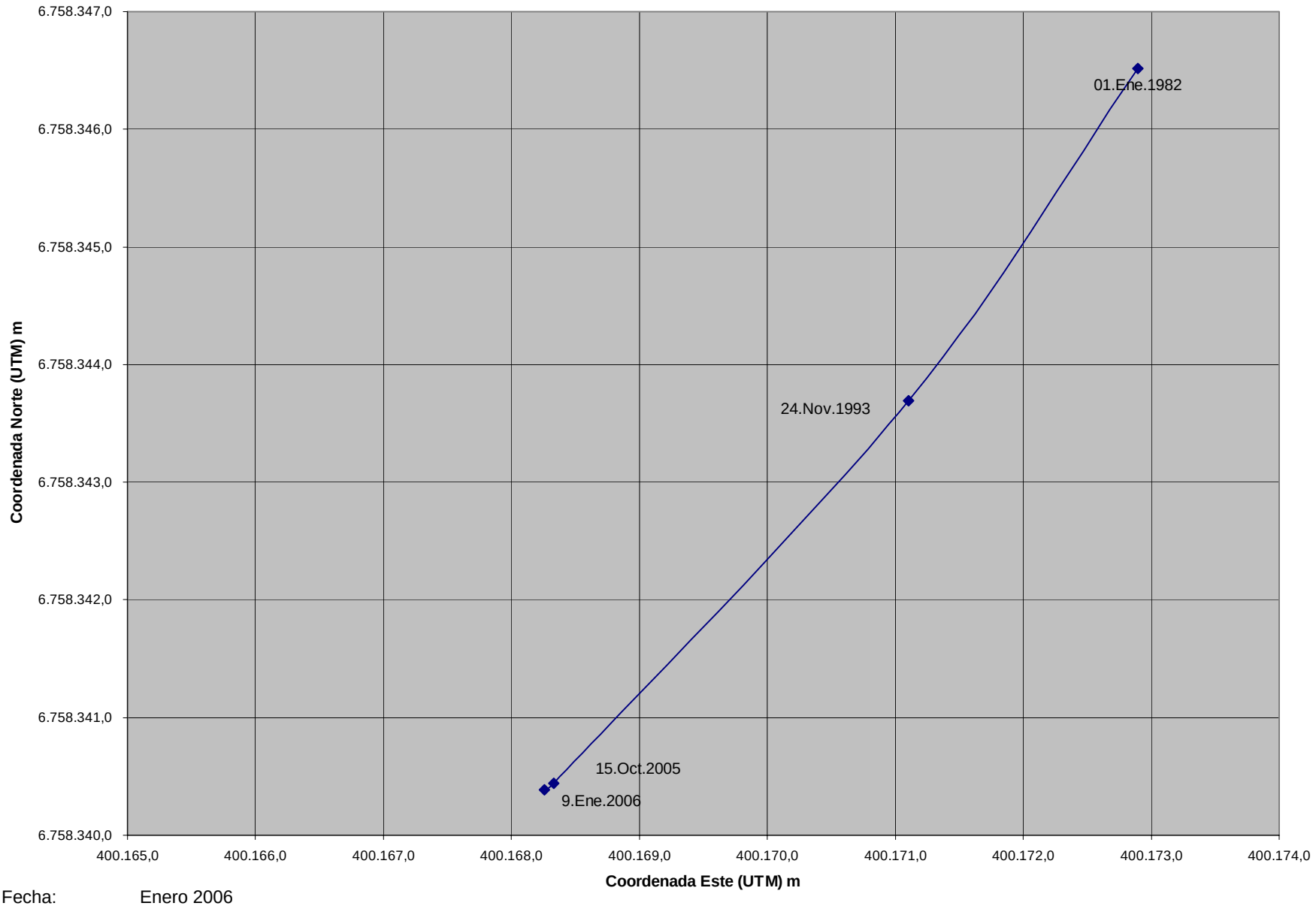
Fecha: Enero 2006

Documento: MT-059-2701-007

MOVIMIENTO DEL MONOLITO DE CONTROL

Impacto del Glaciar de Roca – Proyecto Pascua Lama

FIGURA 3



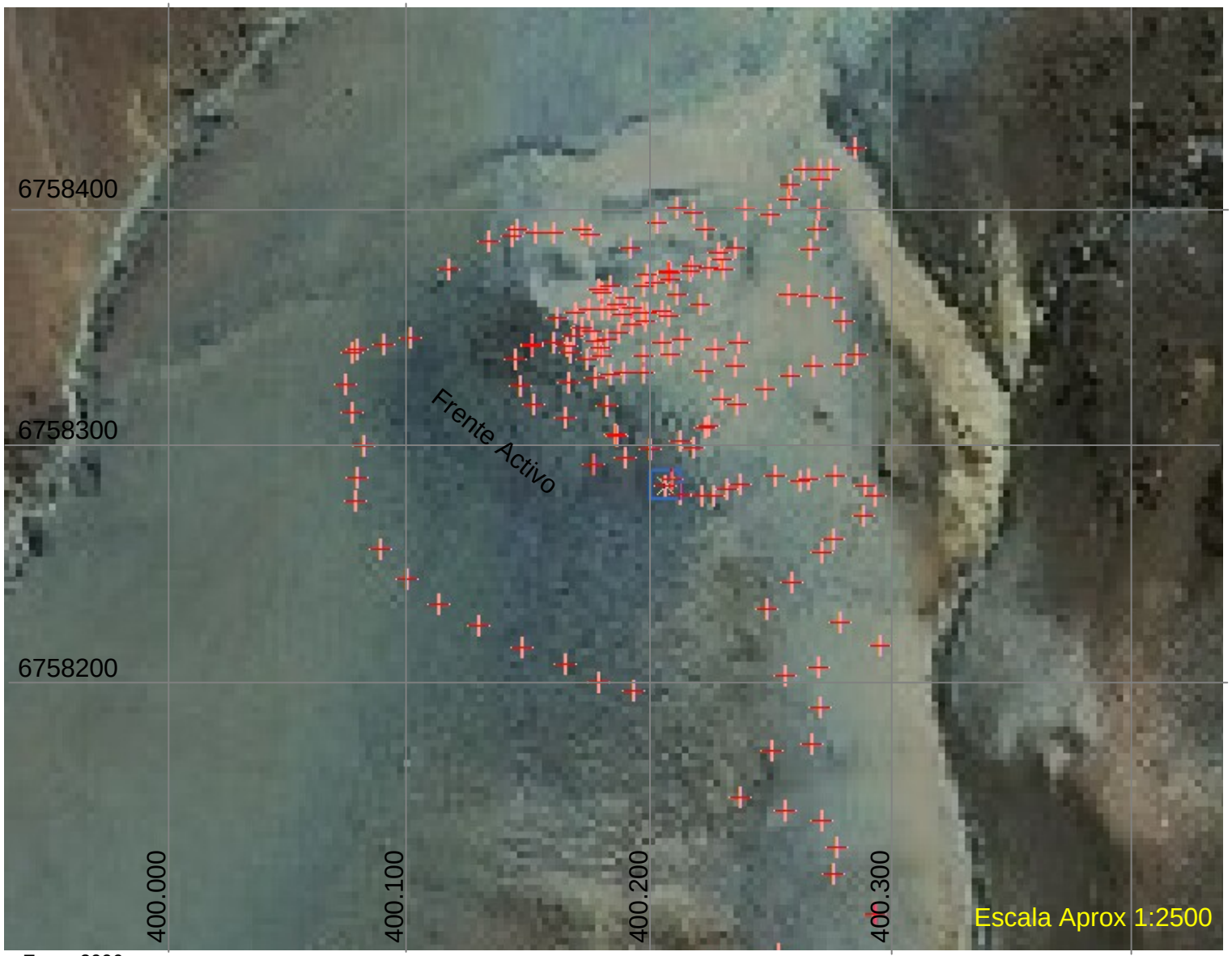
Fecha: Enero 2006

Documento: MT-059-2701-007

LEVANTAMIENTO CON RTK GPS

Impacto del Glaciar de Roca – Proyecto Pascua Lama

FIGURA 4



Fecha: Enero 2006

Documento: MT-059-2701-007

PERFIL ESTRATIGRÁFICO DE 5 M DEL PROTALUS

Impacto del Glaciar de Roca – Proyecto Pascua Lama

FIGURA 5

9 de enero de 2006
Hasta los 3 m de profundidad Suelos gravo arenosos observados en toda la columna estratigráfica con bolones de hasta 1,0 m de diámetro, consistencia suelta.
Bajo los 3 m se observan cristales de hielo recubriendo los clastos sólidos y cementando débilmente las partículas.
Contenido de hielo estimado de 3 a 5 % en peso.



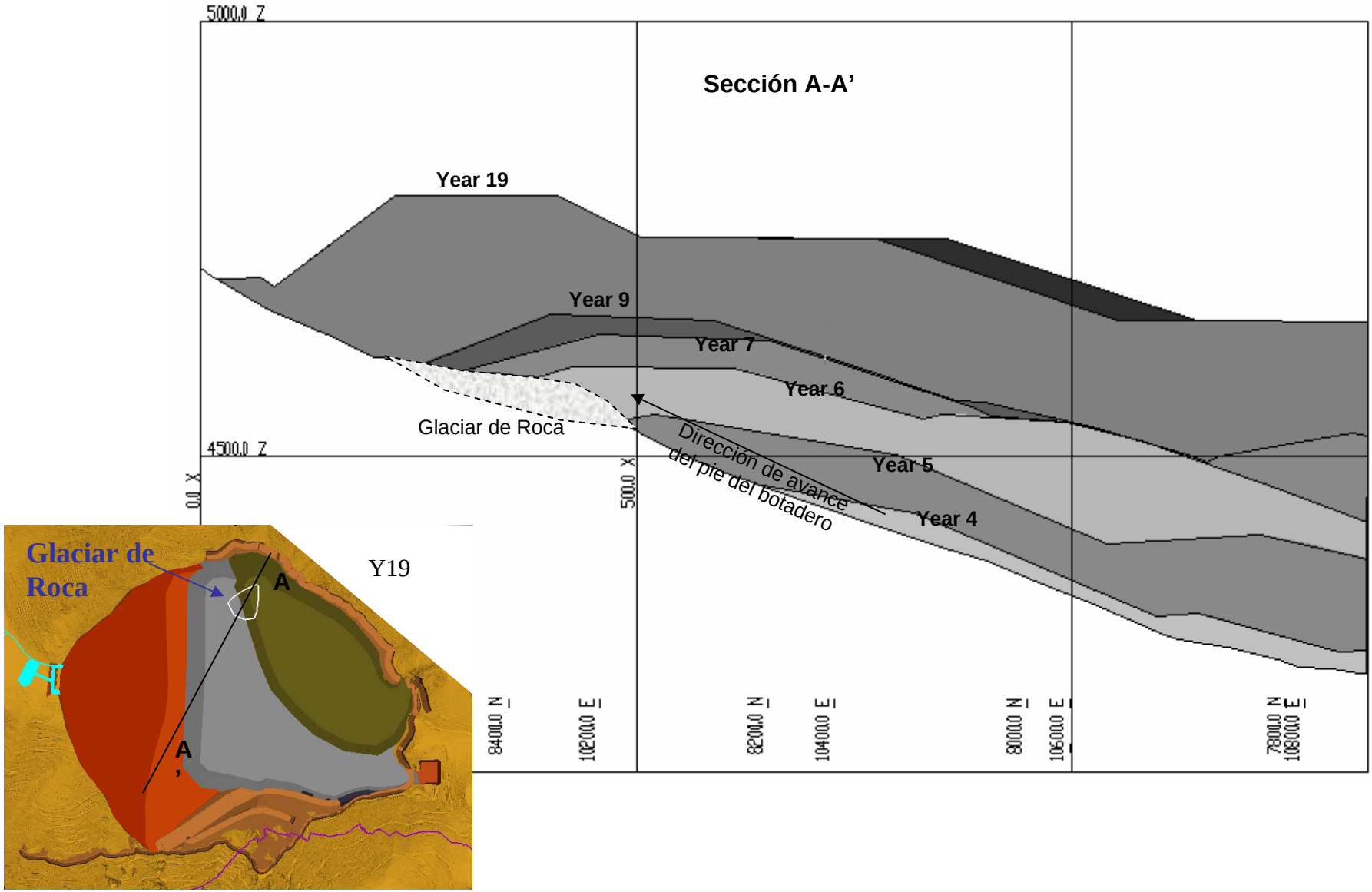
Fecha: Enero 2006

Documento: MT-059-2701-007

AVANCE DEL BOTADERO POR EL PROTALUS

Impacto del Glaciar de Roca – Proyecto Pascua Lama

FIGURA 6



Fecha: Enero 2006

Documento: MT-059-2701-007

INFORMES RELACIONADOS

Anexo 2.2.A.
Titulo: Mediciones de Espesor en Glaciares de Chile Centro-Sur
Autores: Andrés Rivera, Gino Casassa y Cesar Acuña, Centro de Estudios Científicos, Valdivia.
Versión corregida y aceptada, 2 Octubre 2002.
Nº de Páginas: 34

Anexo 2.2.B.
Titulo: Alpine ice cores and ground penetrating radar: combined investigations for glaciological and climatic interpretations of a cold Alpine ice body.
Autores: Olaf Eisen, Uwe Nixdorf, Lothar Keck, Dietmar Wagenbach, Alfred-Wegener- Institut für Polar und Meeresforschung Bremerhaven, Bremerhaven, Germany; Institut für Umweltphysik, Universität Heidelberg, Germany.
Versión corregida y aceptada, 22 Abril 2003.
Nº de Páginas: 11

Anexo 2.2.C.
Titulo: Recontruction Of Sublimation And Precipitation From The Cerro Tapado Ice Core (North Chilean Andes, 30ºS)
Autores: P. Ginot, C. Kull, U Schotterer, M. Schwikowski, H.W. Gäggeler. University of Bern & PSI & PAGES
Nº de Paginas: 1

Anexo 2.2.D.
Titulo. The interannual variability of the Echaurren glacier mass balance: Chilean Andes (abstract).
Autores: José Vergara y Fernando Escobar, Departamento de Geofísica, Universidad de Chile, Santiago, Chile & Dirección General de Aguas, Ministerio de Obras Publicas, Santiago, Chile.
Nº de Paginas: 1

Anexo 2.2.E.
Titulo: Late Quaternary Glacier response to humidity changes in the arid Andes of Chile (18 - 29ºS).
Autores: Caspar Ammann, Bettina Jenny, Klaus Kammer, Bruno Messerli, Department of Geosciences, University of Massachusetts, USA & Institute of Geography, University of Bern, Switzerland.
Versión corregida y aceptada, 16 Mayo 2001.
Nº de Paginas: 16

Anexo 2.2.F.
Titulo: Global Solar Radiation, Soil Temperature and Permafrost in the Central Andes, Argentina: a Progress Report.
Autor: Lothar Schrott, Departament of Geography of Heidelberg, Germany.
Versión corregida y aceptada, 21 Enero 1991.
Nº de Páginas: 8

Anexo 2.2.G.
Titulo: A Handbook on Periglacial Field Methods.
Autores: Ole Humlum & Norikazu Matsuoka, University Centre on Svalbard and University of Oslo, Norway & Institute of Geoscience, University of Tsukuba Ibaraki, Japon.
Versión corregida y aceptada, 6 de Abril 2004.
Nº de Páginas: 7

Anexo 2.2.H.
Titulo: Changes of the 0ºC isotherm and equilibrium line altitude in central Chile during last quarter of the 20th century.
Autores: Jorge F. Carrasco, Gino Casassa & Juan Quintana, Dirección Meteorológica de Chile, Santiago Chile & Centro de Estudios Científicos, Valdivia.
Versión Abierta para discusión hasta Junio 2006.
Nº de Páginas: 16

Mediciones de espesor en glaciares de Chile centro-sur

Andrés Rivera
Departamento de Geografía, Universidad de Chile
Centro de Estudios Científicos, Valdivia
University of Bristol, UK

Gino Casassa & Cesar Acuña
Centro de Estudios Científicos, Valdivia

Recibido 10 mayo 2002; versión corregida y aceptada, 2 octubre 2002.

RESUMEN

Se presentan resultados de mediciones de espesor de hielo realizadas en Chile centro-sur (30-41°S) durante los últimos años. La información fue obtenida mediante radar en cinco glaciares. En todos los casos, las señales de radar fueron levemente atenuadas permitiendo la penetración de la totalidad del hielo, lo que implica que la presencia de agua supra, intra y subglacial no afectó significativamente las señales. El sistema se probó tanto en glaciares descubiertos, así como en glaciares con cubierta detrítica, la que si bien generó cierto nivel de ruido en los registros, no impidió la penetración de las señales hasta el fondo subglacial, obteniéndose espesores máximos de 230 m en la zona de ablación del glaciar Juncal Norte. El análisis de la potencia de reflexión interna y de fondo, permitió caracterizar una condición fría para el glaciar Tapado (sin deslizamiento basal), mientras que para el glaciar Juncal Norte, se corroboró su condición temperada. Las mediciones de espesor de hielo realizadas con este sistema de radar tienen una precisión bastante mejor que otros métodos de prospección geofísica empleados en Chile (1-6 %), permitiendo un cálculo más confiable y preciso del volumen equivalente en agua existente en estado sólido en la cordillera. Un programa de medición de espesores en glaciares representativos de las distintas cuencas del país, podría mejorar la evaluación del recurso hídrico, permitiendo un seguimiento en el tiempo de las variaciones y respuestas glaciales frente a los cambios climáticos que están afectando actualmente el país.

Palabras clave: Glaciares, radar, Chile Central, espesor de hielo.

Thickness measurements of glaciers from Central-South Chile

ABSTRACT

The results of ice thickness measurements carried out in Chile (30-41°S) during recent years are presented. The information was obteined by means of radar in five glaciers. In all of them, the radar signals were slightly attenuated allowing penetration of the ice to the bedrock. This means that the presence of supra, intra and subglacial meltwater did not affect the signals significantly. The system was tested on bare ice as well as debris covered ice. For debris covered ice areas, the signals were much more noisy than on bare ice, but they were able to penetrate the ice to the bedrock, obtaining a maximum thickness of 230 m in the ablation area of Juncal Norte glacier. The analysis of bed and internal reflection power, allowed the characterisation of cold ice for Tapado glacier (without basal sliding) whilst Juncal Norte glacier was recognised as temperate ice. These radar ice thickness measurements have a high accuracy (1 to 6%), which is much better than other geophysical methods used in Chile, allowing a more accurate and confident estimation of the water equivalent volume storage in the high mountain of this part of the country. An ice thickness measurement programme of representative glaciers from different hydrological basins of the country would improve water resources evaluation, and also allow better monitoring of the glacier variations and responses with respect to the current climate changes affecting that part of the country.

Key words: Glaciers, radar, Central Chile, ice thickness

INTRODUCCION

Durante las últimas décadas, la mayor parte de los glaciares del país han experimentado un importante retroceso, adelgazamiento y pérdida de superficie (RIVERA et al. 2000a; ANIYA et al. 1997), debido a las tendencias de aumento de las temperaturas y disminución de las precipitaciones detectadas en gran parte del país (ROSENBLÜTH et al. 1997), lo que ha contribuido significativamente al aumento global del nivel del mar (ANIYA 1999; RIVERA et al. en prensa).

Este proceso de deglaciación ha tenido efectos negativos en términos de los volúmenes de reservas sólidas de agua existentes en la cordillera andina, puesto que en Chile central, se han detectado pérdidas de hasta un 50% de la masa de algunos glaciares en los últimos 50 años (RIVERA et al. 2000b).

Una de las principales consecuencias de esta disminución, se relaciona directamente con los caudales de las cuencas con régimen glacial, especialmente durante los meses de verano, donde el agua de fusión proveniente de los glaciares, puede representar más del 68% del caudal (PEÑA & NAZARALA 1987).

Para estimar con mayor precisión el aporte de los glaciares a los caudales de los principales ríos del Chile, y de esta manera evaluar las reservas hídricas, es fundamental completar los inventarios existentes, realizar un mayor número de trabajos glaciológicos e iniciar nuevos programas de balance de masa.

Hasta la fecha, sólo existe un glaciar con un programa exitoso de mediciones directas de balance de masa en Chile central, dirigido por la Dirección General de Aguas del Ministerio de Obras Públicas, en el glaciar Echaurren Norte (cuenca del río Maipo). En dicho glaciar, se ha detectado una alta correlación entre años con fases negativas de la Oscilación del Sur o eventos El Niño (El Niño - Oscilación del Sur, ENOS) y balances de masa positivos (ESCOBAR et al. 1995).

Una de las razones por la que sólo existe un programa de mediciones directas de balance de masa en Chile, es el costo (logístico, humano y financiero), involucrado en mediciones directas de acumulación y ablación de nieve y hielo en una red de balizas instaladas anualmente sobre un glaciar. Para superar este problema, actualmente se está modelando el balance de masa de un gran número de glaciares, mediante el uso de diversos métodos indirectos, tales como el método geodésico. Éste se basa en la comparación de la topografía superficial del hielo en distintos períodos de tiempo con respecto a una superficie sin cambio; permite estimar el balance de masa para la totalidad de un glaciar en forma sencilla (KRIMMEL 1999). La topografía superficial se puede obtener mediante técnicas de percepción remota (por ejemplo fotogrametría o técnicas modernas de interferometría) o bien mediante levantamientos topográficos tradicionales. Sin embargo, cuando se cuenta con dicha información, solamente para algunos puntos del glaciar, se puede modelar el balance de masa mediante el uso de la ecuación de continuidad o conservación de masa. Ésta requiere pocos parámetros, entre los que destaca el espesor de hielo, como uno de los más críticos en términos de su incidencia en los márgenes de error (RASMUSSEN & KRIMMEL 1999).

En Chile, la mayor parte de las mediciones de espesor de hielo se han concentrado en los Campos de Hielo Norte y Sur, donde se han empleado diversos sistemas, destacando por su eficiencia el sistema de radio eco sondaje (RES). Éste fue empleado en el Paso de los Cuatro Glaciares, de Campo de Hielo Sur (49°S, 73°20'W) donde se midieron espesores máximos de 751 m (RIVERA & CASASSA 2000).

En el resto del país algunos pocos glaciares han sido medidos con RES, tales como los glaciares Olivares Alfa, Olivares Beta y Echaurren Norte de Chile central, en los cuales se aplicó un sistema de radar montado en helicóptero (CASASSA et al. 2001) o en la

caldera volcánica de los Nevados de Sollipulli, donde GILBERT et al. (1996), combinaron RES y gravimetría, logrando determinar espesores máximos de 650 m. Otros glaciares han sido medidos sólo con gravimetría, método que si bien no tiene rango máximo de penetración, posee una mucho menor precisión (CASASSA 1987).

Para incrementar la cantidad y calidad de éstas y otras mediciones glaciológicas, el Laboratorio de Glaciología del Departamento de Geografía de las universidades de Chile y Magallanes y el Centro de Estudios Científicos de Valdivia, han realizado - en colaboración con investigadores extranjeros - un extenso programa de mediciones, que incluyen entre otros aspectos, la aplicación de métodos de prospección geofísica para determinar espesores de hielo con el sistema de radio eco sondaje.

En este artículo se presentan algunos de los resultados de las mediciones de espesor de hielo, realizadas en los siguientes glaciares de Chile centro sur (30°- 41°S): glaciar del Tapado (cerro Tapado) en la cuenca del Elqui; Juncal Norte (cerro Juncal), en la cuenca del Aconcagua; San Francisco (cerro Morales), en la quebrada de Morales de la cuenca del Maipo; Esmeralda (cerro El Plomo) en la cuenca del Mapocho y Casa Pangue (monte Tronador) en la cuenca del Peulla (Fig. 1).

MATERIALES Y MÉTODOS

Método de radio eco sondaje (RES)

Este método se basa en los mismos principios que el sonar, usado comúnmente en navegación y prospección marina, y que el método sísmico utilizado en prospección de petróleo. En esencia, el radio eco sondaje consiste en transmitir una onda electromagnética hacia el interior del glaciar, la que rebota en la base rocosa y es captada en un receptor instalado en la superficie. El espesor se determina a partir del tiempo empleado por la onda, entre su salida desde un transmisor ubicado en la superficie del glaciar y su retorno (debido a su rebote en el relieve subglacial) a un receptor ubicado en la misma superficie pero a una cierta distancia horizontal del transmisor en el caso de un radar biestático.

En diversos glaciares del mundo se han utilizado distintos transmisores que trabajan con frecuencias entre 30 y 700 MHz (BOGORODSKY et al. 1985), los cuales han sido exitosos en la prospección de hielo frío (que presenta temperaturas por debajo del punto de fusión), el cual es muy permeable a la penetración de ondas electromagnéticas en estas frecuencias. Sin embargo, en hielo temperado (hielo cuya temperatura es muy cercana al punto de fusión), pueden existir cuerpos de agua de hasta varios metros de dimensión dentro del glaciar, los que producen una importante dispersión y absorción de las ondas electromagnéticas con frecuencias superiores a 30 MHz.

Los primeros en sugerir criterios para la construcción de un radar para hielo temperado fueron WATTS & ENGLAND (1976), quienes encontraron que el esparcimiento de las señales de radar en este tipo de glaciares, se reducía en forma significativa por debajo de los 10 MHz, vale decir en el rango de la HF (High Frequency: 3-30 MHz). Es así como VICKERS & BOLLEN (1974) construyeron el primer radar para hielo temperado, sondeando exitosamente el glaciar South Cascade en Washington, EE.UU. Dicho modelo es del tipo "impulso", debido a que el transmisor genera una poderosa señal monopulso, la cual es irradiada por medio de antenas dipolo cargadas resistivamente.

Actualmente, el método de radar ha desplazado al método de gravedad debido a su mayor precisión y capacidad de recolección de datos. Asimismo, es más versátil que el método sísmico, por lo que se ha transformado en el método estandardizado para determinar espesores de hielo y la estructura interna de los glaciares.

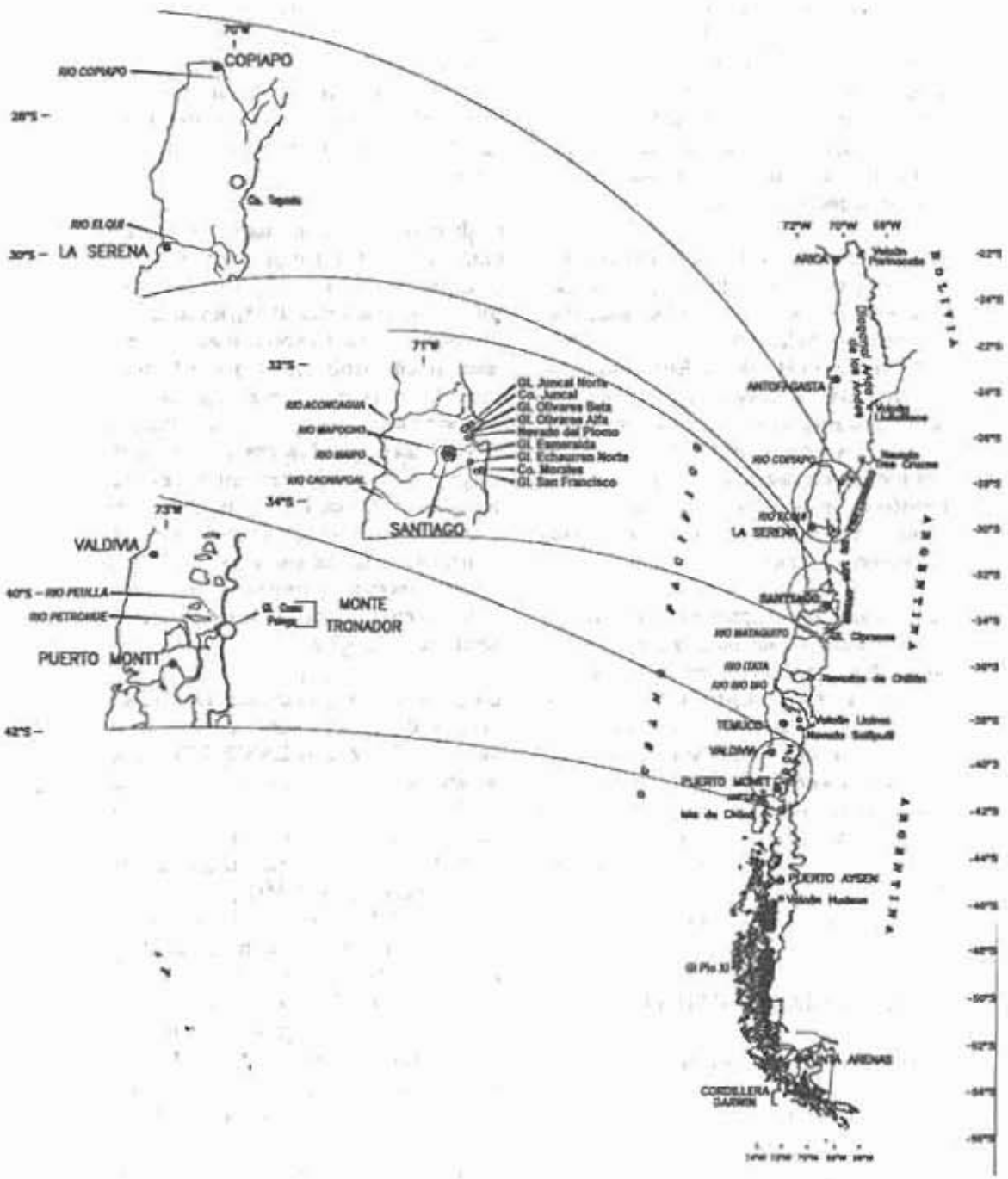


Fig. 1. Carta de ubicación general con la localización de los glaciares y otros topónimos empleados en el texto.

Fig. 1. Index map showing the location of the glaciers and other geographic features discussed in the text

Tabla 1. Características de diferentes transmisores. Valores adaptados de CÁRDENAS 1998.
Table 1. Characteristics of different transmitters. Adapted from CARDENAS 1998.

Transmisor	Máx. potencia instantánea de salida (kW)	Máxima voltaje de salida (Vpp)	Dimensiones (cm)	Peso	Probado por	Diseñado por
Bristol	9	680	13x13x12	0.7	GILBERT et al. (1996)	University of Bristol,UK
Narod/Clarke	24	1100	10x7x3	0.1	CARDENAS (1998)	Narod y Clarke (1994)
OSU	51	1600	20x12x6	0.7	THOMPSON et al. (1982 y 1988)	The Ohio State University, EEUU.

Sistemas de radar empleados en Chile

Radar análogo

El primer sistema empleado en Chile, consistía en un transmisor diseñado en The Ohio State University (OSU) y un osciloscopio análogo (Tablas 1 y 2), cuya pantalla debía ser fotografiada para capturar la señal, obteniéndose mediciones puntuales (CASASSA 1992).

Radar digital para mediciones puntuales

Para reducir los problemas técnicos que implicaba fotografiar la pantalla del receptor, se diseñó un segundo sistema de radar, compuesto por un transmisor diseñado en la Universidad de Bristol y un osciloscopio digital (Tabla 1 y 2), que permitía el traspaso de las señales a PC, el cual se conectaba directamente al receptor. Este sistema tenía carácter puntual, puesto que las antenas debían ser desplegadas en cada punto de medición (CASASSA & RIVERA 1998).

Radar digital para mediciones continuas (perfilaje) realizadas a pie

Con el objeto de obtener mediciones continuas de espesor de hielo, se diseñó un sistema en que las antenas eran amarradas a cañas de fibra de vidrio de 10 m de largo, las que se adosaban a mochilas que eran portadas por dos investigadores, permitiéndose la colección de datos mientras se caminaba sobre el glaciar. Este sistema permitía realizar mediciones puntuales o cada pocos segundos, generándose un perfil semi-continuo de retornos. Este sistema de perfilaje mejoró significativamente la interpretación de los retornos subglaciales. Sin embargo en zonas muy agrietadas no pudo ser empleado satisfactoriamente, por lo complicado de caminar sobre el hielo, escalando paredes y sorteando grietas, con cerca de 20 m de cañas de fibra de vidrio con antenas adosadas a las espaldas de los investigadores.

Para medir superficies de hielo con numerosas grietas y paredes verticales de hielo, se construyó un sistema en que las antenas son introducidas en cintas de escalada, las cuales son arrastradas sobre el hielo, permitiéndose el desplazamiento de los investigadores en forma más segura. Este sistema de arrastre, adaptado de la Universidad de Washington (GADES 1998) permite medir en forma continua en superficies peligrosas, capturando datos cada pocos segundos.

Las antenas empleadas tienen un largo de medio dipolo de 5 a 20 m, las que se conectan en la etapa transmisora a un transmisor de impulso (Tabla 1). En el receptor, las antenas se conectan a un osciloscopio digital de captura digital (Tabla 2). Los datos son

Tabla 2. Receptores
Table 2. Receivers

Osciloscopio	Modelo	Ancho de Banda (MHz)	Almacenamiento	Probado en Chile por
Hitachi	V-209	20	Análogo	CASASSA 1992
Tektronics	THS-720	100	Digital	CASASSA et al. 1998 RIVERA & CASASSA 2000
Fluke	PM-97	50	Digital	GILBERT at al. (1996)

almacenados en el disco duro de un computador portátil mediante una conexión vía puerta serial (RS232). Todo el sistema (computador portátil, transmisor y osciloscopio) es alimentado por baterías de 12 V.

Para posicionar las mediciones de espesor de hielo con los sistemas de radar en perfilaje, se emplean receptores GPS, que permite almacenar una posición cada 5 segundos. En el sistema porteado por dos investigadores, los receptores GPS son llevados por el investigador que lleva el transmisor. La precisión de estas mediciones topográficas depende de la calidad de los receptores, pudiendo alcanzar precisiones sub-métricas, mediante el uso del método GPS diferencial y receptores de calidad topográfica o geodésica.

Radar digital para mediciones continuas (perfilaje), realizadas con motos de nieve

Para mediciones de espesor de hielo en grandes superficies cubiertas por nieve y sin grietas en superficie, se ha diseñado un sistema de perfilaje digital, que se monta sobre trineos de fibra de vidrio, los cuales son impulsados por una moto para nieve, mediante el uso de cuerdas de montaña unidas con mosquetones. Se utilizan antenas con longitud de medio dipolo de 20 m, dispuestas en línea y con un largo total del sistema de radar de 120 m. El trineo receptor se ubica a 40 m de la moto, y el trineo del transmisor, 100 m atrás de la moto. Para posicionar las mediciones, se emplean receptores GPS que se instalan en la moto de nieve (CASASSA et al. 1998; RIVERA & CASASSA 2000; RIVERA & CASASSA en prensa).

Radar digital para mediciones continuas (perfilaje) realizadas a bordo de helicópteros y aviones.

En los últimos años se han implementado nuevos sistemas de medición de espesor de hielo en perfilaje con apoyo de helicópteros y aviones. Estos sistemas han sido empleados con éxito en varios países, midiéndose en forma rápida y efectiva glaciares en zonas remotas.

En Noruega, KENNET et al. (1993) emplearon satisfactoriamente un sistema de radar montado en helicóptero, con el que se midió 300 m de hielo temperado. Este sistema consistía en un transmisor de impulso con una frecuencia central de 6 MHz y antenas cuyo largo de medio dipolo era de 8 m.

Un sistema aerotransportado similar pero con un transmisor de 150 MHz, probado satisfactoriamente en Antártica donde se midió un máximo de 3643 m de hielo frío (STEINHAGE et al. 1999), ha sido empleado recientemente en Chile, con pobres resultados para hielo temperado de Patagonia y Chile central. Este sistema posee una antena compuesta por un cono reflector, bajo la cual se colocan las antenas dipolo, que se insertan en tubos de fibra de vidrio, todo lo cual cuelga del helicóptero (DAMM et al. 1999, CASASSA et al. 2001).

En Noviembre de 2001, un sistema de radio eco sondaje montado en avión Twin Otter de la Fuerza Aérea de Chile (FACH), fue probado en glaciares del Parque Nacional Torres del Paine (CARDENAS 2002).

Captura, despliegue y análisis de datos.

La captura de datos en los sistemas de radar es controlada normalmente vía software. Los programas de captura empleados hasta ahora en los equipos descritos en este trabajo, se han diseñado en Qbasic, permitiendo controlar diversos parámetros del osciloscopio receptor.

Los programas permiten definir el número de promedios para cada disparo. También se puede definir el formato de captura, que por lo general está compuesto por 500 puntos para cada disparo. Los datos se almacenan en formato binario, grabando cada disparo en 512 o 1024 bytes (500 o 1000 bytes con data y un encabezado de 12 o 24 bytes). Un archivo completo esta formado por varios disparos, con un volumen en bytes igual al número de disparos multiplicado por 512 o 1024 bytes, más un encabezado general de 512 o 1024 bytes, con información que describe el archivo en términos de escalas de tiempo, de voltaje, promedios empleados y nombre del archivo.

En términos de escala de tiempo, se emplean escalas que fluctúan entre 20 microsegundos (ms) para grandes espesores (hasta 1700 m aproximadamente) y 2 ms para espesores pequeños, inferiores a 170 m. Esto quiere decir que, del total de la señal transmitida, se capturan únicamente tiempos de retorno inferiores al valor máximo señalado. En términos de voltaje, se emplean sensibilidades altas en el osciloscopio para captar el máximo de detalles. Los valores típicos fluctúan entre 5 y 50 mV. La selección depende del tipo de osciloscopio empleado y las características de los retornos con respecto al ruido medioambiental. En forma paralela y simultánea a la captura de las señales de retorno del radar, se graba un archivo log de registro de tiempo, que almacena - para cada disparo de radar - la hora en que fue efectuado. Este archivo será el que permita relacionar cada medición de radar con datos capturados con GPS.

Cada disparo puede ser apreciado en dos formatos complementarios: diagrama A (amplitud) y diagrama R (raster). El diagrama A, permite desplegar cada disparo en un eje de coordenadas cartesianas, donde la abscisa representa tiempo y la ordenada voltaje. Este tipo de representación, es especialmente útil para determinar con precisión la forma del pulso transmitido, así como la amplitud y tiempo del retorno. El diagrama raster, permite desplegar todos y cada uno de los disparos en formato de imagen, donde las columnas representan desplazamientos horizontales (cada disparo) y las filas representan tiempo de retorno, a partir del cual se puede calcular el espesor del hielo. Este tipo de representación permite analizar e interpretar en forma interactiva cada perfil, determinándose con facilidad el inicio del disparo superficial, así como la posición del retorno subglacial.

La interpretación de los perfiles se realiza mediante la conversión de los diagramas A, a un formato raster importable en el software comercial IDRISI, donde cada archivo es desplegado y analizado en pantalla. En general los datos son sometidos a una ecualización de sus histogramas de frecuencia, con el objeto de desplegar sólo aquellos rangos de valores digitales donde se ubican las amplitudes de voltaje asignables a los retornos subglaciales. Una vez determinados los retornos subglaciales, se contrasta la interpretación con los diagramas A de cada disparo. Una vez aceptada la validez del retorno subglacial, se procede a digitalizar en pantalla el inicio de cada retorno subglacial, el cual se caracteriza por un aumento local significativo de la amplitud de voltaje del registro. Esta digitalización en pantalla, asigna un valor de tiempo de retorno (two-way travel time) para cada disparo almacenado en terreno. Con este valor se procederá a calcular el espesor de hielo para cada disparo.

Individualmente, cada disparo puede presentar complicaciones interpretativas, debido a que los retornos de fondo pueden presentar amplitudes muy similares al ruido de fondo o ambiental existente en el momento de captura de los datos. Pero al analizar secuencialmente los disparos en el formato raster, se obtiene la continuidad espacial del sustrato subglacial, facilitándose significativamente la interpretación.

Debido a la naturaleza eléctrica de las antenas dipolo utilizadas, las ondas electromagnéticas transmitidas desde la superficie se irradian en todas las direcciones, y los retornos que se capturan en el sistema de recepción, no sólo provienen del punto subglacial ubicado a menor distancia del radar. En primera instancia llega la señal transmitida superficialmente, que viaja en el aire a la velocidad de la luz. Luego y con un tiempo de retorno que depende del espesor de hielo, comienzan a llegar las señales que han rebotado en el sustrato rocoso, tanto del punto ubicado verticalmente bajo el radar, como de aquellos puntos ubicados en las cercanías, que pueden tener menor espesor de hielo dependiendo de la rugosidad topográfica subglacial.

Lo anterior implica que los retornos capturados, no necesariamente provienen del punto subglacial ubicado verticalmente bajo la superficie, sino que puede provenir de puntos ubicados lateralmente y a menor distancia de la superficie. Este tipo de problemas es más significativo en zonas con pendiente superficial y subglacial importante. Para solucionar esos problemas interpretativos, los registros de rádar deben ser corregidos mediante una técnica geofísica conocida como migración, con el fin de corregir posibles retornos laterales y asignar un espesor más preciso al punto ubicado inmediatamente abajo del sistema de radar ubicado en la superficie.

A pesar de las bondades interpretativas de la representación raster, pueden darse numerosos problemas con los registros, como por ejemplo, la existencia de retornos laterales o de substratos morrénicos o volcánicos a nivel intraglacial, los que pueden llegar a atenuar las señales transmitidas, impidiendo la penetración de espesores mayores. Además de la atenuación, existen típicamente numerosos problemas de conexión de antenas o ruido ambiental, que generan registros confusos o no interpretables.

Cálculo de espesores

Para calcular el espesor de hielo en cada punto de medición, se emplea la siguiente ecuación basada en trigonometría básica y cinemática (CASASSA & RIVERA, 1998):

$$H = \sqrt{\left\{\left(t + \frac{S}{v_a} * \frac{v_i^2}{4} - \frac{s^2}{4}\right)\right\}}$$

ECUACIÓN 1

Donde,

H, es el espesor de hielo, en m
v_a, es la velocidad de propagación de la onda en el aire (299.8 $m\mu s^{-1}$)
v_i, es la velocidad de propagación de la onda en el hielo, en $m\mu s^{-1}$
s, es la distancia entre el centro geométrico del transmisor y el receptor, en m
t, es el tiempo de retorno del eco subglacial (two-way travel time), en μs^{-1}

Para determinar la velocidad de propagación de las ondas de radar en el hielo, pueden emplearse valores conocidos de permisividad dieléctrica relativa, obtenidos en laboratorio. Para el hielo puro y homogéneo, puede aplicarse la siguiente ecuación (MACHARET et al. 1993):

$$v_i = \frac{v_a}{\sqrt{\varepsilon}}$$

ECUACIÓN 2

Donde,
ε, es la parte real de la permisividad dieléctrica relativa del hielo (en adelante permisividad).

En el caso de glaciares fríos, JEZEK et al. (1978) midieron valores de velocidades de propagación en hielo del orden de 167 mμs^{-1}, lo que implica una permisividad cercana a 3.17.

Para glaciares temperados sin embargo, MACHARET et al. (1993) midieron velocidades menores, del orden de 161 ± 6.9 mμs^{-1}, especialmente en las zonas de ablación de glaciares en la ex URSS. Lo que implica una permisividad promedio de 3.47.

Aplicar una permisividad teórica a glaciares temperados como los existentes en Chile, puede generar algunas diferencias significativas de velocidad, debido a varios factores. En primera instancia, el margen de error en la velocidad del hielo de MACHARET et al. (1993), puede explicarse por inhomogeneidades en la presencia de agua en el hielo y las distintas capas de nieve-neviza-hielo en el glaciar. Otro factor que puede incidir en la velocidad de propagación de las señales en el hielo, es la frecuencia central del sistema (PLEWES & HUBBARD, 2001). Ésta es una función de las características del trasmisor, y de la naturaleza de las antenas, particularmente su largo. La frecuencia puede ser calculada según la siguiente ecuación, que relaciona longitud de onda con velocidad de propagación de la onda (LUCERO, 2001):

$$f = \frac{v_i}{4L}$$

Ecuación 3

Donde,

f, frecuencia central del sistema (MHz).
L, es el largo del semi dipolo empleado en el sistema (m).

Otro factor que puede incidir en la velocidad de propagación de las ondas en el hielo es la variación en la conductividad eléctrica del hielo, que se genera por presencia de impurezas, tales como cenizas volcánicas, materiales morrénicos, etc. Para estimar el factor de pérdida (Pw), asociado a la presencia de impurezas, puede emplearse la siguiente ecuación (PLEWES &HUBBARD, 2001):

$$P_w = \varepsilon * C * \omega$$

Ecuación 4

Donde,

c, es la conductividad eléctrica del hielo en (mS / m)
ω, es la frecuencia angular del sistema, que según REES (2001), puede calcularse con la siguiente ecuación:

$$\omega = 2 * \pi * f$$

Ecuación 5

Donde,

π, es 3.1416

La ecuación que relaciona los anteriores parámetros y que permite estimar la velocidad de transmisión de señales en el hielo, está definida por la siguiente ecuación (PLEWES & HUBBARD, 2001);

$$v_i = v_a \Big/ \sqrt{\left\{ (\varepsilon/2)\left[\left(1 + P_w^2 \right) + 1 \right] \right\}}$$

Ecuación 6

Debido a que en Chile no existen mediciones propias de velocidad de transmisión de las señales de radar en el hielo, se asumirán las velocidades obtenidas en glaciares templados por MACHARET et al. (1993).

Para determinar el error en la determinación del espesor de hielo, se emplea la ecuación siguiente,

$$RMS = \sqrt{\sum (H_x - H_{x'})^2 / n}$$

ECUACIÓN 7

Donde,

RMS (Root-mean-square o error cuadrático medio), es el error del conjunto de datos (m)
H, es el espesor medido en el punto "x" donde dos perfiles RES se cruzan (m)
n, el número de datos comparados

Los datos comparables corresponden a intersecciones de perfiles de radar, donde se mide el mismo punto en dos perfiles distintos o donde se sabe el espesor por otros métodos (sísmica o testigos de hielo).

Cálculo de las características de las superficie subglacial

Para la determinación de las características basales del hielo, se puede calcular la potencia de reflexión de fondo y su comparación con la reflexión interna. GADES et al. (2000) y COPLAND & SHARP, (2001), han empleado este parámetro para determinar las características basales en Siple Dome, Antártica y en el glaciar Johns Evans, Ellesmere Island, Artico Canadiense. Comparando las reflexiones internas del glaciar y de fondo del glaciar, es posible caracterizar y mapear las condiciones hidrológicas y térmicas en la base del glaciar.

La potencia de reflexión de fondo (BRP, bed-reflection power) que es medida con RES, puede indicar la atenuación a la que se ve sometida la señal de radar, tanto por las condiciones internas del hielo, como por la presencia de agua y otras impurezas. Para ello, se puede comparar la reflexión de fondo con la reflexión interna del glaciar (IRP, internal reflection power).

La potencia de retorno de las señales de radar se define como (GADES et al. 2000)

$$P = \frac{1}{2(t2 - t1 + 1)} \sum_{i=t1}^{t2} A_i^2$$

ECUACIÓN 8

Donde,

P, es la potencia de reflexión ($mV^2\ ns^{-1}$)
t1 y t2, representan el inicio y final en tiempo para cada ventana de medición (ns)
A, es la amplitud de retorno (mV)

La ventana de tiempo para la reflexión interna IRP, debe calcularse unos pocos nano-segundos (ns) después de que ha terminado el pulso superficial y unos pocos antes de que comience el subglacial, con el fin de evitar el ruido de la señal aérea. La ventana de medición de la reflexión subglacial (BRP), comienza inmediatamente antes del inicio del retorno subglacial y cubre toda la señal de fondo.

Valores bajos de IRP y BRP son propios de estructuras internas de hielo poco complejas, con escasa presencia de agua e inclusiones morrénicas u otras perturbaciones de origen dinámico (grietas, moulins, etc), tales como las existentes en glaciares fríos. Altos valores de IRP y BRP denotan condiciones típicas de glaciares temperados.

Para calcular ambas reflexiones, deben eliminarse los disparos con retornos con problemas de conexión o con ruidos ambientales excesivos generados por la operación de radios VHF o presencia de metales, todo lo cual puede alterar las reflexiones internas y de fondo.

RESULTADOS

Como puede apreciarse en la tabla 3 se han medido con RES cinco glaciares de los Andes centrales (30°S a 41°S).

Tabla 3. Especificiones de la medición
Table 3. Measurement specifications

Nombre del Glaciar	Tipo de glaciar	Lugar de medición	Transmisor	Receptor	GPS empleado	Sistema empleado	Fecha medición
Tapado	Frio	Zona de acumulación. Nieve en superficie.	Bristol	Fluke PM-97	Trimble Geoexplorer II	Perfilaje con cañas en paralelo	Febrero 1999
Juncal Norte	Templado	Zona de Ablación. Hielo descubierto con pocos detritos.	Bristol	Fluke PM-97	Trimble Geoexplorer II	Perfilaje con cintas en línea	Enero 2001
			OSU	Tektronics THS-720	Trimble Pathfinder II plus	Perfilaje con cañas en paralelo	Enero 1999
San Francisco	Templado	Zona de ablación. Nieve y material morrénico en superficie.	Bristol	Fluke PM-97	Trimble Geoexplorer II (sin datos de posición)	Perfilaje con cañas en paralelo	Enero 1998
Esmeralda	Frio	Zona de acumulación. Nieve en superficie.	Narod	Tektronics THS-720	Trimble Geoexplorer II	Perfilaje con cintas en línea	Diciembre 2000
Casa Pangue	Templado	Zona de ablación. Hielo cubierto con detritos.	OSU y Bristol	Fluke PM-97	Garmin III plus	Puntual con antenas al descubierto en paralelo	Julio 2000

NOTA:

Sistema en línea:



Sistema en paralelo:



Glaciar Tapado

El glaciar Tapado (30°08'S, 69°55'W, 3.6 km² de superficie RIVERA et al. 2000) fue seleccionado por un equipo de investigadores suizos (GINOT et al. en prensa), quienes buscaban un glaciar ubicado en las proximidades de la llamada diagonal árida de los Andes (MESSERLI et al. 1998), con el fin de reconstruir mediante la extracción de un testigo de hielo, las condiciones paleoclimáticas de los últimos cientos de años, especialmente en relación con la presencia de eventos El Niño-Oscilación del Sur (ENOS).

El testigo extraído tuvo un largo total de 36 m y permitió determinar características glacio-químicas del hielo por un período de cerca de 100 años. En este período se detectó una alta variabilidad interanual de la acumulación de nieve, debido a la frecuencia del fenómeno ENOS, que afectó el glaciar con valores positivos de acumulación durante años con períodos El Niño, o fase negativa de la Oscilación del Sur (GINOT et al. en prensa). El glaciar es frío, con temperaturas de -8.5 °C en superficie y -12.5 °C en la base del glaciar, a 36 m de profundidad.

Debido a que la superficie del glaciar estaba compuesta por penitentes (LLIBOUTRY, 1954), debió generarse un sendero en la nieve para transitar con el radar. En total se midieron tres perfiles (uno longitudinal y dos transversales) ubicados a 5530 m.s.n.m., en un sector cercano a la cumbre del Cerro Tapado (5536 m.s.n.m. Fig. 2a). Resultados preliminares de radar se presentan en RIVERA et al. (2000c).

Se empleó un largo de antenas de 5 m, con una escala de tiempo de 0.2 μs^{-1} por división (con este procedimiento se captura-

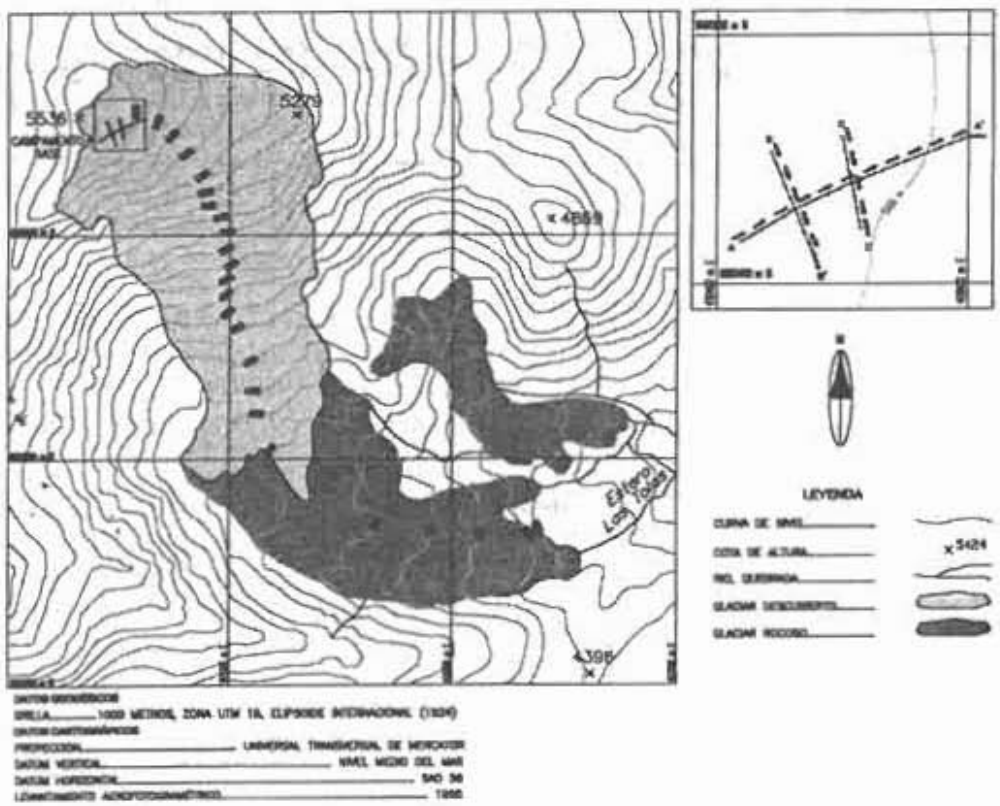


Fig. 2a. Ubicación de perfiles y carta base del glaciar Tapado, Cerro Tapado.
Fig. 2a. Location of the profiles and base map of Tapado glacier, Cerro Tapado

ron 20 divisiones), una separación de las antenas de 10 m y una amplitud de voltaje de 50 mV por división (se capturaron en total 8 divisiones).

Los perfiles transversales interceptaron al longitudinal en dos puntos (Tabla 4), uno de los cuales se ubicó muy cerca del sitio de extracción del testigo de hielo permitiendo determinar el margen de error del sistema. Al comparar los valores de la Tabla 4, puede estimarse con la ecuación 7, un error de 2 m para las mediciones realizadas, lo que equivale a un 6 % del espesor máximo del glaciar (Tabla 4). Se empleó una velocidad de propagación de hielo frío de 167 m μs^{-1}, determinándose un espesor máximo de 42 m (Fig. 2b). Con esta velocidad y largo de antenas de 5 m, se definió una frecuencia central de 8.3 MHz.

Las mediciones de topografía superficial llevadas a cabo con GPS de calidad topográfica, permitieron localizar los perfiles de radar y determinar la topografía superficial del glaciar (Fig. 2c). Sin embargo, al comparar las alturas obtenidas en 1999 con las alturas de las curvas de nivel de la carta del Instituto Geográfico Militar generada con fotos aéreas de 1955, no fue posible detectar ninguna señal significativa de adelgazamiento o engrosamiento del glaciar.

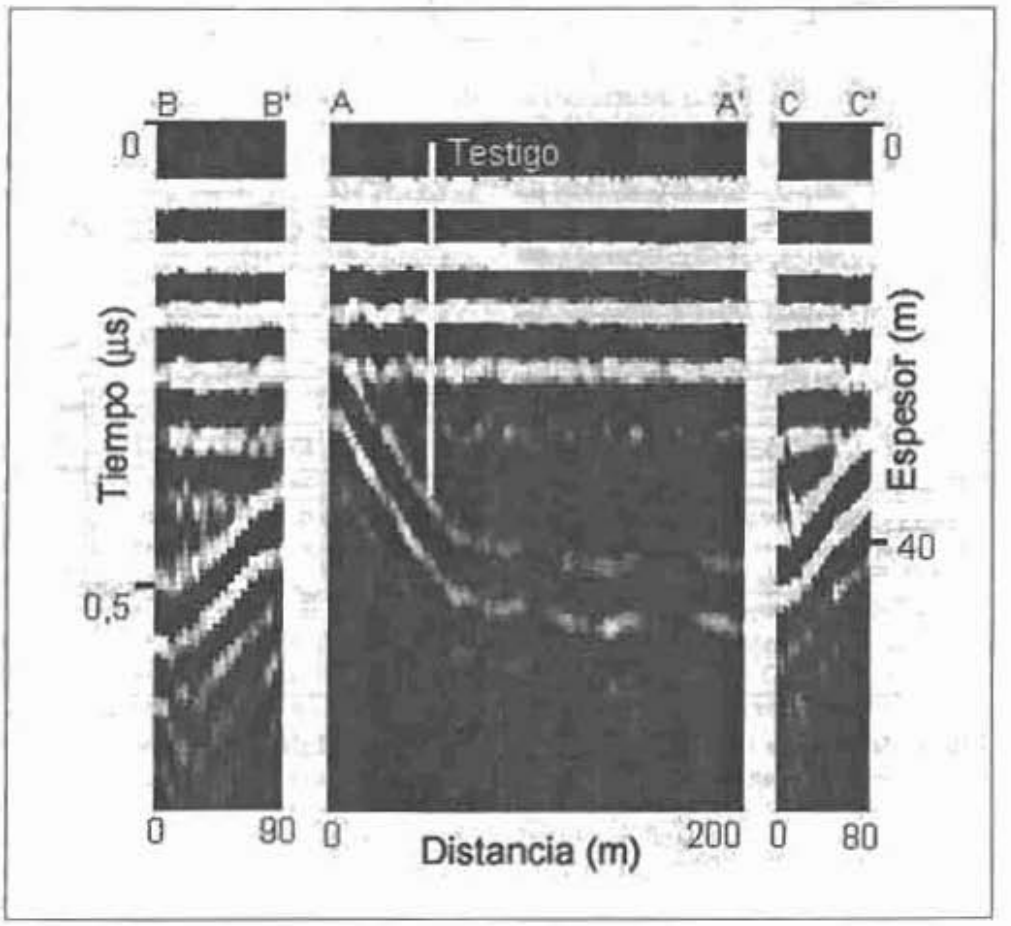


Fig. 2b. Perfiles de radar en formato raster del glaciar Tapado.
Fig. 2b. Radar profiles in raster format of Tapado glacier.

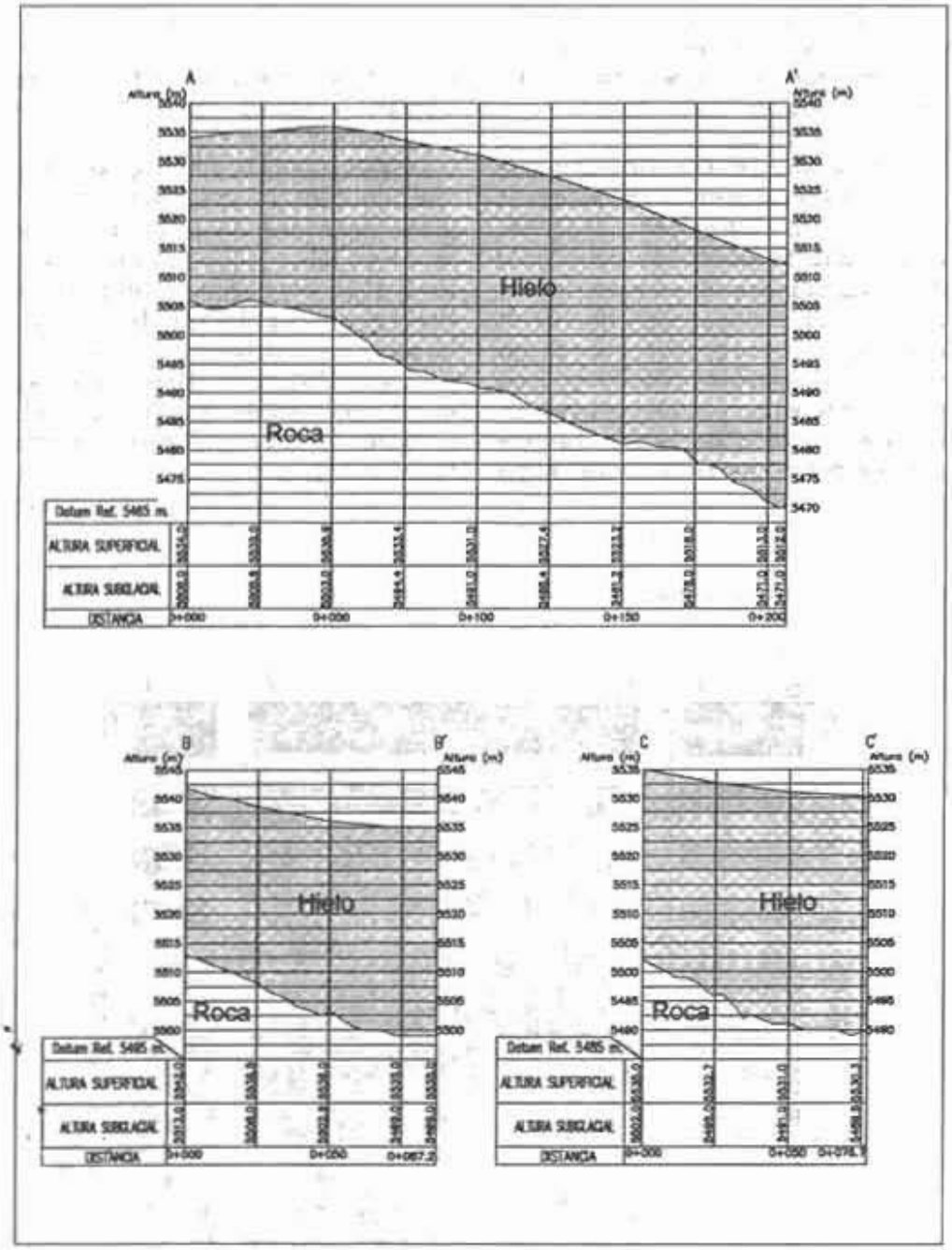


Fig. 2c. Perfiles con topografía superficial y subglacial del glaciar Tapado.
Fig. 2c. Subglacial and surface topography profiles of Tapado glacier.

TABLA 4. ESPESORES (M) MEDIDOS EN LAS INTERSECCIONES (GLACIAR TAPADO)
TABLE 4. THICKNESS (M) MEASURED IN THE INTERSECTIONS (TAPADO GLACIER)

Baliza	Espesor perfil A-A'	Espesor perfil B-B'	Espesor perfil C-C'	Largo del testigo de hielo
2	33	34		36
3	44		41	

Glaciar San Francisco

En Enero de 1998 se realizó una campaña a la zona de ablación (2910 a 2560 m.s.n.m.) del glaciar San Francisco (33°S, 70°45'W, 1.9 km² de superficie sergún MARANGUNIC, (1979) Fig. 3a), ubicado en la cuenca alta del río Maipo (Fig. 1). Allí se midieron tres perfiles, mediante un sistema de radar digital portátil, con antenas de 8 m y una separación de 10 m. El glaciar es temperado, como lo evidencia la presencia de agua superficial y subglacial que fluye por medio de varios cauces que se unen en el frente del glaciar.

La configuración estrecha y encerrada del valle donde se encuentra este glaciar, permitió sólo una pobre cobertura satelital para la obtención de datos GPS, lo que impidió obtener posiciones detalladas para cada perfil. Se midió posiciones GPS con receptores Trimble Geoexplorer II, tanto en una estación base ubicada en el campamento base, como durante la realización de cada perfil. El error de dichas mediciones fue muy elevado, por lo que la corrección diferencial no permitió posicionar completamente los perfiles.

Los perfiles fueron obtenidos mediante el uso del sistema de radar montado en cañas de fibra de vidrio, con antenas en paralelo, midiéndose espesores cada 10 m. La pendiente superficial del glaciar en la zona de medición era bastante abrupta (20-25°), por lo que era difícil desplazarse con el sistema de 16 m de largo. No obstante lo anterior, la ayuda de 6 estudiantes permitió completar el perfil.

Si bien las mediciones se realizaron en la zona de ablación del glaciar y en medio del verano, la superficie del glaciar estaba completamente cubierta por nieve, debido a un invierno especialmente nivoso, probablemente relacionado con la presencia del fenómeno de El Niño en el invierno de 1997. Esta cobertura nivosa cubrió la mayor parte de las grietas existentes en el glaciar, lo que facilitó el desplazamiento del equipo e investigadores.

Se empleó una velocidad de propagación de las ondas de 161 m μs^{-1} para hielo temperado. El espesor máximo medido en el perfil longitudinal fue de 94 m (A-A' en Figs. 3a y 3b). La última parte de este glaciar, está recubierta por una importante capa de detritos en superficie de un espesor que varía de algunos centímetros hasta un par de metros, la que no impidió la penetración de las señales de radar, obteniéndose espesores del orden de 60 m de hielo. Con esta velocidad y largo de antenas, se definió una frecuencia central de 5 MHh.

Dos perfiles transversales fueron medidos, al inicio y al final del perfil longitudinal. El perfil transversal superior (B-B' en Fig. 3c), tiene una forma de U típica, con un espesor máximo de 91 m. El perfil transversal inferior (C-C' en Fig. 3c), tiene un espesor máximo de 71 m.

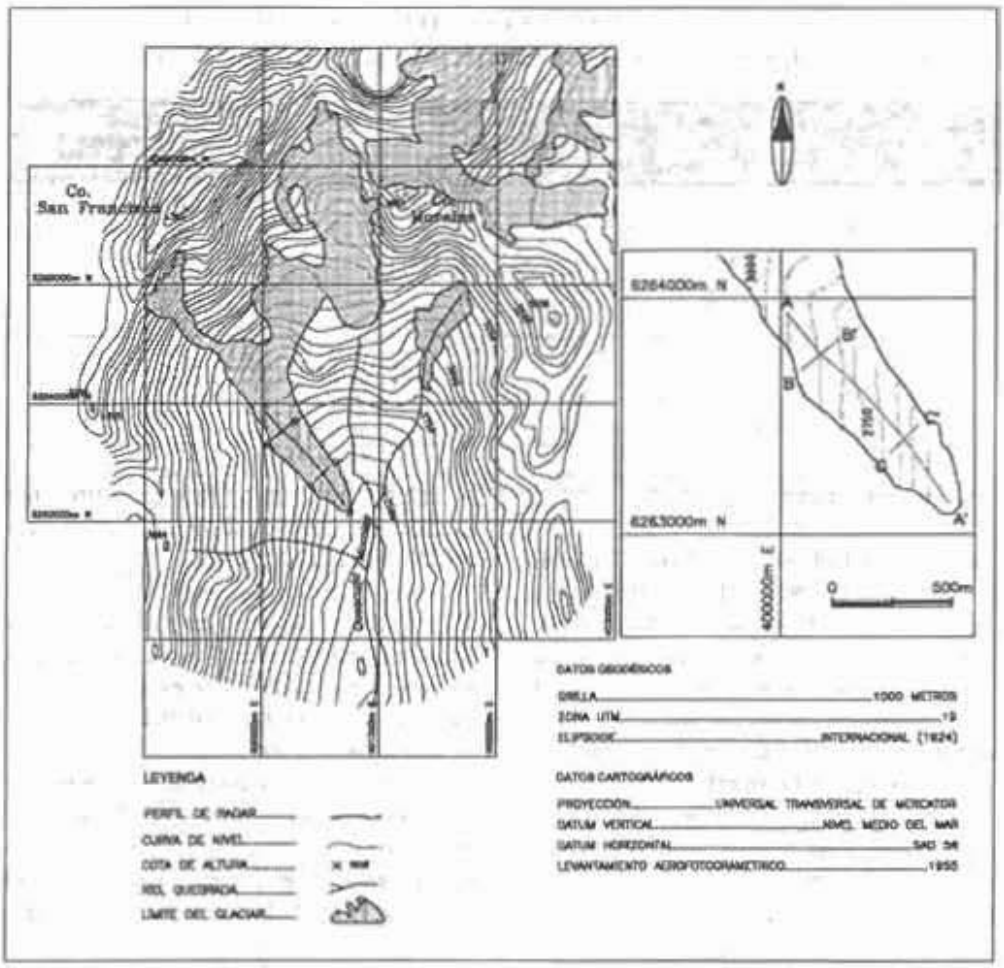


Fig. 3a. Ubicación de perfiles y carta base del glaciar San Francisco, Quebrada de Morales.

Fig. 3a. Location of the profiles and base map of San Francisco glacier, Quebrada de Morales.

Las intersecciones entre los perfiles son poco precisas debido a la falta de cobertura GPS. Sin embargo, una estimación preliminar muestra que el perfil transversal alto y el longitudinal tienen diferencias errores del orden de 1 a 2 m. Comparativamente, el perfil transversal inferior respecto del longitudinal, tiene una diferencia de 10 a 20 m, la cual se explica en parte por la fuerte pendiente del sustrato y por la falta de precisión en la localización de los perfiles.

Glaciar Esmeralda

El glaciar Esmeralda (33°14'S, 70°13'W, 4.8 km^2 de superficie según MARANGUNIC 1979) fue seleccionado por investigadores suizos, interesados en extraer un testigo de hielo desde la cumbre del cerro el Plomo (5430 m.s.n.m.), con el fin de estudiar y reconstruir condiciones paleoclimáticas y posibles relaciones con fenómenos ENSO (SCHWIKOWSKI et al. 2001). A pesar de la ausencia mediciones de temperatura del glaciar, se estima que se trata de un glaciar frío, por su altitud y ausencia de agua de fusión en superficie,.

Se midieron 2 perfiles (Fig. 4a), mediante el uso de un sistema de radar digital portátil que permitió obtener datos continuos de la topografía subglacial. Se emplearon antenas de 8

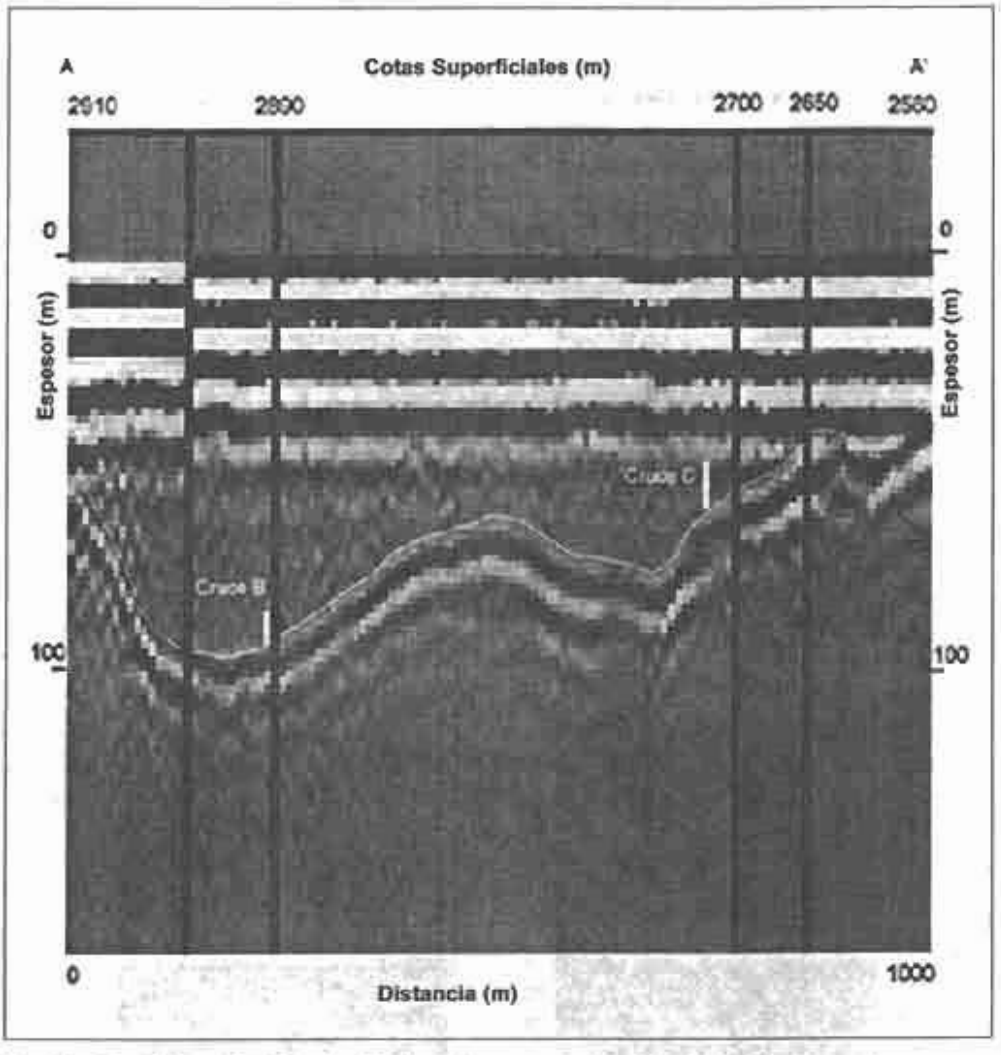


Fig. 3b. Perfil de radar longitudinal en formato raster del glaciar San Francisco.
Fig. 3b. Longitudinal radar profile in raster format of San Francisco glacier.

m (frecuencia central de 5 MHz) con una separación de 13 m. Se usó una escala de 0.5 µs y una amplitud de voltaje de 10 mV por división. El espesor máximo medido en este glaciar fue de 95 m.

En el formato raster de despliegue de los datos (Fig. 4b), la topografía subglacial tiene forma en V, sin embargo al aplicar un modelo de migración de Kirchoff desarrollado por el Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile (Emilio Vera, comunicación personal y SCHWIKOWSKI 2001) pudo determinarse una forma en U típica de morfología glacial (Fig. 4c).

Al comparar las intersecciones de ambos perfiles (Tabla 5), puede apreciarse que, en el formato raster, las diferencias son mínimas. Sin embargo al aplicar el modelo de migración, el error aumenta significativamente. Esto puede significar, que el sistema de radar es consistente entre sí en términos de valores absolutos, referidos a la distancia mínima al fondo subglacial. Sin embargo, para efectos de migración, vale decir al calcular el espesor medido verticalmente bajo el radar, se requiere que los datos sean adquiridos a intervalos constantes en distancia, lo que obviamente es difícil en glaciares con penitentes o grietas, donde los perfiles no son

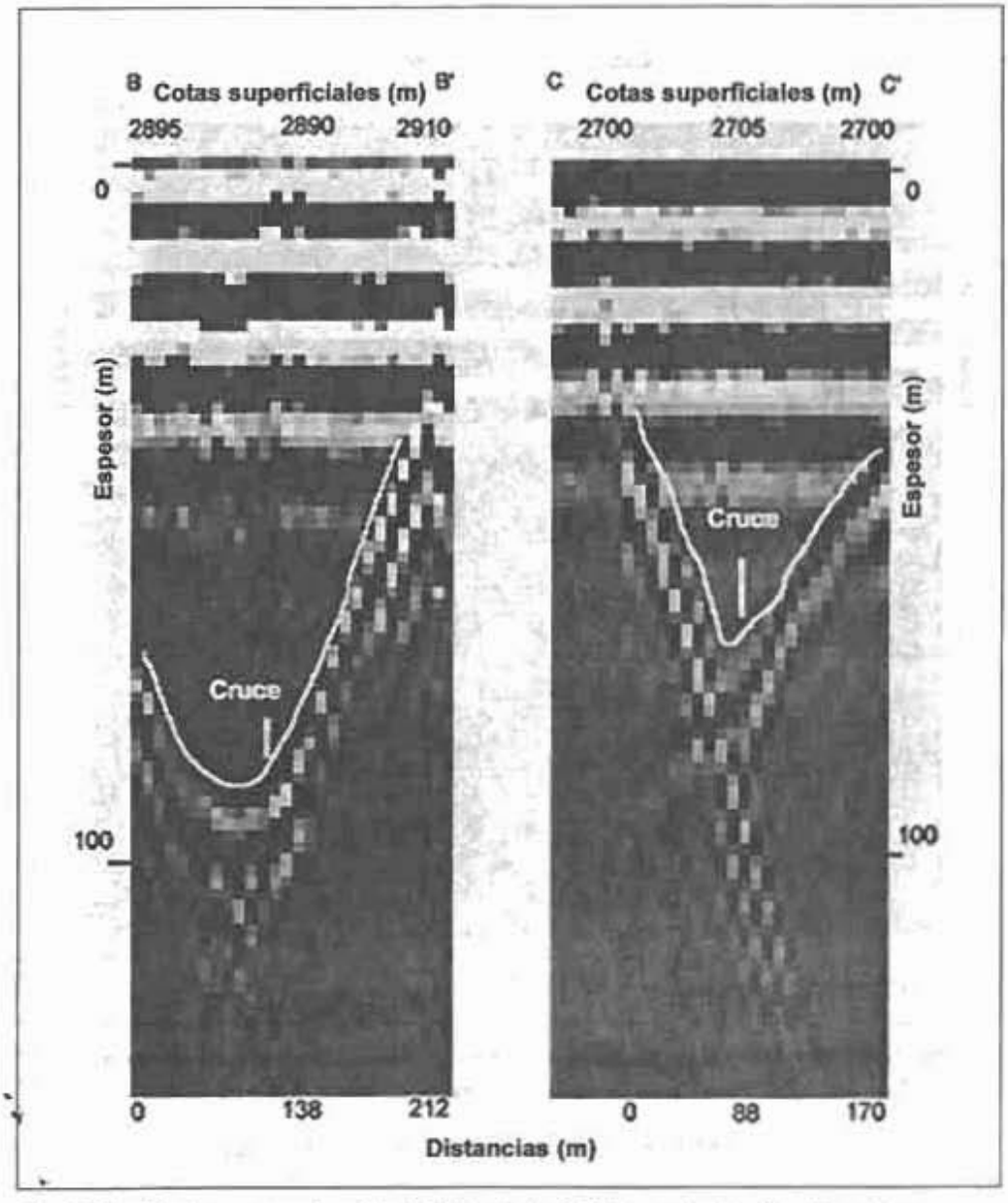


Fig. 3c.Perfiles transversales alto (B-B') y bajo (C-C'), en glaciar San Francisco.
Fig. 3c. Transverse profiles at high altitude (B-B') and low altitude (C-C') of San Francisco glacier.

necesariamente lineales y los intervalos espaciales de captura no necesariamente son constantes con la distancia, lo que afecta el proceso de migración. Otro problema que puede haber incidido en el aumento del error en el espesor es el uso de una velocidad de propagación de 170 m μs^{-1}, óptima para colapsar las hipérbolas de reflexión, pero superior a la velocidad de propagación en hielo. Los perfiles de espesor de hielo migrados pueden considerarse como experimentales, en espera del desarrollo de modelos más complejos, por ejemplo que consideren separación homogénea de trazas y una velocidad de propagación de la ondas más realista, que puedan reducir el margen de error y mejorar la representación del relieve subglacial.

La Fig. 4d, presenta los perfiles de radar corregidos topográficamente mediante el uso de los datos capturados con receptores GPS. En ambos casos se observa una topografía superficial de escasa pendiente, con un fuerte relieve subglacial.

Tabla 5. Espesores de hielo medidos en intersecciones del glaciar Esmeralda (m)
Table 5. Ice thickness measured in intersections of the Esmeralda glacier (m)

Perfil	Raster	Migrado
Diagonal (A-A')	77	94
Transversal (B-B')	75	79
Promedio	76	87
RMS	1	11

Glaciar Juncal Norte

En Enero de 1999 y 2000, se realizaron dos campañas a la zona de ablación del glaciar Juncal Norte (33°02', 10°06'W, 9.02 km^2 de superficie), en la cuenca alta del río Aconcagua (Fig. 5a).

Este glaciar ha experimentado un leve retroceso de su lengua terminal durante gran parte del siglo 20 (RIVERA et al. 2000a). Su lengua terminal esta semi-cubierta por material morrénico, especialmente en la parte baja, donde una gruesa capa de detritos cubre el frente del glaciar. La lengua terminal está rodeada por una terraza lateral (kame), que denota el adelgazamiento del hielo desde el último avance glaciar, probablemente durante la pequeña edad de hielo (Little Ice Age, LIA).

En la zona de ablación del glaciar, se han medido espesores de hielo en dos ocasiones, mediante el uso de un sistema de radar portátil digital. Se han probado tanto el sistema de antenas soportadas por cañas de fibra de vidrio en paralelo como el de cintas de escalada en línea, resultando ambos sistemas exitosos. Se emplearon antenas de 8 m de largo, separadas cada 10 m, con escala de tiempo de 0.2 (s por división y una amplitud de voltaje de 50 mV por división.

La Fig. 5b muestra un perfil longitudinal medido en el centro de la lengua terminal en enero del 2001. El perfil fue interrumpido en la mitad por fallas en la conexión de las antenas, sin embargo, en aquellos sectores con datos, la resolución es buena, incluso apreciándose bastantes elementos de la estructura interna del glaciar.

El glaciar es templado, como lo indica la gran cantidad de agua presente, por lo que se empleó una velocidad de propagación de la onda de 161 m μs^{-1}. A pesar de la gran cantidad de material morrénico que recubría el glaciar en su parte terminal (algunas decenas de centímetros de espesor), así como del agua supra e intra glacial, las ondas del radar pudieron atravesar la totalidad del hielo, permitiéndose una clara determinación de la topografía subglacial. Con esta velocidad y largo de antenas, se define una frecuencia central de 5 MHz.

La Fig. 5c, muestra el perfil topográfico que se generó a partir de la combinación de datos de radar con GPS. En aquellos sectores donde no se captó señales GPS o donde la cobertura satelital fue insuficiente para obtener precisiones mejores que 10 m en la vertical, la topografía superficial fue interpolada linealmente. El espesor máximo medido fue

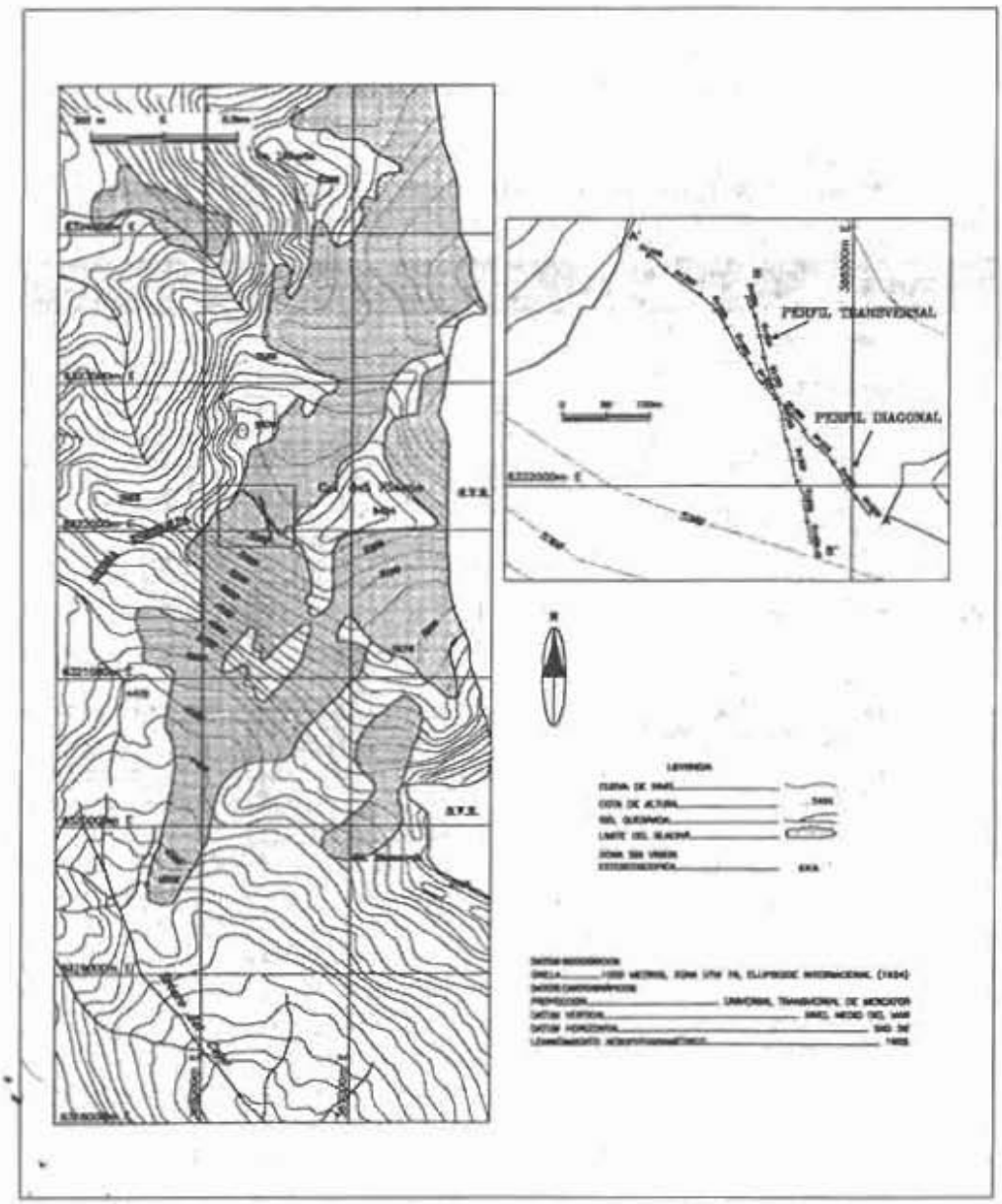


Fig. 4a. Ubicación de perfiles y carta base del glaciar Esmeralda, cerro El Plomo.
Fig. 4a. Location of the profiles and base map of Esmeralda glacier, cerro El Plomo.

230 m de hielo. Se observa un adelgazamiento del hielo glaciar abajo.

Glaciar Casa Pangue

En Julio de 2000, se midieron espesores de hielo en la zona de ablación del glaciar Casa Pangue (41°7' S / 71°51'W, 7 km² de superficie según RIVERA 1989; Fig. 6a), ubicado en la ladera norte de monte Tronador (3432 m.s.n.m. Fig.1), mediante el uso de un sistema de radar en paralelo de carácter puntual y captura digital.

La superficie del glaciar estaba cubierta con detritos y material morrénico de un espesor aproximado a 30 cm, compuesto por bloques y sedimentos finos. Debido a que se trata de

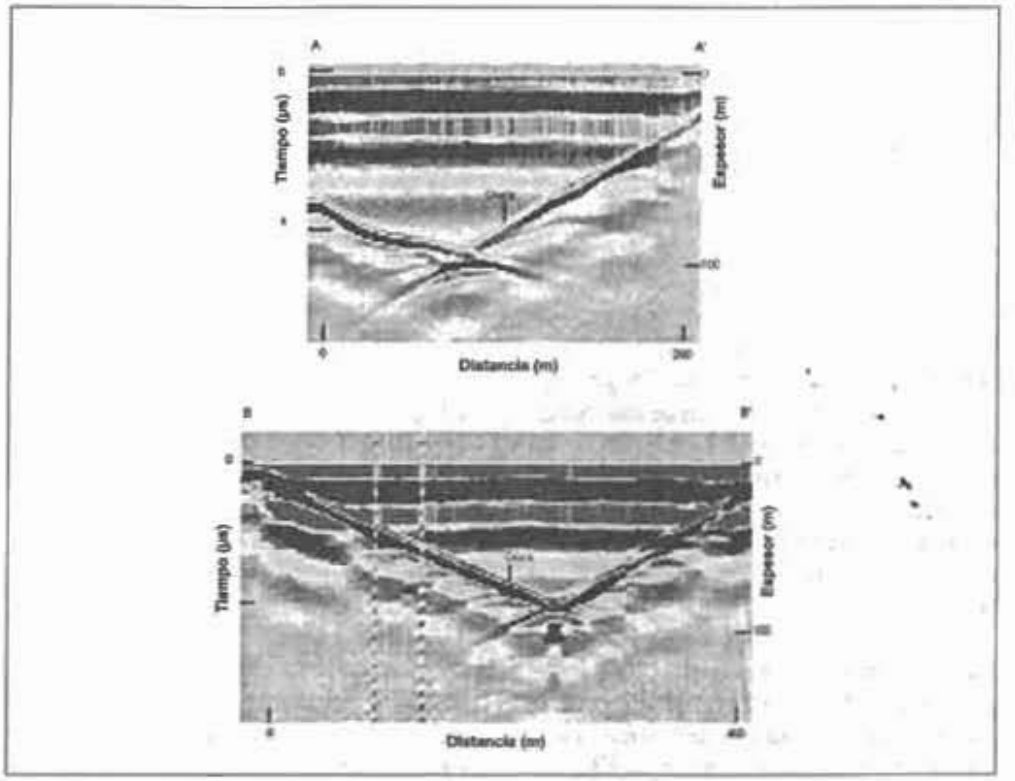


Fig.4b. Perfiles de radar en formato raster en el glaciar Esmeralda: Diagonal (A-A') y transversal (B-B').
Fig. 4b. Radar profiles in raster format of Esmeralda glacier: Diagonal (A-A') and transverse (B-B').

hielo templado en altitudes bajas, con presencia de agua en superficie y fuerte ablación, se empleó una velocidad de propagación de 161 m μs^{-1}.

Tabla 6. Glaciar Casa Pangue. Espesores medidos aproximadamente a 860 m.s.n.m.
Table 6. Casa Pangue glacier. Thickness measured at altitude ~ 860 m.

Archivo	N° de disparos	Transmisor	Largo de antenas empleadas en m	Tiempo en μs^{-1}	Espesor en m
Pangue1	14	Bristol	5	Ruido	Ruido
Pangue2	13	Bristol	8	2.12	173
Pangue3	15	OSU	5	1.98	162
Pangue4	15	OSU	8	1.98	176
Promedio					170±10

Las antenas fueron desplegadas en superficie en forma descubierta, sin el uso de cintas de montaña o cañas de fibra de vidrio. Se probó distintas configuraciones, descritas en la Tabla 6, efectuando todas las pruebas en un mismo sitio. Empleando el transmisor Bristol y antenas de 5 m, no fue posible discriminar el retorno de fondo, debido a que las señales fueron muy ruidosas, confundiéndose el retorno de fondo con el ruido ambiental. Empleando las mismas antenas pero con el transmisor OSU, el resultado fue un poco mejor, pero la señal fue difícil de interpretar. Con antenas de 8 m, las señales de fondo capturadas con ambos transmisores fueron mucho más claras y fáciles de interpretar, debido a que la señal fue más estable y el ruido de fondo no fue encubierto el retorno subglacial.

La Fig. 6b muestra un diagrama "A", con el promedio de las trazas medidas en el perfil Pangue3. La amplitud total de la señal ha sido limitada a (175 mV, sin embargo el disparo superficial tiene una amplitud de voltaje mucho mayor. El retorno subglacial es consistente en la totalidad de las trazas promediadas, definiéndose un espesor promedio de 162 m para este archivo.

Empleando la ecuación 1 y una velocidad de propagación propia de glaciares templados, se determinó un espesor promedio de 170 m considerando todas las mediciones realizadas. Aplicando la ecuación 7, se calculó un RMS de 10 m, que representa aproximadamente un 6% del espesor promedio medido en el punto.

Cálculo de potencia de reflexión

Se estudió la reflexión de fondo e interna de dos glaciares: Tapado y Juncal Norte. En ambos casos se aplicó la ecuación 8, definiéndose para cada disparo o traza, la ventana correspondiente (t1-t2).

La Fig. 7, muestra los valores de IRP y BRP obtenidos en el perfil A-A' del glaciar Tapado. Como puede apreciarse, los valores de IRP son inferiores a 1, con un promedio de 0.3 $mV^2 ns^{-1}$. Los valores de BRP varían bastante a lo largo del perfil, sin ninguna relación con el espesor existente en el glaciar. EL BRP promedio es de 2.3 $mV^2 ns^{-1}$.

La Fig. 8, muestra los valores obtenidos en el perfil A-A' del glaciar juncal Norte, donde se detectaron valores superiores de IRP (1.7 $mV^2 ns^{-1}$), con algunas oscilaciones locales pero en general dentro del mismo rango (1 a 2.5 $mV^2 ns^{-1}$). Los valores de BRP son bastante elevados, fluctuando entre 1.8 $mV^2 ns^{-1}$ y 7 $mV^2 ns^{-1}$. El promedio de BRP es de 3.6 $mV^2 ns^{-1}$ y en general tiende a aumentar con el menor espesor. Esta tendencia no es plena (baja correlación entre ambos parámetros), probablemente debido a la presencia de grietas y cursos de agua subglacial.

Tabla 7. Estimación de espesor promedio de hielo basado en una relación empírica en función de la superficie del glaciar (MARANGUNIC 1979)
Table 7. Mean estimated ice thickness as a function of the glacier area (MARANGUNIC 1979)

Area (km2)	Espesor promedio de hielo (m)
0-0.10	5
0.11-0.50	20
0.51-1.00	40
1.01-2.00	65
2.01-5.00	90
5.01-10.00	120
10.01-20.00	155
>= 20.01	200

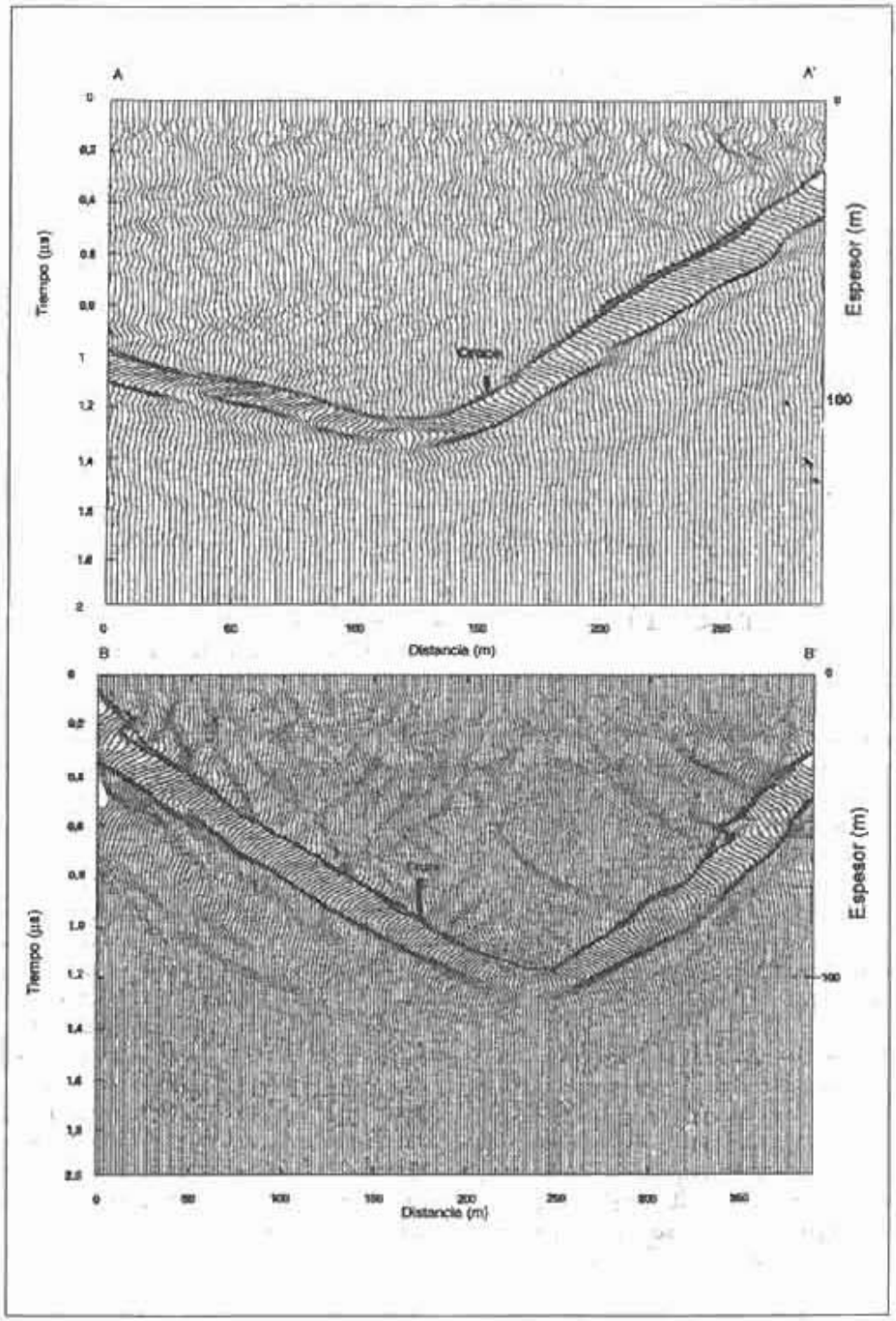


Fig. 4c. Perfiles de radar migrados en el glaciar Esmeralda: Diagonal (A-A') y transversal (B-B').
Fig. 4c. Migrated radar profiles of Esmeralda glacier: Diagonal (A-A') and transverse (B-B').

Tabla 8. Espesores promedio estimados del hielo para los glaciares estudiados en el presente trabajo.
Table 8. Mean estimated ice thickness for glaciers studied in the present work.

Glaciar	Area km²	Espesor promedio según MARANGUNIC (1979) en m	Número de puntos donde se obtuvo espesor de hielo con radar en m	Espesor promedio de hielo por glaciar, medido con radar, en m
San Francisco	1.9	65	117	64
Tapado	3.6	90	158	38
Esmeralda	4.8	90	289	60
Casa Pangue	7	120	1 (promedio de 29 disparos en el mismo sitio)	170
Juncal Norte	9.02	120	746	186

DISCUSIÓN

La estimación del volumen equivalente en agua almacenado en glaciares de Chile central, presentada por MARANGUNIC (1979), se basa en una relación empírica entre la superficie y el espesor promedio de glaciares de montaña del hemisferio norte, según se indica en la Tabla 7.

De acuerdo con esta relación empírica, el espesor promedio teórico de los glaciares descritos en el presente trabajo se indica en la Tabla 8.

Los resultados de radar presentados en este trabajo permiten una evaluación independiente del espesor de hielo en cada uno de los 5 glaciares estudiados. Si suponemos que las mediciones de radar fueron realizadas en sectores representativos de cada glaciar, entonces el promedio de todas las mediciones de espesor en cada glaciar resulta en una adecuada estimación del espesor promedio del glaciar. Este supuesto es probablemente una buena aproximación para los glaciares donde se realizaron mediciones en perfiles, ya sea longitudinales o transversales, que cubren cada glaciar de margen a margen, como es el caso del Tapado, Juncal Norte, Esmeralda y San Francisco. En el caso del glaciar Casa Pangue, existe solamente una medición puntual, la cual no se puede pretender que sea representativa del espesor promedio del glaciar. En la Tabla 8 se indica el número de puntos con determinación de mediciones de espesor de hielo mediante radar y el valor promedio del espesor.

Se observa una buena concordancia sólo en el rango de 1 a 2 km² de superficie, donde el espesor promedio medido en el glaciar San Francisco es prácticamente igual al estimado por MARANGUNIC (1979). En los demás glaciares existe una discrepancia significativa, que puede deberse a la escasa representatividad de las mediciones realizadas o a que los espesores pueden tener una alta variabilidad, dependiendo no sólo de la superficie total del glaciar, sino que principalmente de las características topográficas del lugar donde se ubica cada glaciar.

En general se aprecia que los espesores aumentan en la medida que las superficies aumentan, sin embargo los glaciares Tapado y Esmeralda, presentan espesores asignables al rango inmediatamente inferior en tamaño. Esto puede deberse a que en estos dos glaciares, sólo se midió las zonas de acumu-

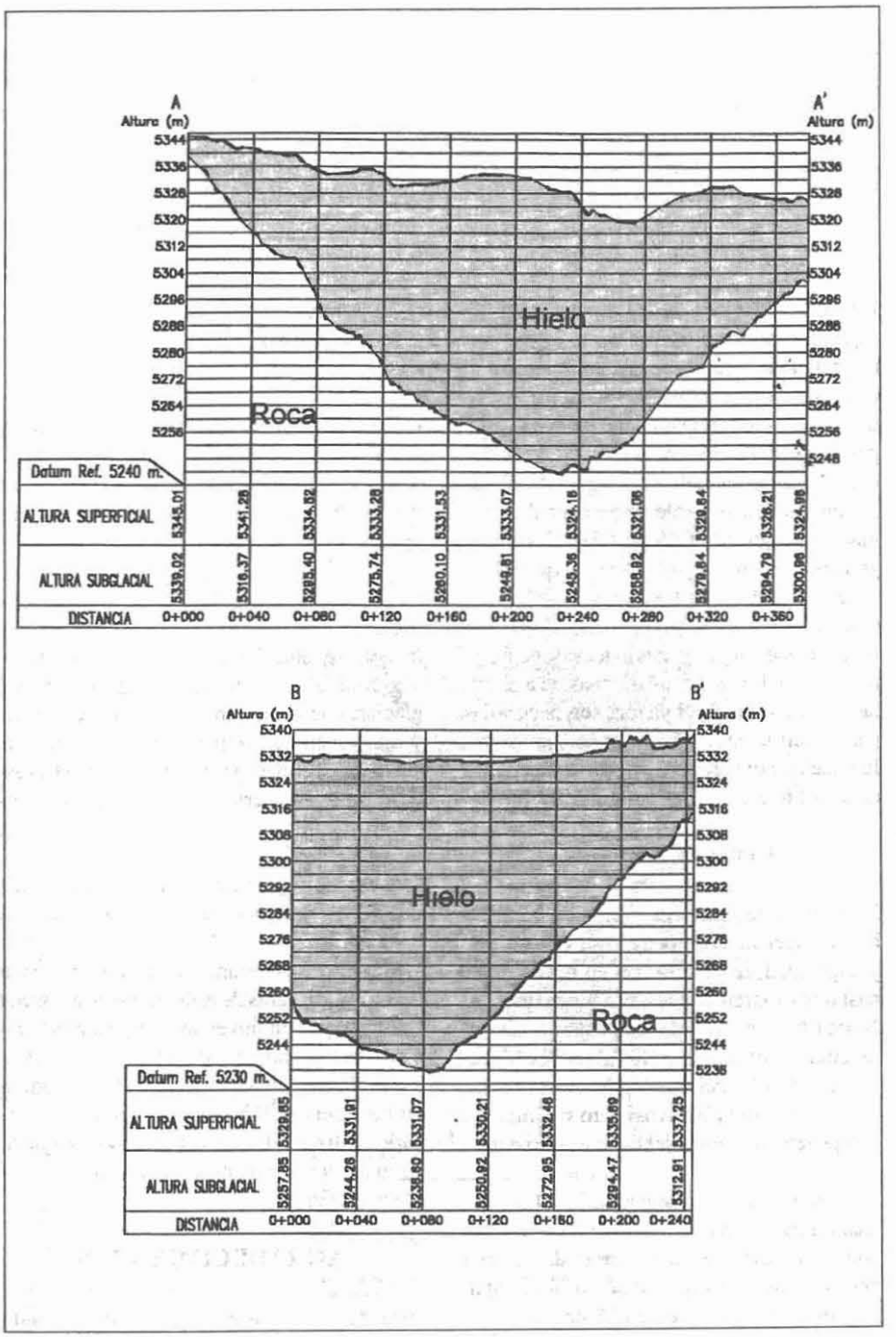


Fig. 4d. Perfiles con topografía superficial y subglacial en el glaciar Esmeralda.
Fig. 4d. Subglacial and surface topography profiles of Esmeralda glacier.

lación y no pudo accederse a las zonas de ablación. En otras palabras, los espesores promedios obtenidos con datos de radar están subestimados.

En los glaciares Juncal Norte, San Francisco y Casa Pangue, donde se midió solamente en las zonas de ablación, es posible suponer que los espesores promedios están sobrestimados.

Una aplicación directa de las mediciones de espesor es el cálculo del volumen equivalente en agua que se encuentra almacenado en estos glaciares, que puede obtenerse considerando la superficie total del glaciar, el espesor promedio presentados en la Tabla 8, y una densidad del hielo de 0.9 g cm^{-3}. El volumen total en equivalente en agua de los 5 glaciares aquí estudiados es de 2.5 km^3 según los espesores de MARANGUNIC (1979) y de 3.1 km^3 según los espesores medidos con radar (un 22% superiores), lo que demuestra que nuevas y más extensas mediciones, que incluyan tanto las zonas de acumulación como las de ablación, son necesarias para determinar con mejor precisión los volúmenes equivalentes de agua almacenados en la cordillera.

CONCLUSIONES

El sistema de radio eco sondaje empleado hasta la fecha ha demostrado su versatilidad y capacidad de penetración en condiciones bastantes extremas, desde hielo frío en el Norte Chico, hasta hielo templado y recubierto, como el existente en los glaciares Juncal Norte y San Francisco, donde la atenuación y ruido son significativos, pero no impiden una penetración total del hielo allí existente.

En términos de los sistemas empleados, destacan aquellos que permiten una medición continua (perfilaje) que entrega datos cada pocos metros de espaciamiento horizontal, dependiendo de la velocidad de desplazamiento sobre el hielo.

El sistema de radar que se transporta caminando sobre el hielo, permite recorrer zonas de grietas y topografía compleja, midiendo espesores donde los sistemas motorizados no pueden acceder, o donde los aerotransportados no tienen la resolución adecuada.

Los errores involucrados en la determinación de los espesores de hielo (1 a 6% del espesor total medido) dependen básicamente de la precisión de los datos GPS y de la complejidad de la topografía subglacial, que puede requerir migración, en aquellos casos donde el relieve subglacial se presenta muy rugoso.

La medición de la potencia de reflexión de radar, permite estimar las condiciones basales de los glaciares medidos, en especial la presencia de agua y la condición térmica de la base glaciar.

La comparación de los espesores promedio por glaciar con estimaciones previas, muestra que hay una alta incerteza en los volúmenes equivalentes de agua asignados a los glaciares de Chile central, por lo que nuevas y más extensas campañas de medición son necesarias, con el fin de una mejor determinación de las reservas de agua existentes en esta parte del país.

Los datos presentados en este trabajo pueden servir para evaluar la disponibilidad de reservas hídricas en los glaciares de Chile Central. Considerando que prácticamente todos los glaciares de esta región están retrocediendo y disminuyendo de espesor (RIVERA et al. 2000a), se podría proyectar la evolución futura de estos glaciares y su impacto en las reservas hídricas. Para ello, es necesario realizar estudios detallados de balance de masa, y correlacionarlos con datos hidrometeorológicos.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo es parte del proyecto del Fondo Nacional de Ciencias y Tecnología (FONDECYT) N° 1000445. Carlos Cárdenas y Rubén Carvallo, han colaborado con el diseño y mantención del sistema de radar. Alvaro Giannini, Alfonso Fernández, José

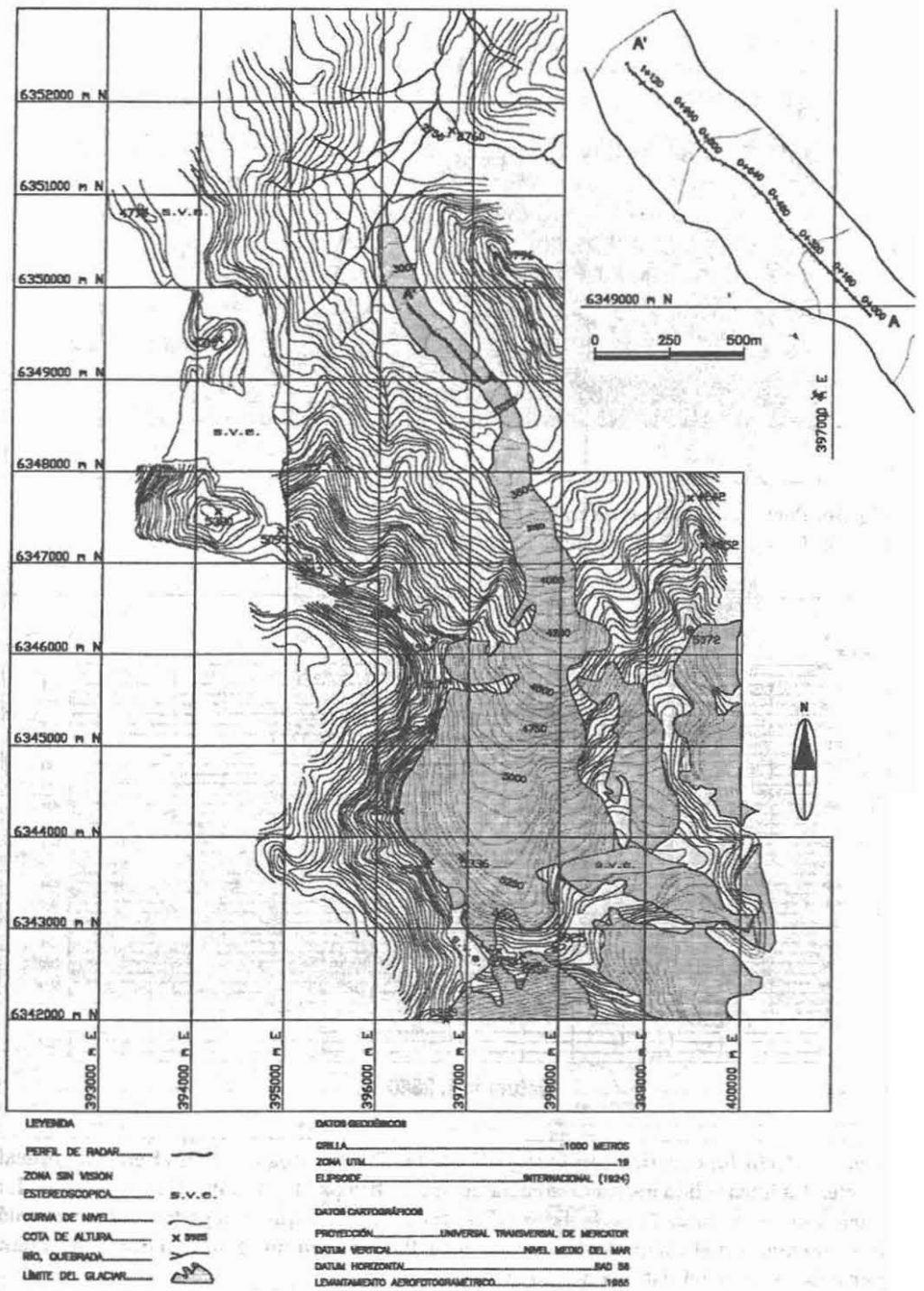


Fig. 5a. Ubicación de perfiles y carta base del glaciar Juncal Norte.
Fig. 5a. Location of the profiles and base map of Juncal Norte glacier.

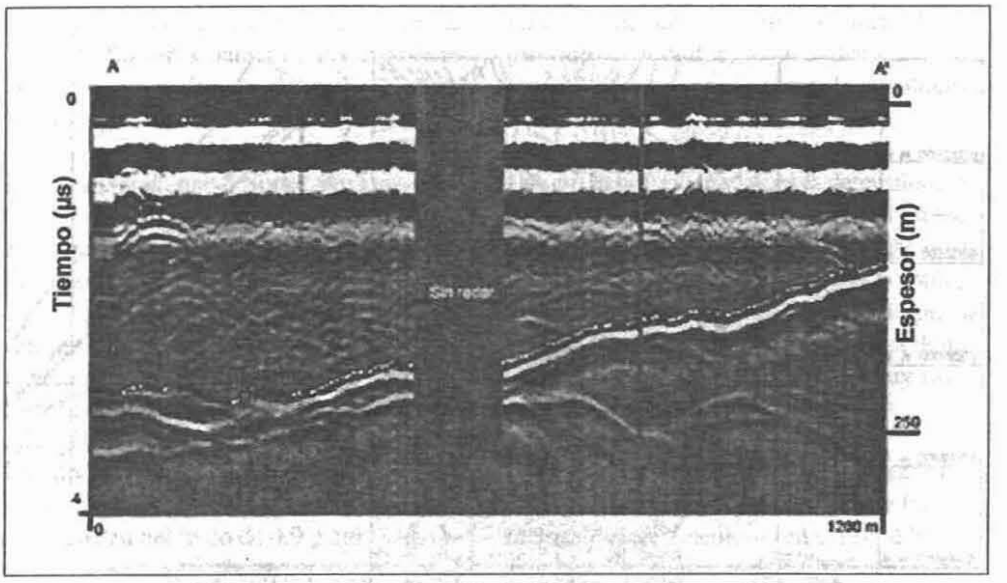


Fig. 5b. Perfil longitudinal de radar en formato raster, glaciar Juncal Norte.
Fig. 5b. Longitudinal radar profile in raster format, Juncal Norte glacier.

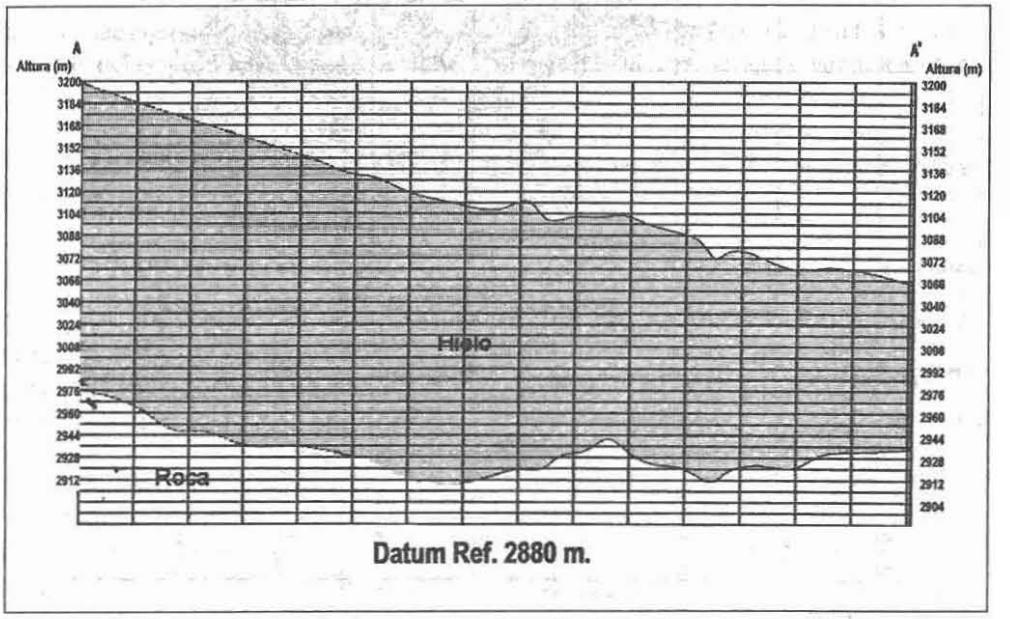


Fig. 5c. Perfil topográfico con topografía superficial y subglacial en el glaciar Juncal Norte. La línea sólida indica existencia de datos GPS para la topografía superficial. La línea punteada indica falta de datos GPS precisos, por lo que la topografía se interpoló linealmente. En el rango de distancias entre 400 y 560 m no se obtuvo datos de radar, por desconexión del sistema de radar.
Fig. 5c. Subglacial and surface topography profile of Juncal Norte glacier. The solid line indicates the presence of GPS data for the surface topography. The dotted line indicates the lack of high precision GPS data (the topography here was linearly interpolated). Between 400 and 560 m, no radar data was obtained due to connection problems of the radar system.

Araos (Universidad de Chile) y Jorge Quinteros de la Dirección General de Aguas, han colaborado con la logístico y seguridad en montaña durante varias expediciones. Se agradece la colaboración y financiamiento de la Facultad de Arquitectura y Urbanismo de la Universidad de Chile, para la realización de campañas de terreno a los glaciares de Chile Central. Se agradece el apoyo de la Escuela de Alta Montaña del Ejército de Chile, en la realización de la campaña al glaciar Juncal Norte. La Corporación Ncaional Fo-

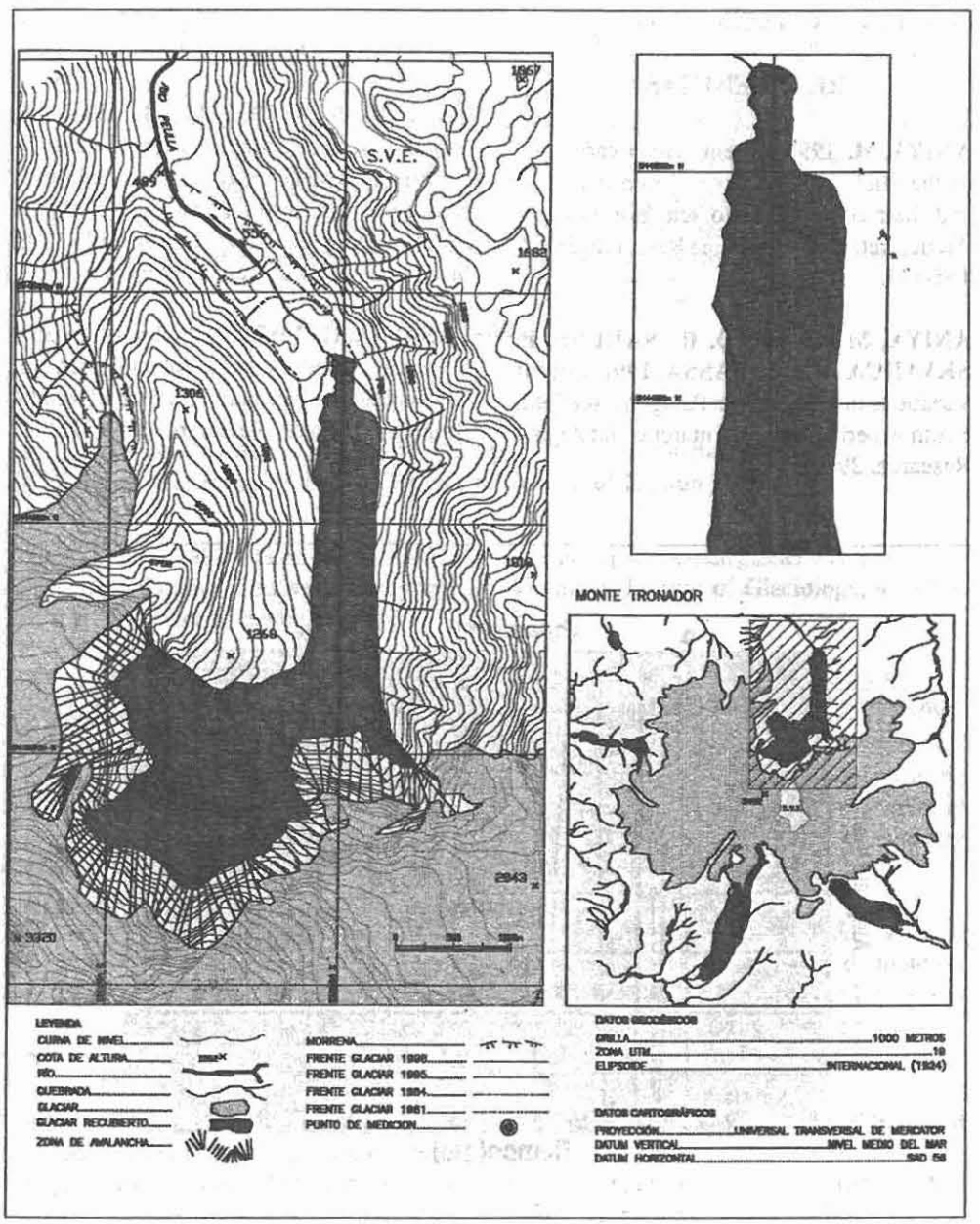


Fig. 6a. Ubicación de punto de medición y carta base con posiciones frontales del glaciar Casa Pangue, monte Tronador.

Fig. 6a. Location of the point of measurement and base map with the frontal variations of Casa Pangue glacier, monte Tronador.

restal ha colaborado en las campañas a los glaciares Casa Pangue y San Francisco. Se agradece a Margit Schwikowski del Instituto Paul Scherrer (PSI) de Suiza, por las campañas al Cerro Tapado y glaciar Esmeralda. El apoyo del Centro de Estudios Científicos, CECS, Valdivia, ha sido apreciable. CECS es un Instituto Científico Milenio.

REFERENCIAS

ANIYA, M. 1999. Recent glacier variations of the Hielos Patagónicos, South America, and their contribution to sea-level change. Arctic, Antarctic and Alpine Research, 31(2): 165-173.

ANIYA, M., H. SATO, R. NARUSE, P. SKVARCA & G. CASASSA, 1997. Recent variations in the Southern Patagonia Icefield, South America. Arctic, Antarctic and Alpine Research, 29(1): 1-12.

BOGORODSKY, V., C. BENTLEY & P. GUDMANSEN, 1985. Radioglaciology. Riedel Publishing Co., Nederlands.

CÁRDENAS, C. 1998. Evaluación de transmisores de radar para hielo: aplicación en Patriot Hills, Antártica. Tesis de Ingeniero Civil Eléctrico, Universidad de Magallanes, Punta Arenas, 213 pp. Inédita.

CÁRDENAS, R. 2002. Uso de un sistema digital de radar, altimetría láser, video y fotografía a bordo de un avión para medir propiedades de glaciares. Tesis de Ingeniero de Ejecución Eléctrico, Universidad de Magallanes, Punta Arenas, 89 pp. Inédita.

CASASSA, G. 1987. Ice thickness deduced from gravity anomalies on Soler Glacier, Nef Glacier and the Northern Patagonia Icefield. Bulletin of Glacier Research, 4: 43-57.

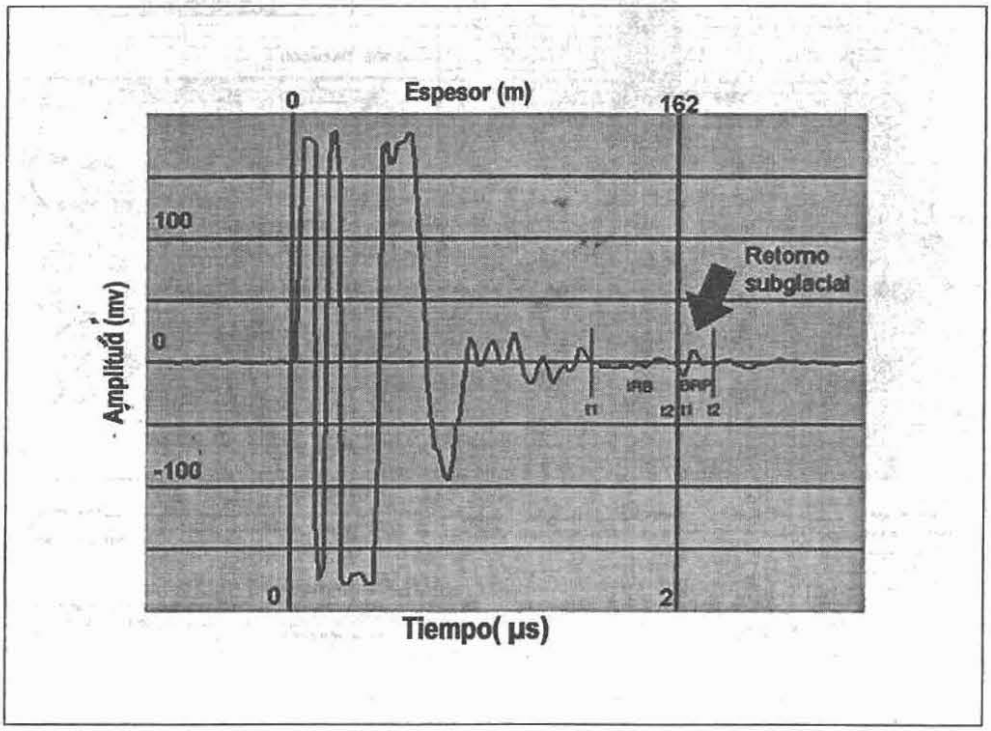


Fig. 6b. Diagrama A medido en el glaciar Casa Pangue, con indicaciones de IRP y BRP (ver texto para detalles).

Fig. 6b. A scope signal measured at Casa Pangue glacier, with indication of IRP and BRP (see text for details).

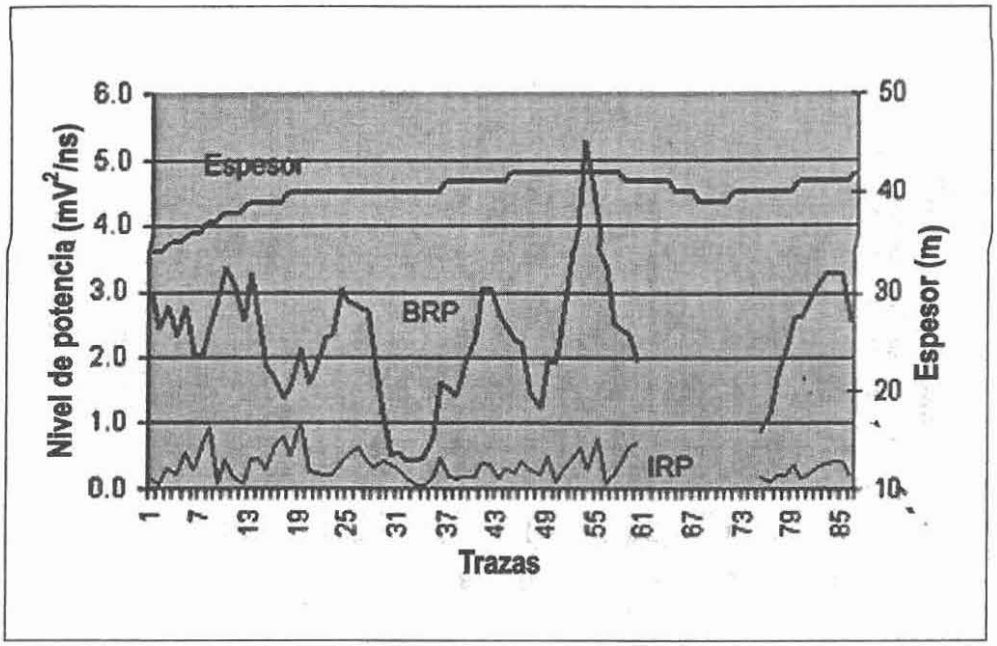


Fig. 7. Potencia de reflexión IRP y BRP del perfil A-A' del glaciar Tapado.
Fig. 7. Power reflection IRP and BRP of profile A-A' of Tapado glacier.

CASASSA, G. 1992. Radio-echo sounding of Tyndall Glacier, southern Patagonia. Bulletin of Glacier Research, 10: 69-74.

CASASSA, G. & A. RIVERA, 1998. Digital radio-echo sounding at Tyndall Glacier, Patagonia. Anales del Instituto de la Patagonia, Serie Ciencias Naturales, 26:129-135.

CASASSA, G., A. RIVERA, H. LANGE, R. CARVALLO, H. BRECHER, C. CÁRDENAS, & R. SMITH, 1998. Radar and GPS studies at Horseshoe Valley, Patriot Hills, Antarctica. FRISP Report 12: 7-18.

CASASSA, G., V. DAMM, D. EISENBURGER, M. JENETT, C. CARDENAS, C. ACUÑA, A. RIVERA & H. LANGE, 2001. Estudios glaciológicos en Patagonia y Chile Central utilizando un sistema aerotransportado de radio eco sondaje. Anales del Instituto de la Patagonia, Serie Ciencias Naturales, 29: 25-44.

COPLAND, L. & M. SHARP, 2001. Mapping thermal and hydrological conditions beneath a polythermal glacier with radio-echo sounding. Journal of Glaciology, 47(157): 232-242.

DAMM, V., G. CASASSA, D. EISENBURGER & M. JENETT, 1999. Glaciological and hydrogeological studies of glaciers in Central Chile and Patagonia using a helicopter borne radio echo sounding system. Operational Report and Preliminary Results, BGR, Germany, 45 pp.

ESCOBAR, F., G. CASASSA & V. POZO, 1995. Variaciones de un glaciar de montaña en los Andes de Chile Central en las últimas dos décadas. Bulletin de l'Institut Francais d'Études Andines 24(3): 683-695.

GADES, A.M. 1998. Spatial and temporal variations of basal conditions beneath glaciers and ice sheets inferred from radio echo-sounding measurements. Ph.D. Thesis, University of Wahington, Geophysics Program, 192 pp.

GADES, A., C. RAYMOND, H. CONWAY, & R. JACOBEL, 2000. Bed properties of

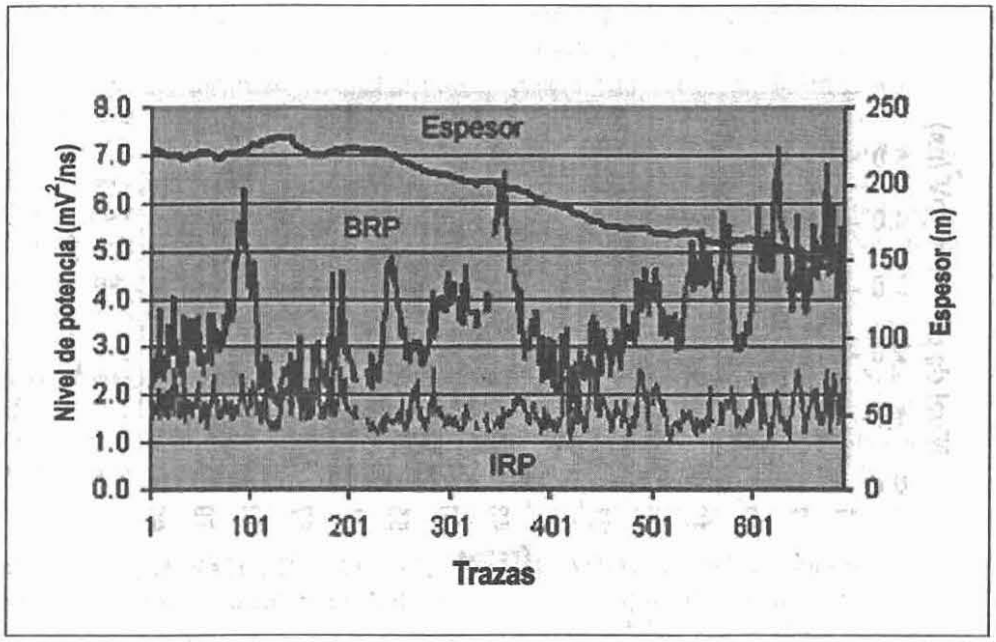


Fig. 8. Potencia de reflexión IRP y BRP del perfil A-A' del glaciar Juncal Norte.
Fig. 8. Power reflection IRP and BRP of profile A-A' of Juncal Norte glacier.

Siple Dome and adjacent ice streams, West Antarctica, inferred from radio-echo sounding measurements. Journal of Glaciology, 46(152): 88- 101.

GILBERT, J., M. STASIUK, S. LANE, C. ADAM, M. MURPHY, S. SPARKS & J. NARANJO, 1996. Non-explosive, constructional evolution of the ice-filled caldera at Volcán Sollipulli, Chile. Bulletin of Volcanology, 58: 67-83.

GINOT, P., M. SCHWIKOWSKI, N. GAGGELER, U. SCHOTTERER, C. KULL, M. FUNK, A. RIVERA, F. STAMPFLI & W. STICHLER. First results of a paleoatmospheric chemistry and climate study of Cerro Tapado glacier, Chile. In CASASSA, G., F. SEPÚLVEDA & R. SINCLAIR (Eds.), The Patagonian Icefields. A unique natural laboratory for environmental and climate change studies, Series of the Centro de Estudios Científicos, Kluwer Academic/Plenum Publishers, New York. En prensa.

JEZEK, K., J. CLOUGH, C. BENTLEY & S. SHABTAIE, 1978. Dielectric permittivity of glacier ice measured in situ by radar wide-angle reflection. Journal of Glaciology, 21(85):199-208.

KENNET, M, T. LAUMANN & C. LUND, 1993. Helicopter-borne radio-echo sounding of Svaritsen, Norway. Annals of Glaciology, 17: 23-26.

KRIMMEL, R. 1999. Analysis of difference between direct and geodetic mass balance measurements at South Cascade glacier, Washington. Geografiska Annaler, 81A(4): 653-658.

LUCERO, N. 2002. Diseño de un radar en HF para medición de espesores de hielo, con ayuda de un helicóptero. Tesis de Ingeniero Civil Eléctrico, Universidad de Magallanes. Punta Arenas , 189 pp. Inédita.

LLIBOUTRY, L. 1954. The origin of penitents. Journal of Glaciology 2(15): 331-338.

MACHARET, Y., M. MOSKALEVSKY & E. VASILENKO, 1993. Velocity of radio waves in glaciers as an indicator of their hydrothermal state, structure and regime. Journal of Glaciology, 29(132): 373-384.

MARANGUNIC, C. 1979. Inventario de Glaciares. Hoya del río Maipo. Dirección General de Aguas, Publicación G-2, Santiago.

MESSERLI, B., C. AMMANN, M. GEYH, M. GROSJEAN, B. JENNY, K. KAMMER & M. VUILLE, 1998. The problem of the "Andean dry diagonal": current precipitation, Late Pleistocene snow line, and lake level changes in the Atacama Altiplano (18°S-28°S/29°S). Bamberger Geographische Schriften, 15: 17-34.

NAROD, B. & G. CLARKE, 1994. Miniature high-power impulse transmitter for radio-echo sounding. Journal of Glaciology, 40(134):190-194.

PEÑA, H. & B. NAZARALA, 1987. Snowmelt-runoff simulation model of a Central Chile Andean Basin with relevant orographic effects. In: Large Scale Effects of Seasonal Snow Cover (Proceedings of the Vancouver Symposium) IAHS Publication 166: 161-172.

PLEWES, L. & B. HUBBARD, 2001. A review of the use of radio-echo sounding in glaciology. Progress in Physical Geography 25(2): 203-236.

RASMUSSEN, L. & R. KRIMMEL, 1999. Using vertical aerial photography to estimate mass balance at a point. Geografiska Annaler, 81A(4): 725-733.

REES, W. 2001. Physical principles of remote sensing. 2nd Edition, Cambridge University Press, UK, 343 pp.

RIVERA, A. 1989. Inventario de Glaciares entre la cuenca del río Bío Bío y Petrohué y su relación con el volcanismo activo. Caso volcán Lonquimay. Memoria para optar al título de Geógrafo, Departamento de Geografía, Universidad de Chile, 202 pp. Inédita.

RIVERA, A. & G. CASASSA, 2000. Variaciones recientes y características de los glaciares Chico y O'Higgins, Campo de Hielo Sur. In: IX Congreso Geológico Chileno, Vol 2, pp. 244-248.

RIVERA, A. & G. CASASSA. Detection of ice thickness using radio echo sounding on the Southern Patagonia Icefield. . In: CASASSA, G., F. SEPÚLVEDA & R. SINCLAIR (Eds.), The Patagonian Icefields. A unique natural laboratory for environmental and climate change studies, Series of the Centro de Estudios Científicos, Kluwer Academic/Plenum Publishers, New York. En prensa.

RIVERA, A., G. CASASSA, C. ACUÑA & H. LANGE, 2000a. Variaciones recientes de glaciares en Chile. Investigaciones Geográficas 34: 25-52.

RIVERA, A., G. CASASSA, C. ACUÑA & R. VIEIRA, 2000b. Recent glacier variations and snow line changes in central Chile. In: Sixth International Conference on Southern Hemisphere Meteorology and Oceanography, pp. 274-275.

RIVERA, A., A. GIANNINI, J. QUINTEROS & M. SCHWIKOWSKI. 2000c. Ice thickness measurements on the glacier of Cerro Tapado, Norte Chico, Chile. In: Annual Report 1999, Labor für Radio-Und Umweltchemie der Universität Bern und des Paul Scherrer Instituts, Switzerland, Villigen, p. 38.

RIVERA, A., C. ACUÑA, G. CASASSA & F. BOWN. Use of remote sensing and field data to estimate the contribution of Chilean glaciers to the sea level rise. Annals of Glaciology, 34. En prensa.

ROSENBLÜTH, B., H. FUENZALIDA & P. ACEITUNO, 1997. Recent temperature variations in Southern South America. International Journal of Climatology, 17: 67-85.

SCHWIKOWSKI, M., S. BRÜTSCH, G. CASASSA, M.A. GODOI, A. GIANNINI, A. RIVERA, E. VERA, R. ADAROS, ST. KNÜSEL & CH. KULL. 2001. Glaciological and chemical survey at glaciar Esmeralda, Chile. Labor für Radio- und Umweltchemie der Universität Bern und des Paul Scherrer Instituts, Annual Report 2000, pp. 26-27.

STEINHAGE, D, U. NIXDORF, U.MEYER & H. MILLER, 1999.N e w maps of the ice thickness and subglacial topography in Dronning Maud Land, Antarctica, determined by means of airborne radio-echo sounding. Annals of Glaciology, 29:267-272.

THOMPSON, L., J. BOLZAN, H. BRECHER, P. KRUSS, E. MOSLEY-THOMPSON & K. JEZEK, 1982. Geophysical investigations of the tropical Quelccaya Ice Cap, Perú. Journal of Glaciology, 28(98): 57-69.

THOMPSON, L., W. XIAOLING, E. MOSLEY-THOMPSON & X. ZICHU, 1988. Climatic records from the Dunde Ice Cap, China. Annals of Glaciology, 10: 178-182.

VICKERS, R. & R. BOLLEN, 1974. An experiment in the radio echo sounding of temperate glaciers. Menlo Park, California, Stanford Research Institute, Final Report, 16 pp.

WATTS, R. & A. ENGLAND, 1976. Radio-echo sounding of temperate glaciers: ice properties and sounder design criteria. Journal of Glaciology, 17(75): 39-48.

Esquema de **Investigaciones GEOGRÁFICAS**



Medición de espesor de hielo en la zona de ablación del Glaciar Juncal Norte (ver trabajo en este número). Sistema de radar montado en cañas de fibra de vidrio (foto A. Rivera, enero de 1999).

Tellus (2003), 55B, 1007–1017
Printed in UK. All rights reserved

Copyright © Blackwell Munksgaard, 2003
TELLUS

Alpine ice cores and ground penetrating radar: combined investigations for glaciological and climatic interpretations of a cold Alpine ice body

By OLAF EISEN[1]*, UWE NIXDORF[1], LOTHAR KECK[2] and DIETMAR WAGENBACH[2], [1]*Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung Bremerhaven, Bremerhaven, Germany;* [2]*Institut für Umweltphysik, Universität Heidelberg, Heidelberg, Germany*

(Manuscript received 13 November 2002; in original form 22 April 2003)

ABSTRACT

Accurate interpretation of ice cores as climate archives requires detailed knowledge of their past and present geophysical environment. Different techniques facilitate the determination and reconstruction of glaciological settings surrounding the drilling location. During the ALPCLIM[1] project, two ice cores containing long-term climate information were retrieved from Colle Gnifetti, Swiss-Italian Alps. Here, we investigate the potential of ground penetrating radar (GPR) surveys, in conjuction with ice core data, to obtain information about the internal structure of the cold Alpine ice body to improve climatic interpretations. Three drill sites are connected by GPR profiles, running parallel and perpendicular to the flow line, thus yielding a three-dimensional picture of the subsurface and enabling the tracking of internal reflection horizons between the locations. As the observed reflections are of isochronic origin, they permit the transfer of age–depth relations between the ice cores. The accuracy of the GPR results is estimated by comparison of transferred timescales with original core datings, independent information from an older ice core, and, based on glaciological surface data, findings from flow modeling. Our study demonstrates that GPR is a mandatory tool for Alpine ice core studies, as it permits mapping of major transitions in physical-chemical properties, transfer of age–depth relations between sites, correlate signals in core records for interpretation, and establish a detailed picture of the flow regime surrounding the climate archive.

1. Introduction

Ice cores from mid-latitude cold glaciers can provide unique records of environmental and climate changes which are important to supplement respective paleo-information commonly retrieved from polar drill sites (Wagenbach, 1989). However, alpine ice-core data are much more difficult to interpret in terms of their underlying atmospheric signals than their polar counterparts. One of various shortcomings is the fact that the length scales over which dynamic changes can occur are much smaller than in polar settings, such that there can be significant changes in glaciological boundary conditions (i.e. glacier thickness, surface and bedrock topography, firn/ice transition depth and net snow accumulation rate) (Vincent et al., 1997) that occur over short distances. In Alpine ice core studies, apart from very exceptional dome drill positions, upstream effects have to be considered carefully to ensure reliable extraction of the net atmospheric change from the isotopic (δ^{18}O, δD) and chemical (aerosol-related species, entrapped trace gases) ice core records (Wagenbach, 1994). Inflow of material deposited upstream of the borehole may thus systematically affect

*Corresponding author address: Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung, Postfach 120161, 27515 Bremerhaven, Germany.
e-mail: oeisen@awi-bremerhaven.de

[1]Environmental and Climate Records from High Elevation Alpine Glaciers.

the vertical temperature distribution, flow model based dating, the enclosure of trace gases, and, most important, the impurity and isotope depth profile (Preunkert et al., 2000). Evaluation of such upstream effects needs extensive work including establishment of back trajectories from ice flow modeling along with secondary ice core investigations in the relevant catchment area of the main drill position.

In this context, ground penetrating radar (GPR) provides a powerful tool to map the glacier thickness distribution needed for ice flow modeling. GPR may also be used to establish the stratigraphy of internal radar reflection horizons (Bogorodsky et al., 1985), which are expected, in favourable cases like undisturbed layering and absence of percolation, to indicate isochronic layers. Such GPR-based mapping of englacial isochrones may be used to depict the spatial accumulation and vertical strain rates distribution on a quasi-continuous scale. This feature would greatly help to verify the flow regime, encountered upstream effects and the matching of ice core chronologies obtained in the drill site area of interest. Whereas GPR sounding of glacier thickness is routinely deployed at polar and alpine sites, continuous internal radar reflector mapping has been accomplished so far mostly on polar and subpolar ice sheets by large-scale tracking of (presumably) acidic volcano horizons (e.g. Millar, 1981; Siegert, 1999; Hempel et al., 2000), but only very few studies investigated the internal structure of glaciers by combination of ice core data and radar profiles (Pälli et al., 2002).

Here we present a GPR study on a cold Alpine glacier saddle (Colle Gnifetti, Swiss-Italian Alps) aimed at assessing the potential for using englacial reflectors to track layers within the drill site area. Colle Gnifetti, which constitutes the key site for long-term ice-core records from the Alps, has been investigated through several glaciological and ice-core drilling projects (Döscher et al., 1995). Hence, basic information on glacier flow, age–depth relation, and vertical distribution of physical and chemical properties has been partially available. With respect to the latter, almost all mountain drill sites differ significantly from polar ones through the much larger depth fraction made up by porous firn, the prominent occurrence of melt layers (i.e. higher density variability), and the much higher and more variable impurity content. Thus, the study is focused on determining to what extent the interaction of GPR signals with a particular glacial feature may provide useful statigraphic information.

2. Glaciological and glacio-chemical settings

The Colle Gnifetti is a small glacier saddle within the summit range of Monte Rosa (Swiss-Italian Alps) lying at 4450–4560 m a.s.l., and is the uppermost accumulation area of Grenzgletscher. Due to its exposed position, wind erosion controls its net annual snow accumulation, which therefore reflects only about 10% the mean precipitation rate measured further downglacier (Alean et al., 1983). Almost all ice core activities took place in the southern part of the saddle, which provides a relatively low annual snow accumulation. Three ice cores were drilled to bedrock along a common surface flow line (Fig. 1).

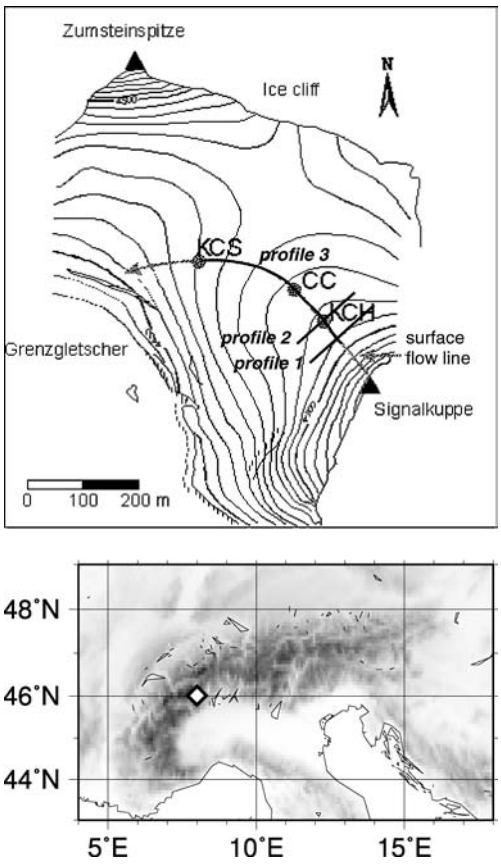


Fig. 1. Surface topography of southern Colle Gnifetti flank showing the location of deep ice core positions and GPR profiles 1–3. Contour lines refer to 10 m altitude steps. The white diamond in the lower topographic map indicates the location of the study area in the European Alps.

Table 1. *Basic glaciological parameters observed along a flow line at Colle Gnifetti*

Characteristic	Description & reference
Snow zone characterisation	Cold infiltration–recrystallisation zone, associated with occasional melt-layer formation at a downslope decreasing rate (after Shumskii, 1964)
Englacial temperature	18 m firn temperature −14.3 °C (Suter, 20002) basal temperature −12.3 °C (Haeberli and Funk, 1991)
Glacier thickness	Systematically decreasing from about 140 m in the lower area to ∼50 m in the upper area (this study, Haeberli and Funk, 1991; Lüthi, 2000)
Annual snow accumulation	Systematically decreasing from around 60 cm water equivalent (WE) at KCS borehole to 20 cm WE at the upper KCH positions (Keck, 2001)
Horizontal surface velocity	Systematically decreasing from 2 m a^{-1} in the lower area to less than 1 m a^{-1} in the upper area (Lüthi, 2000)
Firn–ice transition depth	Around 45 and 36 m at the KCS and KCH borehole positions, respectively (Keck, 2001)

In this area, detailed surface velocity and accumulation rate data were obtained from multi-year geodetic observations of a stake array and additional shallow ice core drillings (Keck, 2001; Lüthi, 2000). As shown in Fig. 1, the present GPR study was mainly dedicated to the area associated with the three deep drillings. The typical glaciological parameters encountered in the GPR mapped area are summarised in Table 1.

Ice core chronologies deployed in this study were established by annual layer counting from major ions stratigraphy, which was backed up by absolute time horizons from extreme Saharan dust deposits [1977, 1936, 1902 (Armbruster, 2000)] and thermo-nuclear bomb tests (1963). As is the case for all alpine drill sites exposed to strong wind scouring and thus low and irregular snow deposition, dating by annual layer counting and preservation of stratigraphical horizons remains ambiguous at Colle Gnifetti. Furthermore, dating uncertainty increases dramatically with depth due to annual layer thinning and the associated non-linear age–depth relationship.

The chemical composition of Colle Gnifetti ice cores may be characterised as follows:

There are highly variable mineral dust levels with a background around 0.55 mg kg^{-1}, strongly enhanced on a multi-annual timescale by Saharan dust layers to some 10 mg kg^{-1} (Wagenbach et al., 1996). Significant inputs of acidity aerosol components (sulfate, nitrate) mainly occurred since 1950, corresponding to about 20–40 m depth in the study area. During that period, mostly annual peaks are seen, which exceed the background values of around 140 and 180 μg kg^{-1} for sulfate and nitrate, respectively, by up to a factor of 20 (Maupetit et al., 1995).

Strong acidic horizons are known to produce GPR reflections (Bogorodsky et al., 1985). Colle Gnifetti displays high-frequency acidic spikes roughly on an annual timescale during the industrial era (Preunkert et al., 2001). This pattern is, however, strongly disturbed by the distinct but irregular inputs of alkaline dust and the preferential erosion of relatively clean snow of the winter half year. Thus, the chemical stratigraphy of potential acidic layers in the industrial era displays a rather erratic structure with distinct peaks emerging in sub-seasonal to multi-annual sequences.

From the continuous chemical depth profiles available from all three ice cores, we used the following parameters to contrast the chemical stratigraphy with the GPR based reflector pattern: Ca^{2+} as proxy for the total mineral dust content, as it controls the insoluble particulate matter and melt water alkalinity of the ice matrix; the positive values of the ion balance reduced to $(SO_4^{2-} + NO_3^- - Ca^{2+} - NH_4^+)$ to illustrate the variability of apparent meltwater acidity. Note that negative numbers of this parameter are redundant since they virtually reproduce the pattern of the calcium concentration.

3. GPR methodology

Ice-core records and GPR data provide mutual information on glacial subsurface structure and composition. Whereas ice cores yield vertical profiles of physical features (density, crystal fabric properties, etc.) and chemical impurities in a one-dimensional resolution on a centi- to decimetre depth scale, analyses of GPR data result in two-dimensional pictures of the

subsurface structure of the ice body. Although horizontal and vertical changes on the order of metres can be extracted from GPR data, it is, in general, not possible to identify unambiguously the causes of the obtained structures by this method. The combination of ice-core records and GPR data may thus help to extrapolate ice-core information along GPR profiles, resulting in a two-dimensional picture of the physical and chemical properties of the subsurfaces. This is limited, however, by the lateral coherency of the observed signal and the depth resolution of the GPR data.

To link ice cores, it is necessary to track continuous internal layers. In general, an electromagnetic (EM) pulse is transmitted at the surface and the propagating wave is partially reflected at discontinuities of the medium's dielectric properties (i.e. permittivity and conductivity) (Robin et al., 1969), and the reflected signals are recorded at the surface as a function of two-way travel time (TWT). The resulting image of the subsurface is referred to as the time domain radargram.

In a cold alpine ice body, discontinuities in the dielectric properties are expected to be mainly related to the occurence of ice layers in the firn and to significant impurity horizons (e.g. acidic spikes). The processes forming EM reflectors take place at the glacier's surface at approximately the same time, implying that the internal reflectors are isochrones, with the submergence rate being determined by the interaction of the surface accumulation and the flow field.

3.1. Survey setups and data acquisition

Two types of measurement are common in GPR data acquisition: common-offset (CO) and common-midpoint (CMP) surveys. For CO surveys, the transmitter (TX) and receiver (RX) are kept at a fixed distance and moved across the surface. For the CMP recording technique, the distance between TX and RX is symmetrically increased relative to the stationary centre point, basically yielding information about the wave speed–depth profile. This method is a standard tool in seismic data acquisition (Garotta and Michon, 1967; Yilmaz, 1987), and has also been applied successfully in modified versions to glaciological GPR surveys (Gudmandsen, 1971; Hempel et al., 2000; Murray et al., 2000).

Radar measurements were performed with a RAMAC GPR (Malå Geoscience, Sweden), a monopulse bistatic radar system that can be operated with antennae of different frequencies. CO measurements were carried out with shielded 250 MHz antennae, which are permanently mounted in a sled box at a fixed distance of 36 cm. The common-midpoint survey was carried out with a pair of unshielded antennae operating at a centre frequency of 100 MHz. For either system setup the TX and RX are connected with the central processing unit via fibre optic cables, thus avoiding noise from ohmic conductors. The processing unit was operated by a Husky FC PX5 personal computer, using RAMAC software.

Three CO profiles were measured along the three profile lines 1–3 (Fig. 1), which were already marked with geodetic stakes. The transmitter was triggered by a distance wheel, mounted at the rear of the sled box, and set to a trigger interval of 0.5 m. Trace length was 1.5 μs with 2048 samples per trace. To increase the signal-to-noise ratio, 32-fold vertical stacking was applied for each stored trace.

For the CMP survey, the KCH borehole was chosen as the centre point, and TX–RX offset was increased along profile 2, perpendicular to the flow line. Traces were recorded in a 1.5 μs time window with 2048 samples and 256-fold vertical stacking, manually triggered in 1 m increments in the interval 1 to 100 m.

3.2. Post-recording processing

Processing was performed using Paradigm Geophysical FOCUS version 4.2 software. Standard post-recording processing for CMP and CO data includes filtering and gain correction. CMP data are then analysed in the time domain, resulting in a TWT–depth model. The major processing steps for CO surveys are migration and TWT–depth conversion, each requiring a profile of propagation wave speed.

In the present study it was not feasable to apply post-recording horizontal stacking of neighbouring traces, usually used to decrease noise, because of the steep internal and bottom features. Although stacking was successful in the upper few metres, the coherency of internal reflectors at greater depth decreased, thus making it more difficult to track continuous internal reflections. For further processing, the data were, therefore, only bandpass filtered, and the recording position (accurate to $\sim$1%) assigned to each trace. Based on the comparison of TWT–depth profiles derived from the CMP survey and ice-core data, discussed below, migration of the CO profiles and conversion to depth domain was carried out using the interpolated TWT–depth model determined from the ice core density profiles at KCS and KCH. The same CO processing sequence was applied to all three CO profiles, resulting in a picture of the subsurface and bedrock structure (Fig. 2).

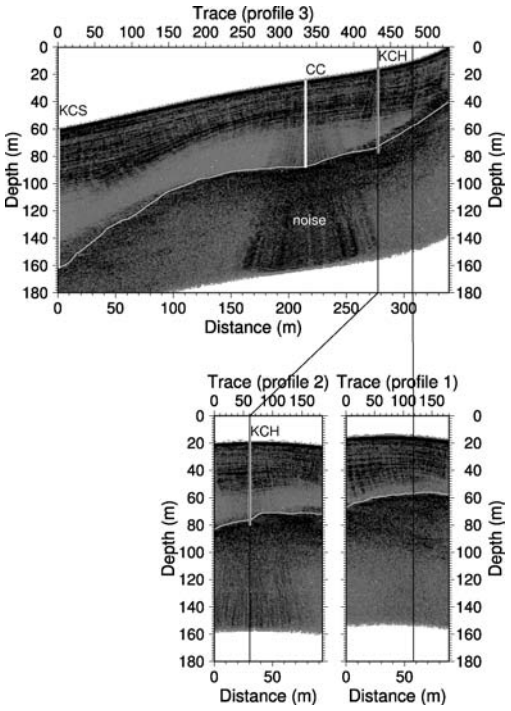


Fig. 2. Processed radar profiles indicating surface and bedrock topography (light grey) in metres below 4500 m a.s.l. along profiles 1–3. Greyscale indicates trace envelope. Location and extent of the KCS, CC and KCH boreholes are indicated as white vertical bars, crossover points of profiles as thin black lines. Bedrock depths were determined by strongly enlarging the processed data and applying a colour amplitude scaling. The noise centred at a distance of 220 m (approximately near CC) below 100 m depth probably results from scattered metal remains buried underneath the surface.

4. GPR and Ice Cores

An essential aim of our study is to investigate the possibility to transfer age–depth relations from one ice core to another using GPR data by analysing the structure of internal reflections. Before linking radargrams to ice-core records, we perform two comparisons to estimate errors of either data set and to limit the effect of ambiguities arising in the travel time versus depth profiles and ice thickness results.

4.1. Travel time – depth profiles

Apart from CMP surveys, EM propagation wave speeds can also be derived from ice-core records, e.g. dielectric profiling (DEP) (Moore and Paren, 1987; Wilhelms, 2000) or density (Looyenga, 1965; Robin et al., 1969). Using the KCS and KCH density profiles, we apply the Looyenga (1965) mixture model for calculating two interval wave speed–depth profiles. The CMP wave-speed model at KCH is based on the analysis of five internal and one bottom reflectors.

The interval wave speeds are systematically higher for the CMP than for the density-derived profile (Fig. 3b). This leads to ∼10% larger depth of the CMP model for the same TWT compared to the density based model (Fig. 3c). Reasons for the systematic differences of both data sets are investigated in the discussion. As wave speed profiles derived from different physical properties of ice cores (e.g. γ-ray absorption or permittivity) are more consistent than those based on CMP surveys (Eisen et al., 2002), we use the TWT–depth relations from KCS and KCH for migration and conversion of the radargrams to the depth domain.

4.2. Bedrock topography

In theory, the depth of a perfect plane reflector should be identifiable within a quarter of the wavelengths, i.e. 0.2 and 0.4 m for the 250 and 100 MHz antennae, respectively. However, the rough nature of the bed, a non-planar curvature, and uncertainties in the wave speed–depth distribution decrease the accuracy with which the bed topography can be determined. The bedrock topography can be extracted from high-resolution CO profiles (Fig. 2), and for KCH also from the CMP data (Fig. 3). Especially in those parts of the CO profiles with steep bedrock topography the bed reflection is blear, and can only be determined with an accuracy of approximately ±5 m. In the other parts it is clearly identifiable to within 2 m. Ice thickness derived from CO data is 102 ± 5 m at KCS, and 58 ± 5 m at KCH (Table 2). The depths at the crossing points of surveys are within 4 m of each other. The ice thickness derived from the CMP measurements at KCH is 60 ± 2 m.

Additional information on ice thickness is available from earlier GPR surveys (Wagner, 1996; Lüthi, 2000) and borehole depths. Drilling was stopped when the amount of debris in the retrieved ice core increased, indicating that the basal layer was reached. Logged depths at KCS and KCH in 1995 are 101 and 61 m, respectively (Lüthi, 2000). Based on these data and flow modeling for conversion of the 1995 data to the 2000 surface, the KCS and KCH borehole bottoms should be located at depths of 101.3 and 61.7 m, respectively (Table 2).

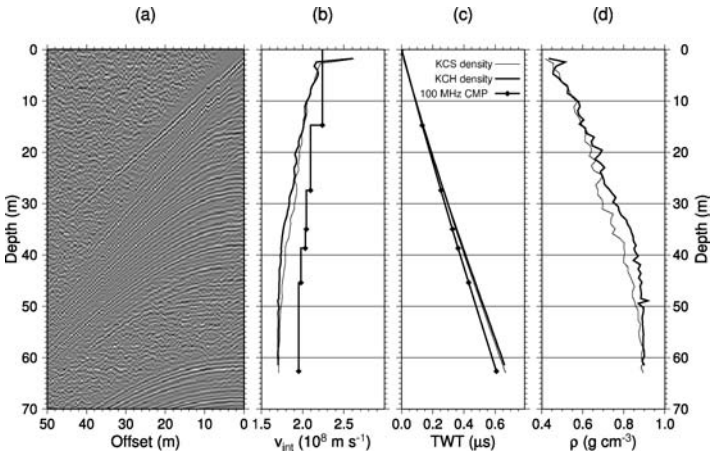


Fig. 3. Comparison of TWT–depth profiles at KCH drill site position, derived from ice-core density and common-midpoint (CMP) measurements. For the sake of completeness, the profiles derived from KCS ice-core density are displayed as well. (a) 100 MHz CMP radargram; (b) depth profile of interval wave speed v_{int}; (c) depth profile of two-way traveltime (TWT); (d) depth profile of smoothed density ρ.

Table 2. *Comparison of ice-core and GPR-based data on ice thicknesses at Colle Gnifetti*

Data set	KCS	KCH	$X_{1,3}$	Remarks
Borehole data and flow modeling				
Core length	99.9	60.3	–	Core top ∼0.6 m below surface
Logged depth	101	61	–	After drilling (Lüthi, 2000, p. 40)
Bottom depth	101.3	61.7	–	Flow modeling (Keck, 2001)
GPR ice thickness				
CMP	–	60 (2)		
Profile 1	–	–	42 (2)	
Profile 2	–	58 (2)		
Profile 3	102 (5)	58 (5)	46 (5)	

Core and GPR depths are given in metres with respect to the 2000 surface. Accuracies of GPR ice thickness values are given in parantheses. $X_{1,3}$ denotes the crossover point of profiles 1 and 3.

4.3. Internal structure and ice-core profiles

A straightforward apportionment of individual internal reflectors to outstanding physical or chemical events seen in the ice cores is not feasible. This may have been expected in view of the uncertainty in the individual absolute depth scales but also in view of the relatively high frequency with which the potentially radar active features like acid spikes, melt layers etc. occur in alpine ice cores. Nevertheless, the matching of ice-core records via GPR profiles can be achieved.

The drilling locations KCH and KCS are connected via GPR profile 3 (Fig. 4). To determine the accuracy of a timescale transfer from one core to another, we (i) associate absolute time horizons at KCS to strong corresponding phases of an internal reflector at the same depths; (ii) track and mark continuous coherent phases from KCS to KCH in a large-scale, high-resolution plot of the radargram; and (iii) compare the transferred age–depth relation to the chronology of KCH.

The transmitted radar pulse consists of approximately five half-cycles, with the main energy being located in the first three. During propagation, the pulse is subject to phase shifts, distortions and multiple reflections. Therefore, in the recorded radargram, an internal reflector does not consist of a single maximum peak, but of several phases. In the migrated depth domain radargram, each phase is then on the order of $\lambda/2$

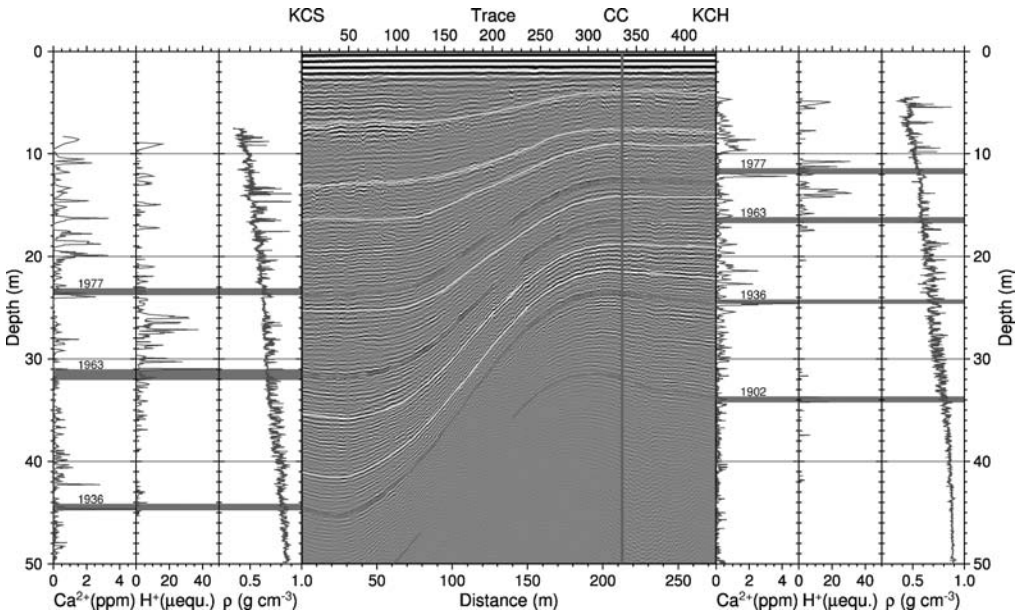


Fig. 4. Comparison of ice core profiles from KCS (left), KCH (right), with internal GPR reflectors along connecting profile 3 (middle). Recorded are calcium, serving as proxy for the total mineral dust content, ice acidity, and high-resolution densities (determined from γ-ray absorption), indicating the melt layer stratigraphy. Horizontal grey lines overlying the ice core records mark the depth of the 1902, 1936, 1963 and 1977 dating horizons. Thick white lines in the radargram indicate the depth of the dating horizons determined from tracking coherent phases starting from KCS; thin white lines mark strong continuous reflectors (see text for details). The white line to the 1902 horizon is interrupted because of the reflector discontinuity.

(0.4 m in ice), and a sharp reflector is distributed over a depth range of approximately 2 λ (1.6 m in ice).

The radargram between KCS and KCH (Fig. 4) shows a smooth sigmoidal decrease left to right in the apparent accumulation rate, which is related to the bedrock topography (Fig. 2) via the ice flow field (Keck, 2001). About 100 m upslope of KCS, in the steepest part of the internal slope, the reflectors become discontinuous below a depth of 35 m.

Starting the tracking of internal horizons at KCS yields a higher accuracy, as the annual layer thickness, and therefore temporal resolution, is almost twice as large as at KCH. Tracking the reflectors corresponding to the 1936, 1963 and 1977 data from KCS to KCH results in depths that are about 0.8–1.0 m lower than the respective data in the KCH ice core profiles (Table 3). The last continuous reflector corresponds to about 1930. Older dating horizons, in particular the 1902 event, cannot be used for tracking without significantly decreasing the accuracy because of discontinuities of the GPR horizons.

In addition to the calibrating horizons, we also tracked several other strong continuous internal reflections from KCS to KCH. Although some horizons seem to be linked to similar characteristic peak patterns in the ice core records, it is not possible to clearly identify the causes of prominent reflections from comparison with ice core records alone (see discussion).

Table 3. *Comparison of age–depth relation at borehole locations from ice core and GPR data*

		KCS		KCH	
Time	Event	Core	GPR	Core	GPR
1977	Dust	23.2–23.7	23.7	11.5–11.9	12.9
1963	Tritium	31.1–31.9	31.1	16.3–16.6	17.4
1936	Dust	44.2–44.6	44.5	24.3–24.5	25.3
1902	Dust	55.5–55.8	–	33.8–34.1	–

Ice core data are taken from Armbruster (2000) and converted to depth below the 2000 surface using accumulation measurements and flow modeling (Keck, 2001). The depth of individual GPR reflector phases at KCH was determined as described in the text (cf. Fig. 4).

4.4. Application of the age–depth relationship

The age–depth relation derived above uses information from KCS and KCH. Additional estimates for the accuracy of the lateral transfer of the age–depth information can be performed with independent information available from the CC ice core, e.g. by comparing modeled burial depth since core retrieval with depths derived from fastening the dated CC records to the KCS/KCH age–depth profiles.

The 1977 reference horizon is located 1.6–2.1 m below the top edge of the CC core and the 1902 signal at 26.3–26.5 m. According to accumulation measurements and flow modeling results, the 1977 signal submerged to a depth range of 11.0–11.2 m below the 2000 surface, while the 1902 reference horizon is at 30.5–30.6 m. Using the KCS/KCH/GPR age–depth relation, the lower limit of 1977 is 12.8 m (Fig. 4), and, accounting for the systematic error of 1 m, the upper limit is 11.8 m. As the 1902 layer is discontinous for some 50 m, we cannot use it for tracking from KCS. From KCH the inferred depth of the 1902 layer at CC in 2000 is 31.8 m. The resulting error interval (5–15%) is mainly due to the uncertainties of the age–depth relationship ($\sim$1 m) and the uncertainty in the absolute depth scale arising from the non-consolidated upper core sections, which are required for connection of the top of the core to the actual surface at time of drilling via snow-pit sampling.

5. Discussion

EM propagation wave speeds are one of the key properties to derive a true picture of the subsurface structure from GPR surveys. Comparison of wave speed–depth profiles derived from CMP survey data and ice-core properties from polar regions show that the agreement in a flat area can be within a couple of percent (Eisen et al., 2002). The larger discrepancies in our case, which are on the order of 10%, are probably related to dipping of internal reflectors with respect to the surface, and to curved ray paths, which are neglected in the small spread approximation used here (Yilmaz, 1987).

Likewise, the inclination between surface and bedrock is probably the reason why the ice thicknesses determined at KCH is systematically smaller than borehole depth and core length. The two-dimensional (2D) migration performed during post-processing only corrects the dipping component which is parallel to the profile. As the subsurface and bedrock gradients are non-parallel to the profile lines in our case (Fig. 2) (i.e. out-of-plane) the bedrock dipping of around 7° at KCH for profiles 2 and 3 relative to the surface implies that the depth is some 1.5% larger. To further improve the accuracy of the subsurface image, 3D survey setup and migration processing would be necessary. This requires, however, an extensive logistical and temporal effort during data acquisition (Moran et al., 2000).

Another issue to be considered when comparing GPR ice thicknesses is the nature of the bottom reflector. If crystalline rock is in direct contact with the glacier bottom, a sharp reflection could be expected. However, if a sedimentary layer is present, the reflected echo is more diffuse, thus increasing the error for ice thickness values. In our case, the bottom few metres of the ice cores all show entrainment of debris, although only at cores CC and KCS was the silty layer forming the ice-bedrock interface partly penetrated, although touch-down to bedrock is not definitely confirmed. We may now argue that the ice thickness from KCH borehole logging is underestimated by at least several decimetres relative to CC and KCS cores, since the CC-silty core fraction amounts to approximately 50 cm, thus indeed adding to the uncertainty in the GPR ice thickness in comparison to borehole depths.

The internal structures of our radargrams are partially linked to ice thickness. This is expected, as the accumulation and flow field determine the submergence velocity, and thus the position of isochronic reflectors. Deep internal reflections towards KCS disappear, as the main flow channel of Colle Gnifetti is entered [for a radar cross-section of Colle Gnifetti see Lüthi (2000), Fig. A.4]. The matching of the age–depth profiles in the upper tens of metres between KCS and KCH by tracking internal reflections is encouraging. Errors are of the order of a wavelength, corresponding to a few years in the depth range under consideration. Different sources of errors were investigated for a comparable study in Svalbard by Pälli et al. (2002). Although the geophysical settings are somewhat different, their findings provide a good estimate of the general accuracy for combining ice-core profiles with radar data. As the uncertainties derived in this study are well within their error bars, we consider our results to be valid and representative for our study area.

Several features make it more diffcult to extend the transfer to larger depths: (i) the signal-to-noise ratio decreases in the vicinity of boreholes, probably because of the disturbed firn and ice structure, making

it more difficult to separate internal reflections from noise; and (ii) the internal reflectors become more discontinuous with depth, especially where there is a larger inclination between reflector and surface. For instance, below approximately 25 m at KCS and 45 m at KCH, no continuous internal reflections are detected. Either too much energy is absorbed during propagation below this level to detect a distinct return signal at the surface, or the ice properties change because of ice dynamics or post-depositional processes. The latter case is unlikely in the sense that flow features become irregular and disturb layering, as this would contradict age–depth relations established by Armbruster (2000) and Keck (2001) down to 40 and 70 m depth, respectively. However, physical and chemical properties show important transitions around these depths. Here, density reaches the value of glacier ice and melt layers are not outstanding anymore. Disregarding episodic mineral dust layers, the ice matrix chemistry changes from acidic to slightly alkaline properties due to much smaller emissions prior to 1950 (Fig. 5). Thus distinct acidic peaks can hardly be found below the critical depths. In general, decreasing variation in density would allow chemical horizons to become the primary reflection mechanism, but as both observed chemical and physical features reduce the overall reflection coefficient of distinct layers, the amount of energy reflected to the surface decreases as well.

To clearly identify the reason for missing reflectors in the lower part of the ice and to increase the accuracy of the age–depth transfer, the origin and structure of dominant reflectors have to be determined. Separating the effects of changes in density and chemical composition, as well as determining the influence of variations of layer thickness on the recorded signal, can best be achieved by forward modeling of radargrams, based on DEP data (Eisen et al., 2003). Unfortunately, no DEP measurements were carried out after retrieving the ice cores.

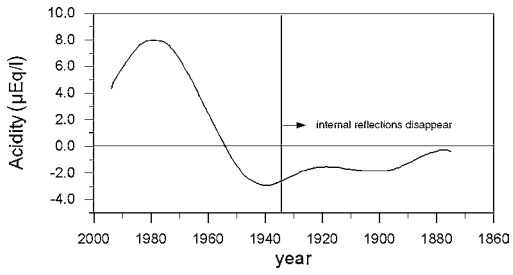


Fig. 5. General acidity trend analysed in the CC Colle Gnifetti ice core by direct measurements and ion balance evaluations. Outliers related to extreme saharan dust deposits were removed prior to SSA smothing. The vertical line at 1935 marks the approximate transition from continuous to discontinuous and finally disappearing internal GPR reflections, around 100 m from KCS (Fig. 4).

In addition, forward modeling could be used to investigate the reasons for the vanishing of weaker phases when tracking horizons from KCS to KCH, resulting in an improved understanding of the compisition of the reflection signals. So far one can argue that as layer thickness decreases by roughly 50% towards KCH, it can be expected that the characteristics of internal reflectors change as well. This would have the important consequence that individual phases do not indicate isochronous surfaces. A bulk of phases, however, forming a distinguishable internal reflector, could be considered to correspond to a layer of distinct physical properties, extending over a small depth range, and thus being approximately isochronuous.

6. Conclusions

Internal reflections measured with GPR can be used to match and transfer age–depth relations of ice cores in cold alpine ice bodies over distances of at least several hundred metres. Successful application of GPR data requires, however, a smooth flow regime, the presence of strong continuous internal reflectors and a GPR system capable of recording weak reflections at high depth resolution. The GPR device should combine a powerful transmitter pulse with sub-metre resolution and large transmitter/receiver antenna gain. Given that GPR uncertainty is sufficently small, ice core interpretations profit from GPR surveys in several ways: (i) the age–depth relationships can be transferred from one site to another; (ii) interpretation of ambiguous peaks in core records can be complemented by matching clear signals from other cores via internal horizons; (iii) major transitions in physical-chemical properties can be remotely detected and continuously tracked to other parts of the region of interest; and (iv) the combination of surface measurements of ice velocity, modeling and reflection horizons at various depths provide a detailed picture of the 3D flow regime. Analyses of GPR surveys thus may help to assess upstream flow effects associated with strong longitudinal changes in the submergence velocity.

Despite the success of our study in the upper 30–50 m of the ice column at Colle Gnifetti, it fails to

supplement the ice core age–depth relations and map the isochrone pattern at larger depth. Future radar activities at this site should therefore focus on the basal regime, being supported by high-resolution DEP if new ice cores are being retrieved. Power limitations can partly be overcome by decreasing the antennae frequency to 100 MHz using the same GPR system, assuring lower absorption, sufficient resolution with a wavelength of 1.7 m, and still managable operation. Remaining limitations are set by the absorption properties of ice and the working conditions at this high-altitude site.

Although the main reason for the limited sensitivity of the GPR data as well as the major ice properties leading to the observed GPR reflectors could not be unambiguously identified, we have demonstrated the value of including GPR in alpine glacier coring investigations. The glaciological characteristics of other cold alpine drill sites, e.g. in the Andes, Himalayas or north-west Canada, are not substantially different from Colle Gnifetti regarding geometry, firn fraction, melt layer occurence or mass balance. In this respect, they are expected to provide quite similar results in such GPR studies. On the other hand, (sub)tropical sites, which may experience much higher mineral dust but lower (anthropogenic) acid inputs may respond to potential acidic reflectors different to what is seen at Colle Gnifetti.

7. Acknowledgments

We are grateful for the invaluable logistic suport by Air Zermatt and the staff of Cabanna Regina Margherita from the Club Alpino Italiano di Varallo. Field work profited from advice and assisstance by Stephan Sutter; support from Guðfinna Tolly Aðalgeirsdottir greatly sped up field measurements. The comments and effort by Jack Kohler and two other anonymous reviewers helped to clarify the manuscript and are greatly acknowledged. The research was partially supported by the European Union Environment and Climate Programme under contract ENV4-CT97-0639 (ALPCLIM) and the grant NI493/1 of the German Science Foundation.

REFERENCES

Alean, J., Haeberli, W. and Schädler, B. 1983. Snow accumulation, firn temperature and solar radiation in the area of the Colle Gnifetti core drilling site (Monte Rosa, Swiss Alps): distribution patterns and interrelationships. *Z. Gletscherkd. Glazialgeol.* **19**, 131–147.

Armbruster, M. 2000. Stratigraphical dating of high-alpine ice cores over the last 1000 years (in German). Ph.D. Thesis, Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg, Germany, http://archiv.ub.uni-heidelberg.de.

Bogorodsky, V., Bentley, C. and Gudmandsen, P. 1985. *Radioglaciology*, D. Reidel, Dordrecht.

Döscher, A., Gäggeler, H., Schotterer, U. and Schwikowski, M. 1995. A 130 years deposition record of sulfate and cloride from a high-alpine glacier. *Water, Air, Soil Pollut.* **85**, 603–609.

Eisen, O., Nixdorf, U., Wilhelms, F. and Miller, H. 2002. Electromagnetic wave speed in polar ice: Validation of the CMP technique with high resolution DEP and γ-density measurements. *Ann. Glaciol.* **34**, 150–156.

Eisen, O., Wilhelms, F., Nixdorf, U. and Miller, H. 2003. Identifying isochrones in GPR profiles from DEP-based forward modelling. *Ann. Glaciol.* **37** (in press).

Garotta, R. and Michon, D. 1967. Continuous analysis of the velocity function and the move out corrections. *Geophys. Prospecting* **15**, 584–597.

Gudmandsen, P. 1971. Electromagnetic probing of ice. In: *Electromagnetic probing in geophysics* (ed. J. Wait), Golem Press, New York, 321–348.

Haeberli, W. and Funk, M. 1991. Borehole temperatures at the Colle Gnifetti core-drilling site (Monte Rosa, Swiss Alps). *J. Glaciol.* **37**, 37–46.

Hempel, L., Thyssen, F., Gundestrup, N., Clausen, H. B. and Miller, H. 2000. A comparison of radio-echo sounding data and electrical conductivity of the GRIP ice core. *J. Glaciol.* **46**, 369–374.

Keck, L. 2001. Climate significance of stable isotope records from Alpine ice cores. Ph.D. Thesis, Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg, Germany, http://archiv.ub.uni-heidelberg.de.

Looyenga, H. 1965. Dielectric constant of heterogeneous mixtures. *Physica* **31**, 401–406.

Lüthi, M. P. 2000. *Rheology of cold firn and dynamics of a polythermal ice stream. Mitteilungen,* Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH Zürich, vol. 165.

Maupetit, F., Wagenbach, D., Weddeling, P. and Delmas, R. 1995. Recent chemical and isotopic properties of high altitude cold Alpine glaciers. *Atmos. Environ.* **29**, 1–9.

Millar, D. H. H. 1981. Radio echo layering in polar ice sheets and past volcanic activity. *Nature* **292**, 441–443.

Moore, J. and Paren, J. 1987. New technique for dielectric logging of Antarctic ice cores. *J. Phys. (Colloq. C1)* **48**, 155–160.

Moran, M. L., Greenfield, R. J., Arcone, S. A. and Delaney, A. J. 2000. Delineation of a complexly dipping temperate glacier bed using short-pulse radar arrays. *J. Glaciol.* **46**, 274–286.

Murray, T., Stuart, G. W., Miller, P. J., Woodward, J., Smith, A. M., Porter, P. R. and Jiskoot, H. 2000. Glacier surge propagation by thermal evolution at the bed. *J. Geophys. Res.* **105**, 13 491–13 507.

Pälli, A., Kohler, J. C., Isaksson, E., Moore, J. C., Pinglot, J. F., Pohjola, V. A. and Samuelsson, H. 2002. Spatial and temporal variability of snow accumulation using ground-penetrating radar and ice cores on a svalbard glacier. *J. Glaciol.* **48**, 417–424.

Preunkert, S., Wagenbach, D., Legrand, M. and Vincent, C. 2000. Col du Dôme (Mt. Blanc Massif, French Alps) suitability for ice cores studies in relation with past atmospheric over Europe. *Tellus* **52B**, 993–1012.

Preunkert, S., Legrand, M. and Wagenbach, D. 2001. Sulfate trends in a Col du Dôme (French Alps) ice core: a record of anthropogenic sulfate levels in the European mid-troposphere over the 20th century. *J. Geophys. Res.* **106**, 31 991–32 004.

Robin, G. de Q., Evans, S. and Bailey, J. T. 1969. Interpretation of radio echo sounding in polar ice sheets. In: *Philos. Trans. R. Soc. London Ser. A* **146**, 437–505.

Shumskii, P. A. 1964. *Principles of structural glaciology: the petrography of fresh-water ice as a method of glaciological investigation*. Dover, New York.

Siegert, M. 1999. On the origin, nature and uses of Antarctic ice-sheet radio-echo layering. *Prog. Phys. Geog.* **23**, 159–179.

Suter, S. 2002. *Cold firn and ice in the Monte Rosa and Mont Blanc areas: spatial occurrence, surface energy balance and climatic evidence. Mitteilungen*, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH Zürich, vol. 172.

Vincent, C., Vallon, M., Pinglot, F., Funk, M. and Reynaud, L. 1997. Snow accumulation and ice flow at Dôme du Goûter (4300 m), Mont Blanc, French Alps. *J. Glaciol.* **43**, 513–521.

Wagenbach, D. 1989. Environmental records in alpine glaciers. In: *The environmental record in glaciers and ice sheets*, Dahlem Konferenzen, John Wiley and Sons, Chichester, 69–83.

Wagenbach, D. 1994. Special problems of mid latitude glacier ice core research, In: *Greenhouse gases, isotopes and trace elements in glaciers as climatic evidence for the Holocene*, Report of the ESF/EPC Workshop, Zürich, 27–28 October 1992, Arbeitsheft No 14, VAW-ETH Zürich, Switzerland, 10–14.

Wagenbach, D., Preunkert, S., Schäfer, J. and Jung, W. 1996. Northward transport of Saharan dust recorded in a deep Alpine ice core. In: *The impact of African dust across the Mediterranean*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 291–300.

Wagner, S. 1996. *Three-dimensional modeling of two glaciers and deformation analysis of ice-rich permafrost* (in German). *Mitteilungen*, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH Zürich, vol. 146.

Wilhelms, F. 2000. *Measurement of dielectric properties of polar ice cores* (in German). *Berichte zur Polarforschung*, Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung, vol. 367.

Yilmaz, O. 1987. *Seismic data processing*. *Investigative Geophysics*, Society of Exploration Geophysicist, vol. 2.

RECONSTRUCTION OF SUBLIMATION AND PRECIPITATION FROM THE CERRO TAPADO ICE CORE (NORTH CHILEAN ANDES, 30°S)

P. Ginot (Univ. Bern & PSI), C. Kull (Univ. Bern & PAGES), U. Schotterer (Univ. Bern), M. Schwikowski (PSI), H.W. Gäggeler (Univ. Bern & PSI)

Annual sublimation and total accumulation could be reconstructed from the Cerro Tapado ice core, using a new approach: The enrichment of the chemical tracer chloride due to sublimation. A pronounced increase of sublimation was observed for the deepest part of the record. The corresponding climate conditions, obtained from a glacier mass balance model, suggest a time discontinuity in the record.

In February 1998, a 36 m deep ice core was extracted from Cerro Tapado summit glacier (5536 m, 30°08'S, 69°55'W, Chile) [1] and analysed with high resolution (1.9 cm) for concentrations of major ions and stable isotopes [2]. Dating of the ice core was performed by annual layer counting, supported by the tritium 1964 horizon and ^{210}Pb nuclear dating. During the drilling campaign, sublimation rates of ~1.9 mm water equivalent per day (weq day^{-1}) were measured on this glacier [2]. Parallel surface snow experiments showed that the concentrations of some chemical species (Cl^-, NO_3^-, SO_4^{2-}, K^+) were enriched in the surface snow layer due to the effect of sublimation during the drier season [3].

This enrichment effect was utilized for reconstructing annual sublimation rates over the complete record. For this purpose, the median concentration of chloride (61 µg l^{-1}) was considered to represent the concentration in freshly fallen snow. For all well-marked sublimation layers, sublimation was quantified from the enrichment in chloride relative to the concentration in fresh snow. From the resulting sublimation rates and the net-accumulation, the total-accumulation could be deduced (Fig. 1). Surface melting did not contribute to the ablation, since eventually formed melt water immediately refroze a few cm below the surface. For the period 1920-1998 (0-23 m weq) a good agreement between the trends of the reconstructed total-accumulation and of precipitation in La Serena was found.

The annual total-accumulation exhibits a pronounced increase between 23.5 m weq depth and bedrock, which is due to an increase in sublimation. A glacier mass balance model calibrated for Cerro Tapado glacier over the hydrological year Feb. 1998-Feb. 1999 was used to estimate temperature and precipitation history on the basis of the reconstructed ablation and accumulation parameters. For the period 1920-1998 the model gives a mean annual sublimation and precipitation of 240±40 mm and 540±45 mm, respectively, and a temperature of –12.4±0.2 °C. For the part between 23.5 m weq depth and bedrock, a regional cooling of –3°C and a precipitation increase of +290mm y^{-1} (+470 mm y^{-1} in winter and –180 mm y^{-1} in summer) resulted.

Such climatic conditions are significantly different from those recorded for the last century. Therefore, we assume that Cerro Tapado glacier is composed of a relict ice layer frozen to bedrock, which is covered by an active glacier part flowing above, dated to 1999-1920 (Fig. 2).

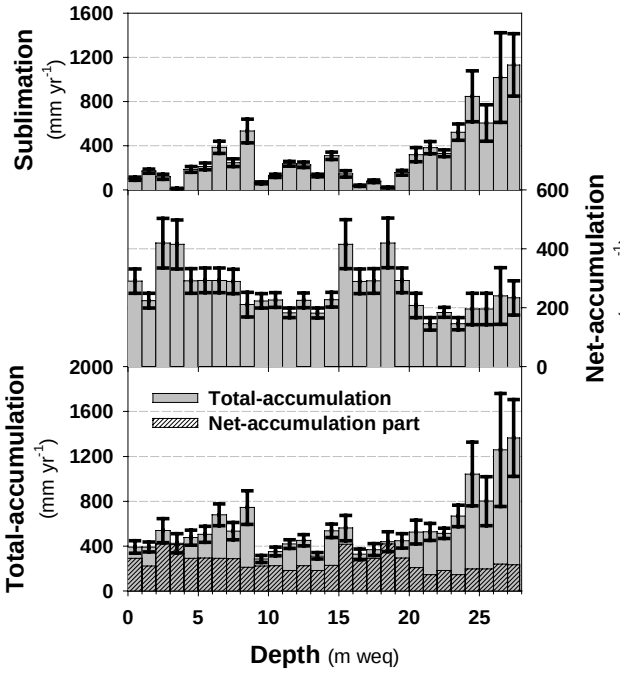


Fig. 1: Mass balance terms reconstructed from the Cerro Tapado ice core.

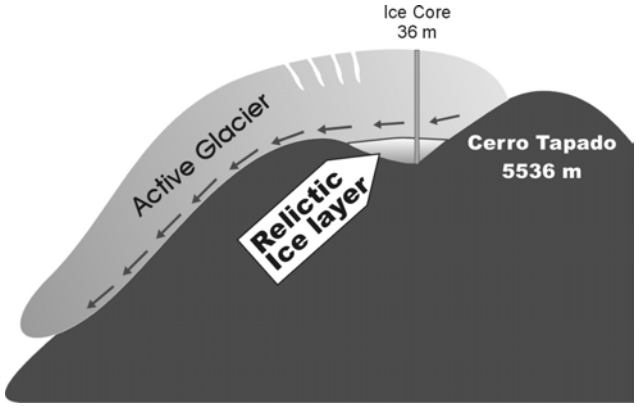


Fig. 2: Schematic of Cerro Tapado glacier, showing the relict ice body separated from the active part.

REFERENCES:

[1] P. Ginot et al., Ann. Rep. Univ. Bern & PSI 1999, p. 37.

[2] P. Ginot, Ph.D. Thesis, Univ. Bern (2001).

[3] P.Ginot et al., J. Geophys. Res. **106**, 32,375 (2001).

ABSTRACT 31

The interannual variability of the Echaurren glacier mass balance: Chilean Andes

José Vergara[1] and Fernando Escobar[2]

[1.] *Departamento de Geofísica, Universidad de Chile, Santiago, Chile*
[2.] *Dirección General de Aguas, Ministerio de Obras Públicas, Santiago, Chile*

Echaurren Norte glacier is a small glacier of 0.4 km^2 located 50 km east of Santiago-Chile, within the Maipo river basin. Its length is 1.2 km and the mean width is 0.4 km, extending from 3,650 to 3,880 m asl. Although the regional equilibrium line altitude is located higher, at about 4,350 m.a.s.l., Echaurren Norte glacier is preserved due to its SE orientation within a glacier cirque. The Echaurren Norte glacier has been selected since 1975 by Dirección General de Aguas (DGA) as a permanent study site for glacier mass balance, because of its relatively simple approach from Santiago, small size and location within a relevant hydrological basin. The annual record of ablation, accumulation and net balance in the period 1975-2001 shows a large interannual variability associated to ENSO events. Annual ablation values lie within a range of ca. 2 and 4 ma^{-1}, whereas annual accumulation shows a much larger variation, between 0.5 and 6 ma^{-1}. Accumulation is almost exclusively due to winter precipitation. Annual balance values are explained by annual solid precipitation, resulting in negative balance for dry years (La Niña-years), and positive balance during years with large precipitation (El Niño-years). A predominantly negative trend of net mass balance can be observed in recent years, which is consistent with a positive air temperature trend observed in the region.

e-mail: putaendo@entelchile.net

ELSEVIER

PALAEO

Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology 172 (2001) 313–326

www.elsevier.com/locate/palaeo

Late Quaternary Glacier response to humidity changes in the arid Andes of Chile (18–29°S)

Caspar Ammann[a,*], Bettina Jenny[b], Klaus Kammer[b], Bruno Messerli[b]

[a]*Department of Geosciences, University of Massachusetts, Amherst, MA 01003-5820, USA*
[b]*Institute of Geography, University of Bern, Hallerstr. 12, CH-3012 Bern, Switzerland*

Received 24 September 1999; accepted for publication 16 May 2001

Abstract

Today, no glaciers exist between 18°30′S and 27°S, even on mountains much higher than 6000 m. These dry high-mountain environments are very sensitive to changes in climatic boundary conditions, particularly humidity since temperatures are far below freezing. Here we present a reconstruction of climatic changes since the Last Glacial Maximum for the Chilean dry Andes of the southern hemisphere. We reconstructed regional equilibrium line altitudes (ELA) for three different moraine stages, representing extensive past glaciations in this currently unglaciated region. Comparison of the regional pattern of the ELA with modern climate conditions allows us to draw implications about the paleoclimatic conditions during the best preserved 'moraine stage II' glaciations in the northern as well as in the southern part of the research area. Our results suggest humid conditions in the northern part (18–24°S) during Late Glacial times, with strongly increased convective precipitation during austral summer. The temporal-coincidence of glaciers in the mountains and high lake levels on the Altiplano (Tauca Phase) is evident. To the south, no simple shift of the Westerlies is implied by our glacier reconstructions. The northern limit of effective moisture for glacier formation did not shift significantly, but stayed in the area of the present day northernmost glaciers of the Westerlies at about 27°S. But further south, precipitation increased significantly, accompanied by at least 2–3°C colder conditions. The age of this glaciation is uncertain, but probably of Late Glacial or Last Glacial Maximum (LGM) times. Overall, glaciers in the dry Andes of South America clearly responded to large changes in the humidity, not primarily the temperature regime, with all its consequences on the environment (hydrology, vegetation, etc.), illustrating the different regional responses to global climatic change. © 2001 Elsevier Science B.V. All rights reserved.

Keywords: Altiplano; Climatic controls; Glacial extent; Last glacial maximum; Moraines; Paleoclimatology

1. Introduction

Recently, Quaternary climate research has increased its focus on the low latitudes to resolve contentious issues about temperature and precipitation change during the last maximal extent of continental ice sheets (referred to as the Last Glacial Maximum, LGM) some 19,000–21,000 cal yr BP, and the following transition to the Holocene (e.g. CLIMAP, 1976; Rind and Peteet, 1985; Broecker, 1995; Bard et al., 1997; Beck et al., 1997; Curry and Oppo, 1997; Miller et al., 1997). In South America, proxy data from the tropical oceans (Broecker, 1986; Curry and Oppo, 1997; Guilderson et al., 1994; Webb

* Corresponding author. Present address: National Center for Atmospheric Research, Climate and Global Dynamics Division, P.O. Box 3000, Boulder, CO 80307-3000, USA. Tel: +1-303-497-1705; fax: +1-303-497-1348.

E-mail address: ammann@ucar.edu (C. Ammann).

0031-0182/01/$ - see front matter © 2001 Elsevier Science B.V. All rights reserved.
PII: S0031-0182(01)00306-6

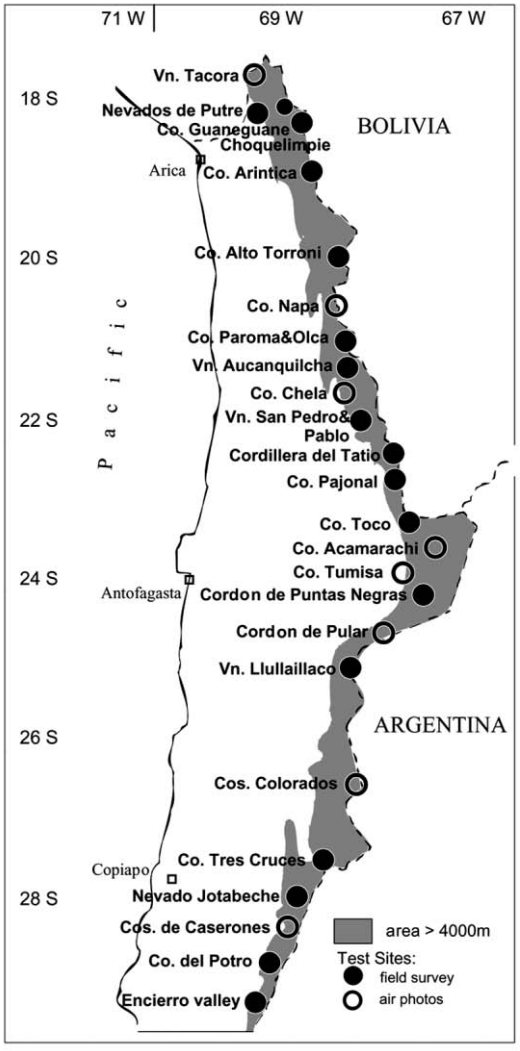


Fig. 1. Overview of the research area in northern Chile, with locations of test sites for former ELA reconstructions. Most of the test sites were studied in the field (bold circles), although some were investigated only using air-photographs (open circles). Details can be found in Table 1.

et al., 1997), Amazon lowland (Van der Hammen and Absy, 1994; Stute et al., 1995; Colinvaux et al., 1996) and the Andes (e.g. Grosjean, 1994; Hooghiemstra and Ran, 1994; Thompson et al., 1995, 1998; Clayton and Clapperton, 1997; Sylvestre et al., 1999; Klein et al., 1999) are used to reconstruct former environmental conditions.

In the high mountain environments of the tropical and subtropical Andes, extended areas with large moraine-systems suggest an eventful climate history (Hastenrath, 1971; Messerli et al., 1992; Clapperton, 1993). Unfortunately, dating is difficult and too rare to entirely disentangle the different glacial advances (Clapperton, 1993). In this paper, we investigate the former glaciation of the modern dry Andes. Two approaches to merge the glacial history of this region into a global scale are used, here called the 'cold' and the 'humid hypothesis'. In the first one, Broecker and Denton (1989) used snowline reconstructions of glaciers in a transect from the high northern latitudes along the west coast of North and South America to the high southern latitudes. Based on the general coincidence of temperature depression and glacial advances, they show an overall maximum reduction of the snowline of 900 m, and estimate a general temperature decrease of about 4.5–6.5°C during the (global) Last Glacial Maximum (LGM). For the central Andes, some regional studies of glacial and periglacial environments (e.g. Fox and Strecker, 1991) describe extensive glacial advances with these significantly reduced temperatures during the global LGM. The 'humid hypothesis' relates the last large glacier extensions in the dry Andes to a much more humid (and probably warmer) period of the late Pleistocene, around 13,000 ^{14}C yr BP (e.g. Hastenrath and Kutzbach, 1985; Messerli et al., 1992; Seltzer, 1992; Clapperton, 1993; Seltzer, 1994; Servant et al., 1995; Clayton and Clapperton, 1997). In this view, glacial expansion was suppressed during the cold LGM due to a lack of humidity.

We present data from the dry subtropical Andes between 18 and 29°S (Fig. 1). At these latitudes, the eastern and western Cordillera enclose the high intramontane plateau of the Altiplano with an elevation of about 4000 m. Full desert conditions extend from the Pacific coast (Atacama desert) to the summits of the Western Cordillera. Although the highest peaks often exceed 6000 m, no glaciers are present between 19 and 27°S (not taking into account the semi-permanent snow, firn or ice fields, e.g. on Volcano Llullaillaco, described by Lliboutry (1956) and observed by members of the Swiss NSF project since 1988). Climatically, the arid Andes are located in the transition zone between the tropics (mainly summer precipitation) and the westerly wind belt (mainly winter precipitation). Both large-scale circulation systems

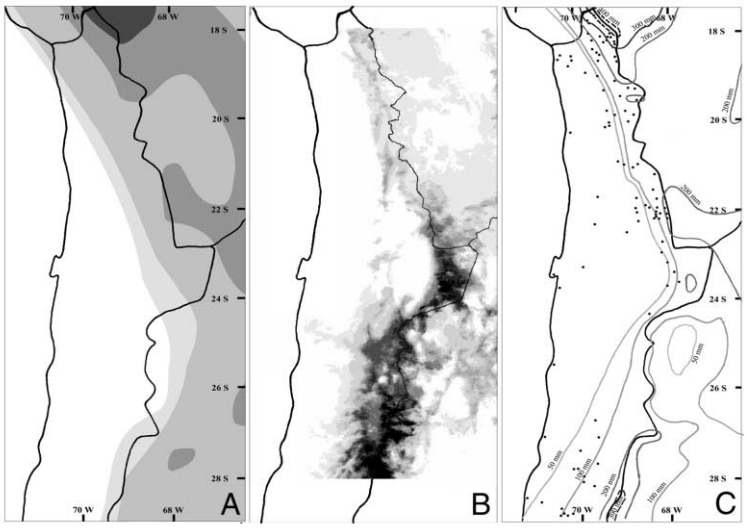


Fig. 2. Precipitation estimates: (a) Summer convective cloud cover frequency obtained from 96 GOES infrared satellite images during summer in late afternoon from October 1993 to March 1994. Gray shaded areas represent convective cloud occurrence (from light to dark shades) in 6–10, 10–30, 31–50 and >50% of days. (b) Mean winter snowfall frequency ranging from 0 to 8 events (ranging from white to darker grays) after Vuille (1996). The most frequent snow events are found to the south, with a secondary maximum at 23–24°S resulting from cut-off events. (c) Mean annual precipitation derived from summer convective cloud cover and winter snow occurrence (Ammann, 1996). The Andean Dry Diagonal is crossing the mountain range between 25 and 26°S. Black dots represent Chilean climate stations.

extend into the dry area, where they overlap. Between 18 and 29°S, the South American Dry Diagonal (Eriksen, 1983) crosses the Andes from NW to SE, tracing the rain shadow of the high mountain ridges to the prevailing airflow. Since the dry mountain environments are highly sensitive to changes in boundary conditions, they offer considerable potential for detecting patterns of regional change. Changes in either circulation system have specific impacts on the climate of the area. Their imprints with a typical spatial pattern help to link the changed environmental conditions to the source of the change.

Little is known about Late Quaternary climates of the arid Andes. Here we present evidence from former glaciations to identify past climatic conditions and outline the changes in environmental conditions in this dry transition zone. In earlier works, present day climatic conditions of this area were analyzed using convective cloud cover distribution for the summer, and snowfall frequency for the winter season (Ammann, 1996; Vuille and Ammann, 1997). The seasonal precipitation distribution showed distinct patterns: During summer (Fig. 2a), humid air from the eastern lowlands reaches the Altiplano, where the topography modifies the distribution of convective clouds and rain. The precipitation is at maximum in the north at 18°S. At a lower level, it then remains almost constant to about 23°S, from where it quickly decreases and around 25°S almost vanishes. In winter (Fig. 2b), frontal systems of the Westerlies sometimes penetrate into the area. South of 27°S the number of frontal passes with snowfall is high. Less frequent events are recorded further north, although not absent. Cold air pockets in the middle troposphere, cut-off from the strong westerly flow (cut-off cells), lead to a slight secondary maximum of snowfall events at 23–24°S. Further north only few events are found each year. These distinct seasonal patterns explain well the modern glaciation. This observation raises the interesting question, if we can find similar explanatory climate and circulation patterns for the late Pleistocene glaciation. First, we discuss the method of reconstructing late Quaternary equilibrium line altitudes (ELA) of glaciers with the Accumulation Area Ratio (AAR) method. Second, we compare the spatial distribution of the late Quaternary ELAs with modern precipitation fields and reveal their

strong relationship. This allows us to draw implications about the late Quaternary environment and the climatic conditions during the last major glaciation in the Chilean dry Andes.

2. Methods

2.1. Glacial morphology

Glacial systems respond quickly to changes in the climate. Many authors reconstruct past glacier–climate relationships including both climatic and geomorphologic parameters (e.g. Gross et al., 1978; Maisch, 1988; Kerschner, 1990). Our goal was to reconstruct former equilibrium line altitudes (ELA). This altitude is a sensitive indicator for climate conditions because it is primarily controlled by summer temperature and precipitation (Gross et al., 1978; Kerschner, 1990). Some topographic features (e.g. aspect) also have an indirect influence on a local scale. Many striations and moraines throughout most of the area show that the glaciers in the dry Andes were mainly temperate (exhibiting basal sliding) and therefore an ELA can be calculated in two ways. The primary method applied in this study to estimate former ELAs is the AAR method (Gross et al., 1978), which uses the proportion of accumulation to ablation area. Secondly, an area-independent estimate of the ELA can also be obtained through the maximum altitude of lateral moraines, which only form at or below the ELA, when the ice flowlines are pointing upward, out of the glacier body. Throughout the research area, the altitude of lateral moraines confirmed the — at first — surprising AAR of 2:1, implying temperate glacier conditions. Using the limits of cirques and glacial deposits established by field mapping or the stereoscopic study of vertical air photographs, former glacier beds were reconstructed. ELAs were then calculated for a large number of mountains and aspects along a N–S-transect in the Western Cordillera between 18 and 29°S. The locations are indicated in Fig. 1 and calculated ELAs are summarized in Table 1.

2.2. Climate

During the summer season, precipitation generally emerges from convective activity over the Altiplano, due to influx of warm and humid tropical air masses (Schwerdtfeger, 1961; Miller, 1976; Romero, 1985; Messerli et al., 1992). We use new precipitation estimates derived from systematically mapped convective cloud cover from GOES-infrared satellite images as described in Ammann (1996). After considering the large elevation changes, the frequency of convective cloud cover presented in Fig. 2a shows good agreement with precipitation as measured at climate stations and offers a higher spatial resolution and more reliable coverage of areas without regular station measurements.

To estimate winter precipitation, snowfall frequency observations (Fig. 2b, from Vuille, 1996) were merged with available climate station data. Due to a complete lack of snow accumulation measurements in the high mountain area of the southern part of the research area, extrapolations from field measurements during the season of 1993 in El Laco (23°50′S/67°30′W) were derived from the mean snowfall frequency of Vuille (1996).

Both methods are described in more detail in Ammann (1996) and Vuille and Ammann (1997). Finally, Fig. 2c presents combined summer and winter precipitation as derived from convective cloud cover and snowfall frequency.

3. Late Quaternary glaciation

Several glacial stages indicate that most of the dry region of Northern Chile was glaciated in the late Pleistocene. Dating of these glaciations is very difficult (Clapperton, 1993). Detailed morphological mapping allows us to correlate the major moraine-stages in the northern part of the area (18–25°S) from mountain to mountain. In the central region (25–27°S), air photos reveal only weak indications of possible glacial deposits, and only very reduced field assessment could be done. At 27°S, moraines appear again, and one major stage can be correlated southward to 29°S. Because of the gap in the central region, the glacial stages of the northern and southern regions cannot be morphologically and therefore, temporally correlated. Hence, the two regions are discussed separately. A detailed description of all investigated test areas and compiled maps are presented in Jenny and Kammer (1996).

Table 1
Overview of test areas with calculated equilibrium line altitudes of stages N-II and S-II. Moraines in additional locations were mapped and morphologically correlated to N-II and S-II, but no ELAs were calculated. Note, not all test areas were mapped in all aspects. More detailed information is compiled in Jenny and Kammer (1996)

Test area	Latitude longitude	Moraine (stage II) (in m)	ELA (stage II) (in m)	Max. altitude of lat. moraine (in m)	Aspect
Cerro Guane Guane	18°08′S	4650	4750		SE
	69°07′S	4500	4700		S
Nev. Putre/ Larancagua	18°05′S	4550	4700		S
	69°30′S	4550	4700		SW
		4250	4800		W
		4550	4750	4800–4850	NW
Massif Choquelimpie	18°17′S	4550	4800	4800	N
	69°12′W	4550–4650	4800–4850	4750–4800	NE
		4550	4750		E
		4500	4700	4750	SE
		4480	4700		S
		4450–4600	4700–4800	4800	W
		4550	4750		NW
Co. Arintica	18°50′S	4500	4850		NE
	69°W	4550	4750		E
		4450	4750		SE
		4350	4700		S
		4400	4700		W
Co. Alto Toroni	19°45′S	4400–4550	4700–4850		N
	68°40′W				
		4250–4450	4650–4850		E
		4300	4750–4850		S
		4450	4850		NW
Co. Napa	20°30′S	4250–4300	4500–4600		SW
	68°40′W	4400	4550		W
		4500	4650	4750	NW
Co. Paroma	20°56′S	4550	4700		NE
	68°25′W	4350	4650		SE
		4400	4600		S
Volcan Aucanquilcha	21°13′S	4500		4750–4800	N
	68°28′W	4350–4500	4750	4800–4850	E
		4200	4650	4700	SE
		4200		4700	S
		4750		4850	SW
		4450–4600	4750–4800	4750–4850	NW
Co. Chela	21°24′S	4250	4600		S
	68°30′W	4400	4650		SW
		4300	4650		W
		4450	4700	4800	NW
V. San Pedro and Pablo	21°53′S	4000	4600		S
	68°23′W				
Cord. del Tatio	22°15′S	4100	4600		SW
	68°W	4450	4650		W
		4400–4450	4700–4750	4800	NW
Co. Pajonal	22°30′S	4000	4600		S
	67°54′W	4550	4650		W
Co. Acamarachi	23°17′S	4500		5000	NW
	67°37′W	4700		5000	S

Table 1 (*continued*)

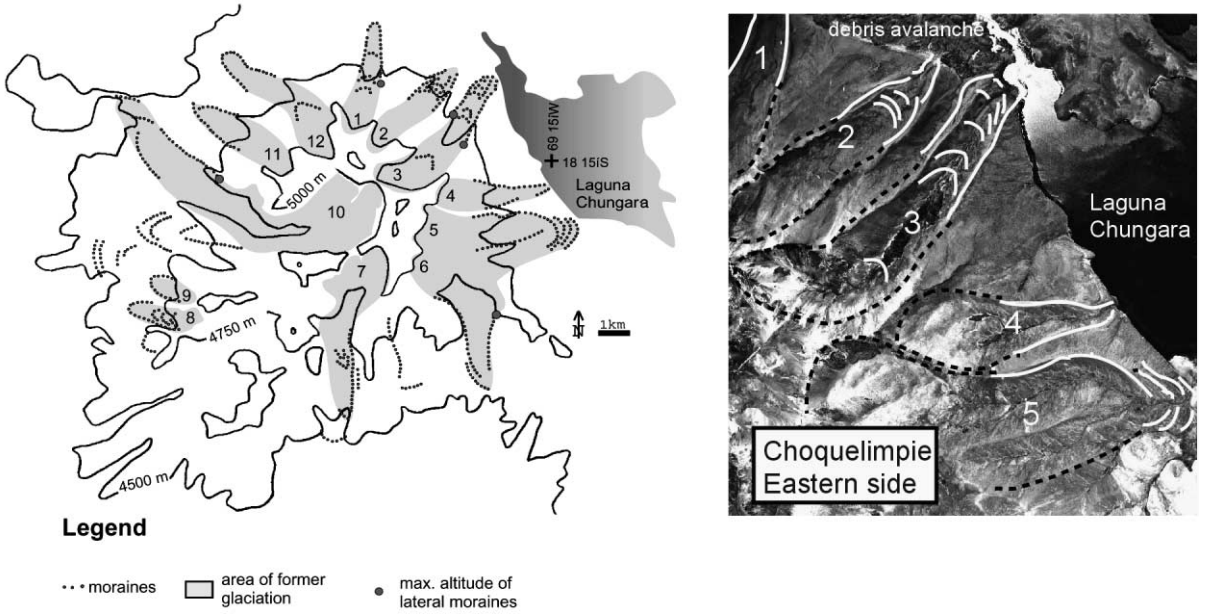
Test area	Latitude longitude	Moraine (stage II) (in m)	ELA (stage II) (in m)	Max. altitude of lat. moraine (in m)	Aspect
Cord. Puntas Negras	23°30′–50′S	4500–4700			NE
	67°30′–45′W	4300		4900	S
Cord. Pular	24°11′S	4750	5100–5150		NE
	68°03′W	4400–4650	5000–5050	5000	SE
		4600	5000–5050		S
		4500–4750	5050	5000	NW
Co. Colorados	26°10′S	5000–5150	5300–5450	(5400)	NE
	68°23′W	5250	(5500)		SW
Tres Cruces	27°06′S	4550	5300		SW
	68°47′W				
Nev. Jotabeche	27°42′S	4300	4750		N
	69°13′W	4550	4750	4750	SE
		4350	4700	4750	W
Co. Caserones Sur	28°12′S	3900	4350		NNE
	69°30′W				
Co. Potro	28°23′S	3650–4350	4300–4500		N
	69°38′W	4100	4350	4350	S
Encierro Valley	29°11′S	3500–4050	3900–4250		NE
	69°57′W	4000	4250		E
		3850–4000	4050–4150		SE
		4000	4150	4150	SSE
		3950	4200	4200	W
		4150	4250	4250	NW

3.1. The northern region (18–25°S)

In the northern part of our research area, three main moraine stages are distinguishable: The oldest, least preserved glacial deposits (Moraine-Stage-North I, hereafter referred to as N-I) reach the level of the Altiplano. These moraines are extensively eroded. Moraine-Stage-North II (N-II) showing large and sharp lateral moraines (Fig. 3a) must be significantly younger. These generally well preserved moraines are prominent as far south as 25°S, and can easily be correlated morphologically. We concentrated the calculation of the ELA mainly on this stage. Additionally, a youngest well-preserved moraine stage (N-III)



Fig. 3. (a) Massif Choquelimpie (18°17′S/69°15′W) with well preserved lateral moraine systems to the north and north-west. (b) Volcano Parinacota, immediately north of Massif Choquelimpie, with present glaciation on southern slopes.



Nr.	aspect	altitude of end moraine	maximum altitude of lateral moraine	ELA (AAR=0.67)	Nr.	aspect	altitude of end moraine	maximum altitude of lateral moraine	ELA (AAR=0.67)
1	N	4550 m	4800 m	4800 m	7	S	4480 m		4700 m
2	NE	4650 m		4850 m	8	W	4550 m		4700 m
3	NE	4550 m	4750,4800 m	4800 m	9	W	4600 m		4750 m
4	E	4550 m		4750 m	10	W	4450 m	4800 m	4800 m
5	E	4550 m		4750 m	11	NW	4450 m		4750 m
6	SE	4500 m	4750 m	4700 m	12	NNW	4550 m	4750 m	4750 m

Fig. 4. Late quaternary glaciation of Massif Choquelimpie showing the N-II ELA with different aspects and the former extension of the glaciers. An accumulation to ablation area ratio (AAR) of 2:1 was used to estimate the ELA for each ice lobe. Some lateral moraines still show well-preserved upper limits, allowing independent control of the ELA. Glacial systems 1–5 on the eastern side of Massif Choquelimpie indicated in an air photograph. Only the main moraines are shown.

is found in most of the investigated test areas. These features are significantly smaller.

As an example, we present the Massif Choquelimpie (5327 m, 18°17′S/69°15′W). Its close location to several glaciated mountains (e.g. Volcanoes Parinacota, Pomerape and Guallatire, 18–19°S) allows direct comparison of former and present climatic conditions (Fig. 3a and b). The estimate of the N-II ELA of Massif Choquelimpie is considered to be good, as lateral moraines and cirques clearly determine the former glacier catchments (Fig. 4). The ELA corresponding to N-II varies between 4700 and 4850 m, depending on aspect. This former glaciation at Massif Choquelimpie can be directly compared to the present glaciation of neighboring Volcano Parinacota, whose glacier tongues reach down to 5000 m (Fig. 3b). Today, the ELA of this ice cap lies between 5500 and 5700 m (although this is quite problematic to calculate, because there is no clear separation in accumulation and ablation zones). Jordan (1991) indicates a modern ELA of the nearby Volcano Sajama (Bolivia) between 5400 and 5700 m. Therefore, a late-Pleistocene ELA depression of about 700–1000 m must be considered. A debris avalanche from Volcano Parinacota, that crossed N-II moraines on the northern side of Massif Choquelimpie, permits some age control. From a pond within the debris avalanche deposits (Laguna Seca), bottom sediments yielded a radiocarbon age of 12,040 ± 270 ^{14}C yr BP (Geyh, pers. comm., 1997). This is a minimum age for the

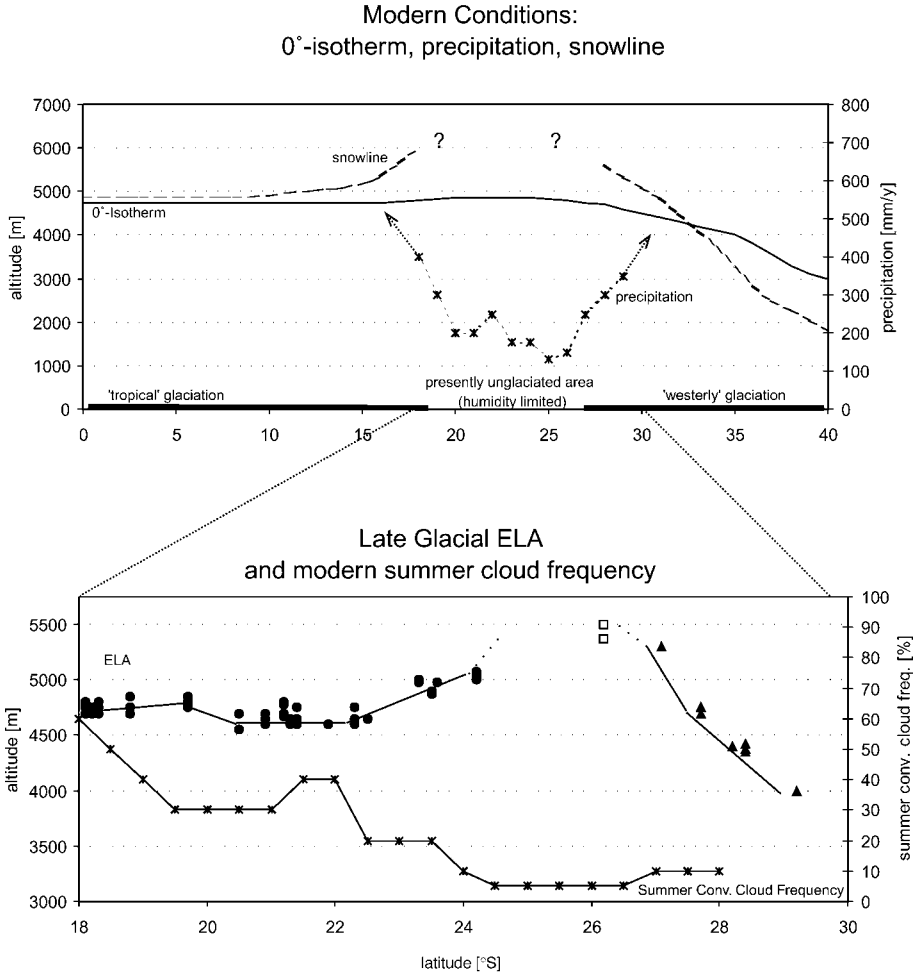


Fig. 5. Top panel: Modern climate conditions with 0°-isotherm, annual precipitation (18–29°S) and snowline in a transect from the Equator to 40°S (after Kuhn, 1981). The area where glaciers are sensitive to humidity is marked, as the snowline rises significantly above the annual 0°-isotherm and is even absent in the area of the South American Arid Diagonal. Bottom panel: Course of the former ELA based on the well-preserved moraine stage N-II and S-II with corresponding glacier catchments (AAR of 0.67), and the maximum altitude of lateral moraines. Shown are all estimates of ELAs. ELAs at the same latitude correspond to the same mountain, but to different aspects. The ELA of the northern (circles) and the southern region (triangles) cannot necessarily be considered to represent synchronous events. For the ELA of the central part (unfilled squares), it is not possible to tell if it corresponds with the northern or the southern part.

debris avalanche and therefore for N-II as well. This date is in agreement with a previously published radiocarbon age of 13,500 ^{14}C yr BP from peat samples underlying the debris avalanche (Francis and Wells, 1988). Hence, the moraine stage N-II was not developed during the Holocene but in the Late Glacial.

Many ELA calculations on N-II moraines were done along a transect from 18 to 25°S (see Fig. 5 and Table 1). It is important to note that the altitude of the reconstructed equilibrium line did not change significantly between 18 and 23°S, and there may even be a slight decrease in ELA. Within this northern region, the influence of aspect on the ELA is shown at several mountains in 100–150 m higher elevations on slopes exposed to NW, N and E (Fig. 4, Table 1). Between 23 and 24°S, the reconstructed late Pleistocene ELA abruptly rises southward by about 300 m



Fig. 6. Lateral moraines of extensive valley glaciation S-II in Encierro Valley (29°11′S/69°38′W).

and disappears further south (not yet fully verified in the field).

3.2. The southern region (27–29°S)

At 27°S, the Altiplano with its individual volcanic cones ends, and large mountain chains and deep valleys dominate southward. This also implies a general change in glacial characteristics towards valley glaciers and comparison with the northern area requires caution. All test areas show very old, smooth moraines, indicating extended glaciation (Moraine-Stage-South I, S-I). Again, an intermediate, younger moraine stage (S-II) with very well preserved moraines can be correlated within the southern area (27–29°S). The calculation of the ELA concentrates on this stage. Several smaller stages at higher elevation represent younger advances (S-III + IV, see Jenny and Kammer, 1996).

The Encierro Valley (29°11′ S/69°38′W) is a representative example (Fig. 6). Other locations are indicated in Fig. 1 and Table 1. Veit (1994) gave a first description of the Encierro Valley. The main tongue of the former glacier sat in a NE-facing valley, additionally fed by small glaciers from hanging side valleys. Several glacial stages can be noted. The terminal moraines of the very old S-I end at 3450 m, representing a lobe length of about 20 km. The much better preserved S-II moraines reach down to about 3650 m (Fig. 6). They sharply delineate a former ice stream of approximately 15 km in length with a corresponding ELA of about 4000 m. Many younger moraine systems (S-III-IV) are found higher up in the valley.

At 27°S, south of the Andean Dry Diagonal, the former ELA descends quickly towards 29°S (Fig. 5). Today, glaciation in the southern region is very limited. The northernmost glaciers in the Westerly belt are the small glaciers or ice-fields in the area of Nevado Tres Cruces (27°06′S/68°47′W). Cerro Potro (28°23′S/69°38′W) shows the largest glacier of the area (about 11 km^2). Despite the low 0°-isotherm at 4300–4500 m (Veit, 1994), the present ELA at this location is estimated between 5200 m and 5400 m (Jenny and Kammer, 1996). For Moraine-Stage S-II ELA depressions exceed 1000 m at 29°S.

4. Discussion

4.1. The northern region (18–25°S)

The pattern of late Pleistocene N-II ELA resembles closely modern summertime precipitation pattern (Fig. 2a). The general features of the present distribution of precipitation during summer can also be seen in the late Pleistocene ELA of the northern part of the research area. The modern precipitation in Northern Chile is highest at 18°S, remains constant between 19 and 22°S, like the former ELA, and diminishes quickly further south while the former ELA rises.

Today, the glacier development is strongly limited by the lack of humidity: the annual 0°-isotherm lies far below the summits (Hastenrath, 1971; Messerli et al., 1992; Ammann, 1996) and the ‘thermal readiness’ (Messerli, 1967) is present. Between 18 and 23°S, the N-II ELA is at about the same altitude as the modern 0°-isotherm. Hence, no temperature reduction was necessary in order to produce glacial advances during glacial stage N-II. Because heating of the Altiplano and the Cordilleras drives the summer time plateau circulation and convection, strongly reduced temperatures would not necessarily support an increase in precipitation. Additionally, reduced temperatures would further decrease the transport capacity of the air (Clausius–Clapeyron equation, e.g. Peixoto and Oort, 1992), a limiting factor today. Therefore, much cooler conditions would not support an extensive glaciation as seen in N-II.

There are additional arguments relating the N-II

glaciation to a synchronous humid period. Clayton and Clapperton (1997) found 5 major advances at Cerro Azanaques (19°50′S, 67°40′W) on the Bolivian Altiplano. Their 'advance 3' is delimited by morphologically sharp moraines. Based on the morphology and comparable ELA, this advance corresponds most probably to the same glacial expansion as our well-preserved N-II. Radiocarbon dating on peat at the base of the terminal moraine shows that 'advance 3' culminated after ca. 13,300 ^{14}C yr BP (Clayton and Clapperton, 1997) and preliminary ^{36}Cl cosmogenic exposure ages obtained by Sharma et al. (1995) indicate an age in the range of 14,000–12,000 yr BP. These values clearly suggest a synchronous glaciation and high lake stand (Tauca), when high-lake-levels formed on the Altiplano due to significantly higher precipitation rates than today (Hastenrath and Kutzbach, 1985; Grosjean et al., 1995; Servant et al., 1995; Wirrmann and Mourguiart, 1995). Clayton and Clapperton (1997) estimate a possible increase in precipitation of up to 600 mm (their scenario 3) from the present 350 mm. During our N-II, much higher precipitation rates than at present must have also reached the Western Cordillera between 18 and 23°S, and the minimum age of 12,040 ± 270 ^{14}C yr BP (Geyh, pers. comm. 1997) for N-II at Cerro Choquelimpie suggests a similar timing to the Tauca phase. In fact, the constant ELA between 18 and 23°S not only mirrors present day precipitation distribution, but high lake levels on the Altiplano immediately to the east of the Western Cordillera would further support an even level of the ELA.

Much higher precipitation than today is also suggested by the AAR of 2:1 (0.67). We expected ratios of 3:1 or 4:1 in these dry environments. The AAR obtained is usually found in climates with no significant limitation in humidity (Gross et al., 1978; Maisch, 1988). We conclude therefore, that N-II glaciers of Northern Chile were most probably not synchronous with the worldwide LGM (21,000 yr BP), when both temperature and humidity were minimal, but during a much more humid and not necessarily much colder climate than today.

Other indications for the connection to summer precipitation are frequent aspect-related differences in ELA. A lower ELA in SW aspect compared to the N aspect is easily explained by lower radiation, but a generally lower value in the W compared to the E calls for another explanation. Lower western ELAs support summer convective cloud activity with clear sky in the morning and, therefore, stronger radiation on E-facing slopes, but common cloud cover in the afternoon and less radiation in W-facing slopes. Additionally, local diurnal wind systems could enhance the effect through rising motion along the western slopes followed by downward descent onto the Altiplano to the east. The influence of winter snowfall is small, otherwise there would be a significant increase in precipitation southward. But the lack of clear glacial features in the Dry Diagonal excludes frontal systems as a significant factor. At most, cut-off lows might have partly contributed to the low ELA around 22–24°S, but were not sufficient in their own right to cause this extended glaciation. Additionally, the similarity in present and past snowline gradient between the Western and Eastern Cordillera across the Altiplano (Hastenrath, 1971) lend further support to a comparable to present, but intensified summer precipitation regime.

South of 23°S, precipitation decreased rapidly, similar to today (see Fig. 5). Since (1) there are only weak glacial features in the area of the Dry Diagonal (25–27°S), (2) the pattern of the increasing ELAs compares well to the modern summer precipitation distribution, (3) the AAR of 2:1, (4) the distinct differences in ELA with different aspects and (5) the comparable east–west gradient in present and past ELAs, we favor not a shift of the precipitation belt but an intensification of the summer precipitation field over the Altiplano during the time of glaciation.

4.2. The southern region (27–29°S)

Today, the number of frontal systems per year decreases quickly north of 27°S, but some rare events reach lower latitudes as far north as the Peruvian border (Vuille, 1996). The northernmost modern glaciers under westerly influence are found at 27°S, the same latitude as the first well-preserved moraines (Fig. 5). At this latitude, the present 0°-isotherm lies far below the modern and late Pleistocene ELA. The limiting factor for glaciers is exclusively the lack of humidity, not temperature. The situation is different at 29°S, where the reconstructed ELA of 4000 m for S-II drops significantly below the present day ELA

(5250–5400 m) and annual 0°-isotherm (4300–4500 m; Veit, 1994). Therefore, at 29°S, not only an increase in precipitation must be postulated, but also a reduction in temperature of at least 2–3°C (considering a lapse rate of 0.7°C/100 m).

Today, precipitation from the Westerlies increases quickly from 27°S southward (Fig. 2b), allowing glaciers to exist. Because during S-II, the glaciers fed by Westerlies were limited at about the same latitude as present (27°S), an even steeper decrease of S-II ELA than present is found between 27 and 29°S (Fig. 5). Increased influence from the Westerlies south of 27°S is consistent with the snowline transects in east–west direction presented by Hastenrath (1971). Yet, the even faster increase in precipitation for the extensive glaciation of S-II south of 27°S, and the required temperature depression at 29°S cannot be easily explained by a simple shift of the whole Westerly Storm Track. Although at 29°S both temperature decreased and humidity increased, surprisingly, the northern limit of glacier growth due to precipitation from the Westerlies did not change at all (see also Veit (1996) for evidence from soil development). Therefore, compared to today, an even further intensified gradient existed at the southern end of the 'Andean Dry Diagonal'.

The age of S-II is unknown. Veit (1994) proposes a late glacial age of about 15,000 yr ^{14}C BP, synchronous with high lake levels on the Argentinean side of the Andes. Around this time (14,890–13,900 yr ^{14}C BP), Lowell et al. (1995) found glacial advances in the Chilean Lake District (42°S). But the maximum glacial extension at these southern latitudes was reached at 21,000 yr ^{14}C BP (Lowell et al., 1995).

Finally, an important addition to this scenario is the surprisingly young age of peat incorporated into an S-III-IV moraine in the upper Encierro Valley. Grosjean et al. (1998) found a maximum age for this glacial advance of 2620 ± 45 ^{14}C yr BP (29°11′S). It is important to note, that this glacial advance, with a corresponding S-III-IV ELA of about 4300 m, indicates an increase in humidity during the late Holocene, but does not require cooler temperatures. Further to the south, in the upper Elqui-Valley (29°40′S), Veit (1996) also dated a glacial advance younger than 3360 ± 255 yr BP, confirming late Holocene glaciation in the southern part of the dry Andes. Comparable young dates for the northern part of the research area are not available, but for the Cordillera Blanca, Peru, the Neoglacial is well dated (e.g. Rodbell, 1992; Rodbell, pers. comm., 1999).

5. Conclusions

Under current climatic conditions, no glaciers can exist in the high Andes of the Western Cordillera between 19 and 27°S. The annual mean temperatures in the highest peaks are far below freezing, but the extremely dry conditions make any glacial development impossible. With increasing summer precipitation towards the tropics, persistent snowfields are more frequent, and at 18°30′S, the first glacier appears (Volcano Guallatiri). In the southern region, first glaciers appear under sharply increased wintertime precipitation south of 27°S. Between these two regimes, the South American Dry Diagonal crosses the Andes from the northwest to the southeast.

Detailed field analysis in the dry Andes of Northern Chile reveals a spatial pattern of Pleistocene glaciations in the transition zone between the tropics and extra-tropics of South America. In much of the N–S-transect, glaciation was widespread. As today, the central area (24–27°S) stayed significantly drier. The reconstructed ELA in the northern (moraine stages N-II) and in the southern region (moraine stages S-II) are compared with 'spatial fingerprints' of the circulation systems, which are responsible for the precipitation. Because there are no dates available to reliably link the reconstructed ELA rising from the south, and from the north towards the dry center, the former ELA depressions are not necessarily synchronous.

In the northern region, the ELA calculated from N-II lies higher or close to the modern annual 0°-isotherm. No temperature reduction is therefore needed for this glaciation (but this does not necessarily exclude it), but significant increases in precipitation made the glaciation possible. The spatial pattern of the reconstructed ELA follows the areas of preferred cloud development during today's summer. Because cloud development is mainly guided by humidity transport from the east as well as regional topography, strongly intensified summer precipitation would still exhibit similar overall spatial patterns towards the dry central area. This process was probably further supported by the existence of extensive

lakes on the Altiplano (Tauca Phase). The humidity for the glaciation between 18 and 25°S comes from a significant intensification of summer convective rainfall, pushing the boundary of humidity limitation for glacial development further south.

The reconstructed S-II ELA south of the dry center reflects an even steeper gradient than present. North of 27°S, no clear glacial features could be found so that extreme limitations in humidity must have prevailed. To the south, a distinct increase in precipitation is needed to depress the ELA. No temperature depression is required around 27°S, since the ELA remained above the altitude of the modern annual 0°C-isotherm. But at 29°S, finally, the reconstructed S-II ELA of large valley glaciers drops below the modern 0°-isotherm. Here, a temperature depression of at least 2–3°C is required. This change from a mainly humidity-limited environment in the north to a temperature-limited glaciation to the south is not much different from today. The postulation of a simple shift of the entire westerly belt cannot be supported, since the northern limit of the late Pleistocene glaciation did not significantly exceed the present boundary at 27°S. Nevertheless, the required increase in precipitation south of 27°S together with lower temperatures at 29°S suggests at least an intensification of the Westerlies.

A reliable chronology of the glaciations is still a matter of debate. In adjacent areas of southern Bolivia, broad synchrony of Late Glacial glacier advances and high paleolakes of the Tauca Phase is documented. The glacial advances in Northern Chile (18–25°S) are not well dated, but we note a constant former N-II ELA in the Western Cordillera at the western limits of the Tauca paleolakes. The ELA rises quickly southward as the Tauca signal of paleolakes disappears. For the southern region (27–29°S), it is unclear if the large glacial extension is synchronous with the maximum glacier advance during the (global) LGM or the well documented advance at 14,000 ^{14}C yr BP in the Chilean Lake District. This question cannot be answered until the dating problems are solved.

This study demonstrates the high sensitivity of dry mountain areas and the differences in environmental response to changes in climatic conditions. In the dry Andes, it is not mainly a temperature depression causing a glaciation, but a change in humidity. This strongly emphasizes the importance and need for a better understanding of the climatic variability in the tropics, where large humidity fluctuations have taken place since the last (global) glacial maximum.

Acknowledgements

This study was funded by the Swiss National Science Foundation (SNF 20-36382.92 and SNF 21-50854.97) and further supported by the Medici Foundation Bern, Switzerland. The authors are thankful to Martin Grosjean for the organization of the project as well as for scientific advice and to the whole research team of various institutions for discussions and inspiration. We are especially grateful to Emily A. CoBabe, Martin Grosjean and Raymond S. Bradley for their editorial support, which helped to improve the structure and readability of the text, and Mathias Vuille for kindly providing the snow data. We greatly appreciated the attentive and helpful comments on the manuscript by Geoffrey O. Seltzer and Ekkehard Jordan. Additionally, we would like to thank for administrative help from Marcela Espinoza (DIFROL), Willy Egli (Santiago de Chile) and for field support from Beatrice Messerli, as well as for support from the embassies of Chile (Bern) and Switzerland (Santiago de Chile). Climate data was made available by the Dirección General de Aguas, Servicio Geológico (Chile), ECMWF (Great Britain) and the SMA Zürich (Switzerland).

References

Ammann, C., 1996. Aktuelle Niederschlagsmuster. In: Ammann, C., Jenny, B., Kammer, K. (Eds.), Climate Change in den trockenen Anden. Geographica Bernensia, G46. Geographisches Institut Universität Bern, Bern, pp. 81–127.

Bard, E., Rostek, F., Sonzogni, C., 1997. Interhemispheric synchrony of the last deglaciation inferred from alkenone palaeothermometry. Nature 385, 707–710.

Beck, J.W., Recy, J., Taylor, F., Edwards, R.L., Cobioch, G., 1997. Abrupt changes in early Holocene tropical sea surface temperature derived from coral records. Nature 385, 705–707.

Broecker, W.S., 1986. Oxygen isotope constraints on surface ocean temperatures. Quaternary Research 26, 121–134.

Broecker, W.S., 1995. Cooling the tropics. Nature 376, 212–213.

Broecker, W.S., Denton, G.H., 1989. The role of ocean-atmosphere

reorganizations in glacial cycles. Geochimica et Cosmochimica Acta 53, 2465–2501.

Clapperton, C.M., 1993. Quaternary Geology and Geomorphology of South America. Elsevier, Amsterdam.

Clayton, J.D., Clapperton, C.M., 1997. Broad synchrony of a Late Glacial glacier advance and the highstand of paleolake Tauca in the Bolivian Altiplano. Journal of Quaternary Science 12, 169–182.

CLIMAP Project Members, 1976. The surface of the ice-age earth. Science 191, 1131–1137.

Colinvaux, P.A., DeOliveira, P.E., Moreno, J.E., Miller, M.C., Bush, M.B., 1996. A long pollen record from lowland Amazonia: forest and cooling in glacial times. Science 274, 85–88.

Curry, W.B., Oppo, D.W., 1997. Synchronous, high-frequency oscillations in tropical sea surface temperatures and North Atlantic Deep Water production during the last glacial cycle. Paleoceanography 12, 1–14.

Eriksen, W., 1983. Aridität und Trockengrenze in Argentinien. Ein Beitrag zur Klimageographie der Trockendiagonale Südamerikas. Studia Geographica 16, 43–68.

Fox, A.N., Strecker, M., 1991. Pleistocene and modern snowlines in the Central Andes (24–28°S). Bamberger Geogr. Schriften 11, 169–182.

Francis, P.W., Wells, G.L., 1988. Landsat Thematic Mapper observations of debris avalanche deposits in the Central Andes. Volcanology 50, 258–278.

Grosjean, M., 1994. Paleohydrology of Laguna Lejia (north Chilean Altiplano) and climatic implications for Late Glacial times. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology 109, 89–100.

Grosjean, M., Geyh, M.A., Messerli, B., Schotterer, U., 1995. Late Glacial and early Holocene lake sediments, groundwater formation and climate in the Atacama Altiplano 22–24°S. Journal of Paleolimnology 14, 241–252.

Grosjean, M., Geyh, M.A, Messerli, B., Schreier, H., Veit, H., 1998. A late-Holocene (<2600 BP) glacial advance in the south-central Andes (29°S), northern Chile. The Holocene 8, 473–479.

Gross, G., Kerschner, H., Patzelt, G., 1978. Methodische Untersuchungen über die Schneegrenze in alpinen Gletschergebieten. Zeitschrifts fur Gletscherkunde und Glazialgeologie XII (2), 223–251.

Guilderson, T.P., Fairbanks, R.G., Rubenstone, J.L., 1994. Tropical temperature variations since 20,000 years ago: modulating interhemispheric climate change. Science 263, 663–668.

Hastenrath, S., 1971. On the Pleistocene snowline depression in the arid regions of the South American Andes. Journal of Glaciology 10, 225–267.

Hastenrath, S., Kutzbach, J., 1985. Late Pleistocene climate and water budget of the South American Altiplano. Quaternary Research 24, 249–256.

Hooghiemstra, H., Ran, E.T.H., 1994. Late Pliocene–Pleistocene high resolution pollen sequence of Colombia: an overview of climatic change. Quaternary International 21, 63–80.

Jenny, B., Kammer, K., 1996. Jungquartäre Vergletscherungen. In: Ammann, C., Jenny, B., Kammer, K. (Eds.), Climate Change in den trockenen Anden. Geographica Bernensia, G46. Geographisches Insitut Universität Bern, Bern, pp. 1–80.

Jordan, E., 1991. Die Gletscher der bolivianischen Anden. Stuttgart.

Kerschner, H., 1990. Methoden der Schneegrenzbestimmung. Eiszeitforschung. Wiss. Buchgesellschaft, Darmstadt.

Klein, A.G., Seltzer, G.O., Isacks, B.L., 1999. Modern and last local glacial maximum snowlines in the Central Andes of Peru, Bolivia, and Northern Chile. Quaternary Science Reviews 18, 63–84.

Kuhn, M., 1981. Vergletscherung, Nullgradgrenze und Niederschlag in den Anden. Jahresbericht des Sonnblick–Vereines für die Jahre 1978–1980, 3–13.

Lliboutry, L., 1956. Nieves y glaciares de Chile, fundamentos de glaciologia. Universidad de Chile, Santiago 472 pp.

Lowell, T.V., Heusser, C.J., Andersen, B.G., Moreno, P.I., Hauser, A., Heusser, L.E., Schlüchter, C., Marchant, D.R., Denton, G.H., 1995. Interhemispheric correlations of Late Pleistocene glacial events. Science 269, 1541–1549.

Maisch, M., 1988. Die Veränderungen der Gletscherflächen und Schneegrenzen seit dem Hochstand von 1850 im Kanton Graubünden. Zeitschrift für Geomorphologie N.F., 113–130.

Messerli, B., 1967. Die Schneegrenzhöhen in den ariden Zonen und das Problem Glazialzeit–Pluvialzeit. Mitteilungen der Naturforschenden Gesellschaft, B23, Bern.

Messerli, B., Grosjean, M., Graf, K., Schotterer, U., Schreier, H., Vuille, M., 1992. Die Veränderungen von Klima und Umwelt in der Region Atacama (Nordchile) seit der letzten Kaltzeit. Erdkunde 46, 257–772.

Miller, A., 1976. The climate of Chile. In: Schwerdtfeger, W. (Ed.), World Survey of Climatology, Climates of Central and South America, 12. Elsevier, Amsterdam, pp. 113–145.

Miller, G.H., Magee, J.W., Jull, A.J.T., 1997. Low-latitude glacial cooling in the southern hemisphere from amino-acid racemization in emu eggshells. Nature 385, 241–244.

Peixoto, J.P., Oort, A.H., 1992. Physics of Climate. American Institute of Physics, New York.

Rind, D., Peteet, D., 1985. Terrestrial conditions at the last glacial maximum and CLIMAP sea-surface temperature estimates: are they consistent?. Quaternary Research 24, 1–22.

Rodbell, D.T., 1992. Lichenometric and radiocarbon dating of Holocene glaciation, Cordillera Blanca, Peru. The Holocene 2, 19–29.

Romero, H., 1985. Geografia de Chile. Instituto Geografico Militar, Santiago de Chile, Chile .

Schwerdtfeger, W., 1961. Strömungs- und Temperaturfeld der freien Atmosphäre über den Anden. Meteorologische Rundschau 1, 1–6.

Seltzer, G.O., 1992. Late Quaternary glaciation of the Cordillera Real, Bolivia. Journal of Quaternary Science 7, 87–98.

Seltzer, G.O., 1994. A lacustrine record of late Pleistocene climatic change in the subtropical Andes. Boreas 23, 105–111.

Servant, M., Fournier, M., Argollo, J., Servant-Vildary, S., Sylvestre, F., Wirrmann, D., Ybert, J.-P., 1995. La derniere transition glaciaire/interglaciere des Andes tropicales sud (Bolivie) d'apres l'etude des variations des niveaux lacustres et des fluctuations glaciaires. Geosciences de surface. Comptes Rendus Academy Science, Paris 729, 736.

Sharma, P., Elmore, D., Dunne, A., De Silva, S.L., Vogt, S., 1995. Application of ^{36}Cl surface exposure age dating to Central Andean glaciology and volcanology. American Geophysical Union, Fall Meeting 1995, Abstracts.

Stute, M., Forster, M., Frischkorn, H., Serejo, A., Clark, J.F, Schlosser, P., Broecker, W.S., Bonani, G., 1995. Cooling of tropical Brazil (5°C) during the last glacial maximum. Science 269, 379–383.

Sylvestre, F., Servant, M., Servant-Vildary, S., Causse, C., Fournier, M., Ybert, J.-P., 1999. Lake-level chronology on the southern Bolivian Altiplano (18–23°S) during Late-Glacial time and the Early Holocene. Quaternary Research 51, 54–66.

Thompson, L.G., Mosley-Thompson, E., Davies, M.E., Lin, P.-N., Henderson, K.A., Cole-Dai, J., Bolzan, J.F., Liu, K.B., 1995. Late Glacial stage and Holocene tropical ice core records from Huascaran, Peru. Science 269, 46–50.

Thompson, L.G., Davis, M.E., Mosley-Thompson, E., Sowers, T.A., Henderson, K.A., Zagorodnow, V.S., Lin, P.-N., Mikhalenko, V.N., Campen, R.K., Bolzan, J.F., Cole-Dai, J., Francou, B., 1998. A 25,000-year tropical climate history from Bolivian ice cores. Science 282, 1858–1864.

Van der Hammen, T., Absy, M.L., 1994. Amazonia during the last glacial. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology 109, 247–261.

Veit, H., 1994. Jungquartäre Landschafts- und Klimaentwicklung am Südrand der Atacama (Norte Chico, Chile). , Ein Beitrag zur Paläogeoökologie der, Ariden Diagonale' Südamerikas. University of Bayreuth, Bayreuth.

Veit, H., 1996. Southern Westerlies during the Holocene deduced from geomorphological and pedological studies in the Norte Chico, Northern Chile (27–33°S). Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology 123, 107–119.

Vuille, M., 1996. Zur raumzeitlichen Dynamik von Schneefall und Ausaperung im Bereich des südlichen Altiplano, Südamerika. Geographica Bernensia G45 118 pp.

Vuille, M., Ammann, C., 1997. Regional snowfall patterns in the high, arid Andes (South America). Climatic Change 36, 413–423.

Webb, R.S., Rind, D.H., Lehman, S.J., Healy, R.J., Sigman, D., 1997. Influence of ocean heat transport on the climate of the Last Glacial Maximum. Nature 385, 695–699.

Wirrmann, D., Mourguiart, P., 1995. Late Quaternary spatiotemporal limnological variations in the Altiplano of Bolivia and Peru. Quaternary Research 43, 344–354.

Permafrost and Periglacial Processes, Vol 2: 59-66 (1991)

Global Solar Radiation, Soil Temperature and Permafrost in the Central Andes, Argentina: a Progress Report

Lothar Schrott

Department of Geography, University of Heidelberg, Im Neuenheimer Feld 348, 6900 Heidelberg, Germany

ABSTRACT

During various expeditions to the High Andes of Argentina at latitudes 30° and 33° south, extensive geomorphological investigations have been carried out. The subtropical semiarid climate is characterized by intense global radiation with peaks of more than 1400 W/m^2 and daily sums of >39 MJ/m^2. The daily amplitudes of the soil temperatures (≤ 25 cm depth) correlate with incoming radiation. Diurnal ranges of soil surface temperature (1 cm) usually exceed 45°C, with maximum values of 55°C at 4150 m a.s.l. Active rock glaciers exist above 4000 m a.s.l. and the thickness of the active layer varies from 1.4 to 2.5 m between 4000 and 4700 m a.s.l. Periglacial features (rock glaciers, thermokarst, gelifluction, etc.) are widespread. They are used as edaphic indicators for the lower limit of discontinuous permafrost, which is thought to be at an elevation of 4000 $\pm$ 200 m a.s.l.

RÉSUMÉ

Plusieurs expéditions scientifiques ont été menées sur la ceinture périglaciare des Hautes Andes Argentines, entre 30° et 33° S, qui ont permis d'y développer des recherches géomorphologiques extensives. Le climat subtropical de cette zone se caractérise par une radiation globale intense, avec des pics dépassant 1400 W/m^2 et des valeurs totales journalières de plus de 39 MJ/m^2. Les amplitudes de la température mesurée au sol, entre 0 et 25 cm de hauteur, sont bien corrélées avec la radiation reçue. Ces mêmes amplitudes prises à 1 cm du sol atteignent souvent 45°C avec des valeurs maximales de 55°C à 4150 m de hauteur. Des glaciers rocheux existent au dessus de 4000 m d'altitude par rapport au niveau de la mer, avec des épaisseurs pour la couche active variant de 1.4 a 2.5 m entre 4000 et 4700 m d'altitude. Les phénomènes périglaciaires (glaciers rocheux, thermokarst, gélifluction, etc.) sont fréquents, et utilisés comme indicateurs édaphiques de la limite inférieure du permafrost discontinu alpin local, qui est proposé se situer à une élévation de 4000 $\pm$ 200 m d'altitude.

KEY WORDS: Permafrost Rock glacier Soil temperatures Active layer

INTRODUCTION

The Andes near San Juan and Mendoza in central west Argentina are characterized by a subtropical semiarid climate with intensive solar radiation (Minetti and Sierra, 1989). The irrigated agricultural regions in these Provinces receive an average of less than 300 mm/yr, mainly by summer rains (Hoffmann, 1975), and are highly dependent on water from melting glaciers, snow and the permafrost areas of the Central Andes (Leiva *et al.*, 1986). Consequences of the extreme climatic conditions

1045-6740/91/010059-08$05.00
© 1991 by John Wiley & Sons, Ltd.

Received 1 November 1990
Accepted 21 January 1991

Table Surface of catchment areas (km^2) and surface/percentage of glacier, rock glacier and Holocene moraines.

Name	Area (km^2)	Glacier ice		Rock glacier		Holocene moraines		Reference
		(km^2)	(%)	(km^2)	(%)	(km^2)	(%)	
	57.17	1.78	3.11	2.07	3.6			Schrott (this issue)
Horcones	197.02	9.46	4.8	9.91	5.03	4.96	2.52	Corte and Espizúa (1981)
Las Cuevas	654	19.58	2.99	23.24	3.55	8.03	23	Corte and Espizúa (1981)
Rio Mendoza	6311	303.64	4.8	182.66	2.9	100.79	.6	Corte and Espizúa (1981)

(high radiation, high potential evaporation and low amounts of precipitation) are negative water balances and mountain regions which are distinguished by the large number of active rock glaciers, areas of permafrost, and just small glaciers (Table 1). In these subtropical semiarid mountain areas hydrologic processes are closely related as components in geocryological science.

This paper provides information about climatic conditions, especially the influence of global solar radiation on melting processes and soil temperatures. It also outlines cryogenic processes and permafrost distribution in the Central Andes (30°-33° S), with specific reference to the Agua Negra basin (Figure 1), and discusses the hydrological characteristics of rock glaciers and permafrost areas.

STUDY SITES

A digital model (Figure 1) illustrates the location of the study areas in the Central Andes of Argentina between latitudes 29° 30′ and 33° south. During the

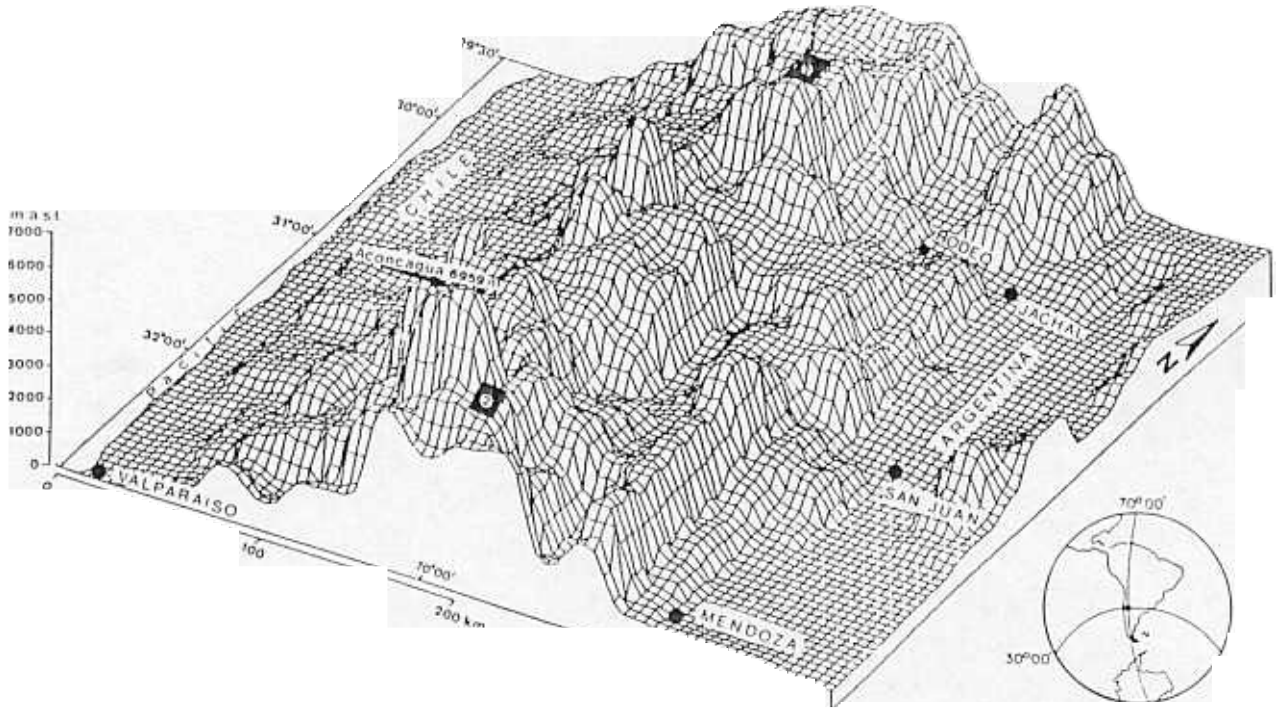


Figure 1 Quasi-3-D model of the Andes from latitudes 29°30′ to 33°30′ south, with the location of the two study areas, Agua Negra (1) and Horcones (2).

summers of 1986 and 1987 a number of borehole temperature measurements, as well as geoelectrical soundings, were carried out in the Horcones basin to determine the thicknesses of the active layer and to discover more about the heat balance of the soil in a periglacial, high-altitude environment (Happoldt and Schrott, 1989). Studies are also being undertaken further north in the Agua Negra basin, rising to 5800 m a.s.l. Both areas are situated between the hyperarid sector in the north of Chile and Argentina and the more humid sector to the south. However, in the northern basins, between latitudes 30 and 33 south, the glaciers are small, owing to the drier conditions.

The catchments are within the periglacial belt, with typical cryogenic micro- and meso-relief features such as sorted patterned ground (diameter from 10 cm to 1 m), stone stripes, solifluction, thermokarst, etc. The Agua Negra basin has a surface area of 57 km^2. A large part of the catchment area consists of cryoplanation terraces which occur between 4800 and 5200 m a.s.l., mainly on volcanic rocks. Typical phenomena for these semiarid and periglacial regions in the Central Andes at latitude 30° south are large numbers of active (inactive) rock glaciers. According to Barsch (1977), active rock glaciers in a high-mountain periglacial environment are a good indicator for discontinuous alpine permafrost. Corte (1976, 1978, 1986) has pointed out that rock glaciers and debris-covered glaciers in the central cryogenic regions of the Cordillera Principal and Cordillera Frontal are important sources of water for the oases on the east flank of the Andes.

METHODS

Measurement has been made of global solar radiation at different altitudes, air and soil temperatures in different exposures and at different altitudes, discharge volumes from a rock glacier, and the fine/coarse sediment transport in streams. In addition, in combination with ground temperature measurements, seismic soundings better differentiate between the upper parts of the soil and enable the exact determination of active layer thickness. A geomorphological map of the Agua Negra catchment includes risk areas and provides important information for the road to Chile.

Up to now it has been possible to install the following equipment to obtain data for at least one year (see Figure 2):

(i) Two dataloggers with a total of 12 channels to measure various parameters such as global radiation and air and soil temperature, continuously from December 1989.
(ii) One discharge gauge station to measure runoff from the basin.
(iii) Seven soil temperature stations to investigate the heat balance of the active layer (freeze-thaw cycles, etc.).

Global solar radiation is measured with a Kipp and Zonen pyranometer (model CM-5). The radiation sensors are mounted 2 m above the surface and connect with the datalogger. Sensors sample every 5 min and data are averaged over 15 min. Nearly 40 thermistors have been installed between 4100 and 4700 m a.s.l. for borehole temperature measurements. The calibrated thermistors with a negative-temperature coefficient (PT-100) reach an accuracy better than ± 0.1°C. Readings under field conditions are made using a BBC-Goerz Metrawatt 3.5 digital multimeter (M 2030). Thermistors were placed in a plastic cylinder with epoxy resin for protection against water and mechanical influences.

At each measurement station sensors are placed at identical depths (0.01 m, 0.1 m, 0.25 m, 0.5 m, 1 m, 2 m, etc.). The maximum depth of installation is at 2.5 m in an active rock glacier.

RELATIONSHIP BETWEEN GLOBAL RADIATION AND AIR AND SOIL TEMPERATURE

Global solar radiation is a very important parameter in meteorological, geomorphological and hydrologic processes in high-mountain periglacial environments (Häckel *et al.*, 1970; Bailey *et al.*, 1989; etc.). Snow pinnacles of spectacular size (Figure 3) constitute a special phenomenon in tropical and subtropical mountain areas with intense radiation. Unfortunately, no radiation data series are available from the Andes. In the cities of San Juan and Mendoza meteorological stations monitor several meteorological parameters, but local weather modifications make extrapolation difficult. First measurements of global radiation in the Horcones Valley (see Figure 1) at 4000 m a.s.l. provided some information about extreme values and daily variations (Happoldt and Schrott, 1989). In the Agua Negra basin at 4700 m a.s.l. the highest peaks of global radiation were obtained in December, with a maximum of more than 1400 W/m^2, and a maxi-

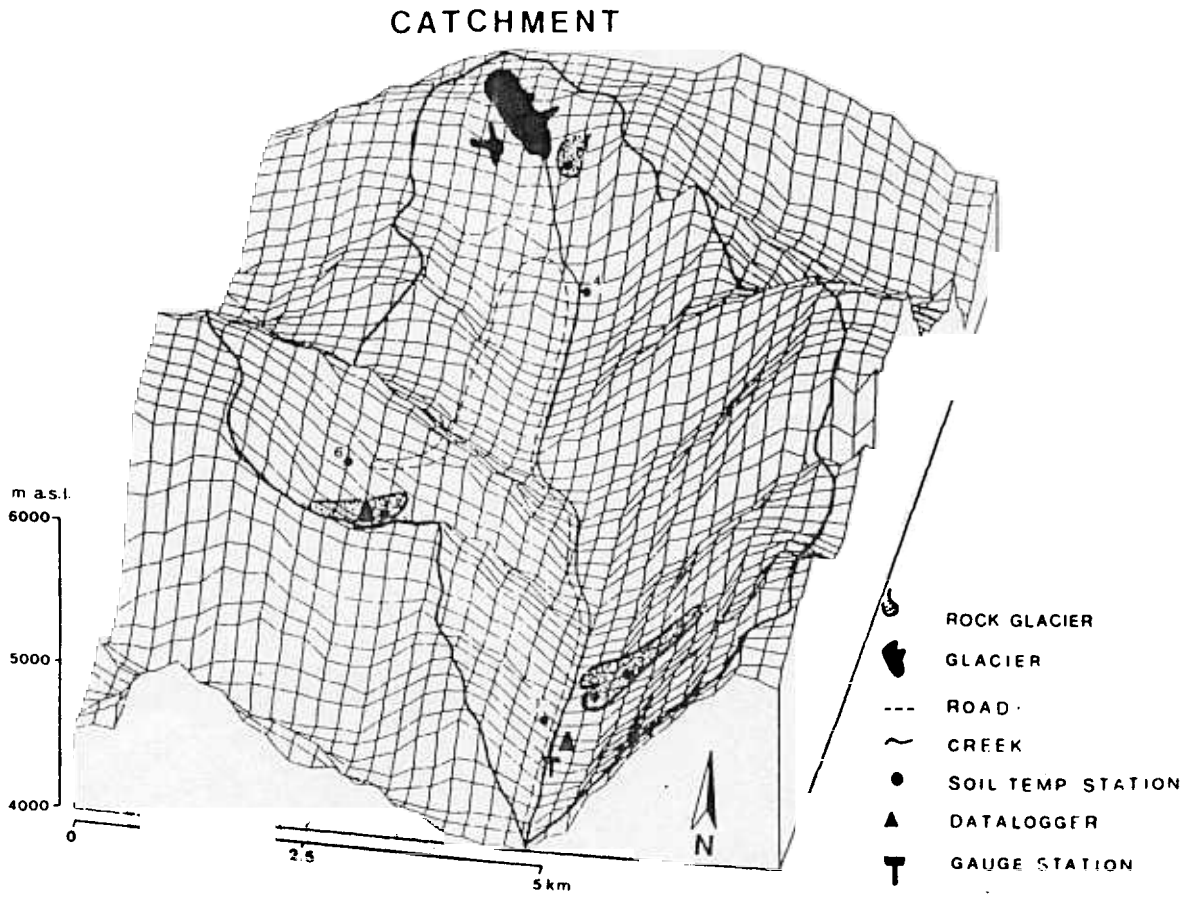


Figure 2 Quasi-3-D model of the catchment Agua Negra (30° S), illustrating the locations of the measurement stations.

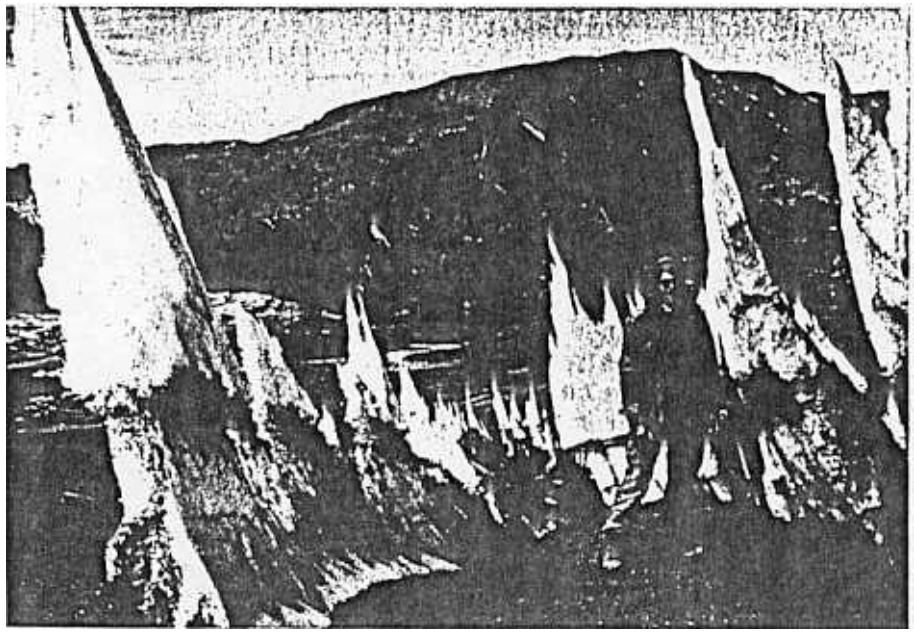


Figure 3 Snow pinnacles at an elevation of 4900 m a.s.l. (photograph: March 1987, Central Andes (33° S), Argentina).

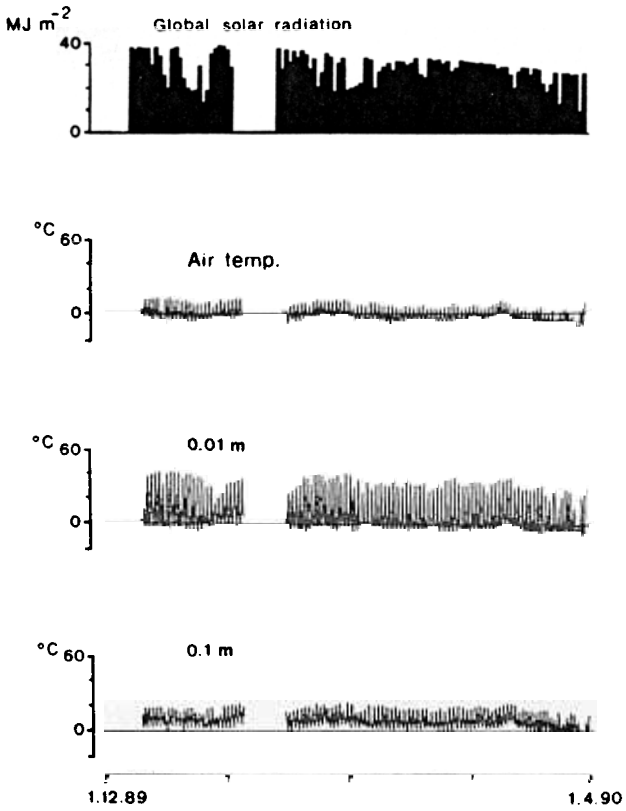


Figure 4 Diurnal variations of daily global radiation, air and soil temperatures from December 1989 to April 1990. Measurement station at 4700 m a.s.l.

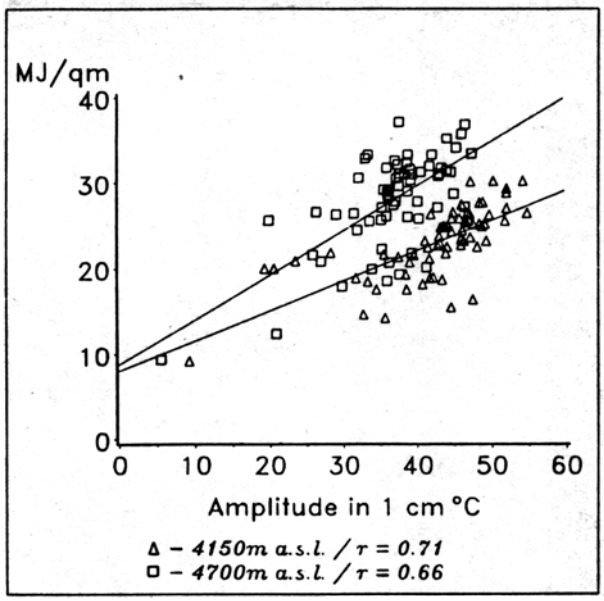


Figure 5 Relationship between daily amplitude of soil temperature (1 cm depth) and daily global solar radiation.

mum daily value in January of 39. MJ/m^2 (Figure 4).

The ground temperature range in the upper part of the soil (≤ 25 cm) is highly dependent on the intensity of incoming radiation. Figure 5 illustrates the good correlation between daily global radiation and daily amplitude of soil temperature at a depth of 1 cm. Also, air temperature is closely related to the global radiation in the uppermost parts of the soil. By contrast, at a depth of 10 cm, the relationship between air and soil temperature amplitude is lower (Pearson correlation coefficient $r = 0.49$); there is a decrease in the degree of correlation between air and soil temperature with depth, but the correlation between radiation and soil temperature is still high ($r = 0.71$). Consequently, fluctuations of air temperature do not always produce fluctuations in soil temperatures, but cloudy or sunny weather conditions (low or high radiation) cause direct changes in ground temperatures in the upper parts (≤ 25 cm).

RANGE OF GROUND TEMPERATURE

During periods of high incoming radiation (> 1000 W/m^2) amplitudes of > 50°C with maximum values of 55°C in the uppermost part of the soil (1 cm) were measured (see Figures 4 and 5). In summertime (November-March) the diurnal range of the soil surface temperatures is higher than 40°C. The high temperatures and the great damping factor ($> 50\%$) of the daily amplitude in the upper 10 cm suggest low thermal conductivity and diffusivity of the material (Kraus, 1987).

The phase shift of the temperature wave from the surface to a depth of 10 cm amounts to 2-3 h (dry soil). After snowfall the thermal conductivity of the wetter soil is higher and therefore the phase shift is reduced to 1 h.

At 0.25 m depth daily fluctuations of a few degrees (3-6°C) occur (Figure 6); the daily amplitude at this depth underlies a damping factor of about 90% and a phase shift of approximately 5 h. The course of soil temperature at 0.5 m depth ranged between 1 and 2°C and at 1 m diurnal fluctuations oscillate only one tenth of a degree. The phase shift of the temperature wave down to 1 m is 15-18 h. At 2.5 m depth the thermistor is probably just above the permafrost table or an ice lens, because all values oscillate at 0°C (Figure 6).

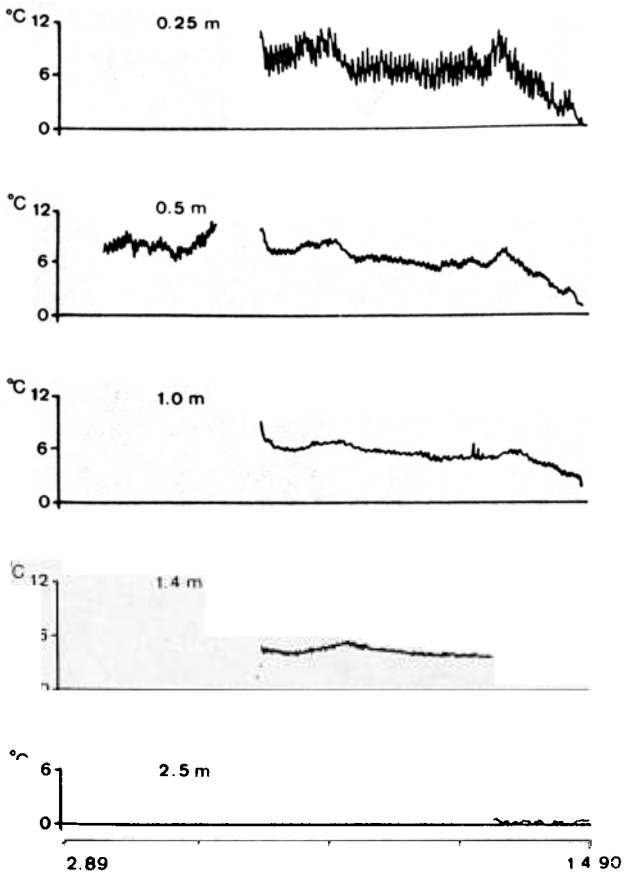


Figure 6 Diurnal variations in soil temperatures with depth in the active layer of an active rock glacier. Measurement station at 4700 m a.s.l.



Figure 7 An active rock glacier (Agua Negra I) with steep frontal slope (35°) and well-developed prominent surface relief of furrows and ridges. The arrow indicates the spring of the rock glacier (see Table 2). (Photograph: February 1990, Central Andes (30° S), Argentina.)

ROCK GLACIER DISCHARGE

Knowledge about the hydrological characteristics of rock glaciers is still limited (e.g. Haeberli, 1985; Gardner and Bajewski, 1987). Previous research (e.g. Haeberli, 1985) yielded discharge volumes which are less than those from glaciers of comparable size. Some examples of discharge volumes in different areas are shown in Table 2. In summertime (January-March) a discharge volume from an active rock glacier (see Figure 7) of approximately 5-8 l/s has been measured. However, the total discharge volume should be several times greater because the rock glacier front has other non-

Table 2 Rock glacier discharge.

Mountain area	Name	Length (m)	Surface (km^2)	Discharge	Reference
Swiss Alps	Gruben rock glacier			few l/min	Haeberli (1985)
	various	≈1000 m		10-20 l/s (range typically)	Haeberli (1985)
Canadian Rocky Mountains	Hilda rock glacier		5 km^2	90-270 l/s	Gardner and Bajewsky (1987)
Central Andes of Argentina	Agua Negra rock glacier	≈1200 m	0.4 km^2	5-8 l/s	Schrott (this issue)

measured springs besides the principal stream. Furthermore, interflow is an additional factor. Although these measurements of rock glacier discharge in the Central Andes are of similar magnitude to those from the Alps (Haeberli, 1985), further data are necessary.

OCCURRENCE AND DISTRIBUTION OF PERMAFROST IN THE CENTRAL ANDES (LATITUDES 30°-33°S)

High-mountain or alpine permafrost in the subtropical Central Andes is well known (e.g. Corte, 1976, 1978, 1986; Barsch and Happoldt, 1985; Garleff and Stingl, 1985; Barsch, 1986). However, the altitudinal differentiation of alpine permafrost (sporadic-discontinuous-continuous) is controlled by variations in exposure, local climatic conditions, etc. Until now, few quantitative data exist about the vertical distribution of permafrost in the Andes (e.g. Corte, 1986; Barsch and King, 1989; Happoldt and Schrott, 1989). The lowest limit of sporadic permafrost (i.e. rock glaciers), commented on by Corte (1976), is at an elevation of 3200 m a.s.l. in the Cordon del Plata at latitude 33°S. In this case a local modification of mountain terrain occurs due to cold air drainage (Cordillera Frontal, latitude 33° south: Corte, personal communication, September 1990) under otherwise stable anticyclonic weather conditions (Harris, 1986).

Indicators for discontinuous permafrost in the Andes are thought to be the big and widespread active rock glaciers. Their surface topography (e.g. steep slopes (35°) and a multitude of convex and concave irregularities), and variations in rock glacier flow in space and time, are evidence for rock glacier activity.

Because active rock glaciers, thermokarst and gelifluction exist above 4000 m a.s.l., the lower limit of alpine discontinous permafrost is thought to be at 4000 $\pm$ 200 m a.s.l. in the Central Andes between latitudes 30° and 33° south. At 5000 m a.s.l., and above, continuous permafrost probably occurs, and the active layer at this altitude is reduced to a few centimetres.

CONCLUSIONS

The lack of quantitative research in the subtropical High Andes makes comparable studies difficult. Measurements of global solar radiation at elevations between 4000 and 4700 m a.s.l. provide interesting data about the magnitude of this parameter as it influences mountain geomorphic processes.

The high daily temperature range in the upper few centimetres of soil and rock during approximately 8 months per year should be an important factor influencing high weathering rates. Further research is necessary to classify quantitatively the different frost weathering processes.

ACKNOWLEDGEMENTS

This project is supported by a scholarship from the Gottlieb Daimler and Karl Benz Foundation, Germany. Logistical support was provided by the Department of Geography from the University of Heidelberg and by the Instituto Argentino, de Nivologia y Glaciologia, Mendoza, Argentina. The assistance in the field from K.-H. Scholl and J. Corral is gratefully appreciated. I thank A. E. Corte for critical comments on the manuscript, and R. L. Holmes, J. Keegan and H. Happoldt for some important consultations on statistical analyses. M. E. Soler and R. Branham corrected an earlier draft of the English text. I would also like to thank H. M. French for numerous improvements on the original manuscript.

REFERENCES

Bailey, W. G., Weick, E. J. and Bowers, J. D. (1989). The radiation balance of alpine tundra, Plateau Mountain, Alberta, Canada. *Arctic and Alpine Research*, **21**, 126-134.

Barsch, D. (1977). Alpiner Permafrost-ein Beitrag zur Verbreitung, zum Chararakter und zur Ökologie am Beispiel der Schweizer Alpen. In Poser, H. (Ed.), Formen, Formengesellschaften und Untergrenzen in den heutigen periglazialen Höhenstufen der Hochgebirge Europas und Afrikas zwischen Arktis und Äquator, *Abhandlungen der Akad. d. Wissenschaften in Göttingen, Mat.-Phys. Kl.*, **31**, 118-141.

Barsch, D. (1986). Probleme der Abgrenzung der periglazialen Höhenstufe in den semi-ariden Hochgebirgen am Beispiel der mendozinischen Anden (Argentinien). *Geoökodynamik*, 7, 215-227.

Barsch, D. and Happoldt, H. (1985). Blockgletscherbildung und holozäne Höhenstufengliederung in den mendozinischen Anden, Argentinien. *Zentralblatt für Geologie und Paläontologie 1984*, **11/12**, 1625-1632.

Barsch, D. and King, L. (1989). Origin and geoelectrical resistivity of rock-glaciers in semi-arid subtropical mountains (Andes of Mendoza, Argentina), *Zeitschrift für Geomorphologie*, **33**, 151-163.

Corte, A. E. (1976). The hydrological significance of rock glaciers. *Journal of Glaciology*, **17**, 157-158.

Corte, A. E. (1978). Rock glaciers as permafrost bodies with a debris cover as an active layer: A hydrological approach, Andes of Mendoza, Argentina. In *Proceedings, Third International Conference on Permafrost.* National Reseach Council of Canada, Ottawa, pp. 262-269.

Corte, A. E. (1986). Delimination of geocryogenic (periglacial) regions and associated geomorphic belts at 33 south latitude, Andes of Mendoza, Argentina. *Biuletyn Peryglacjalny*, No. 31, 31-34.

Corte, A. E. and Espizua, L. E. (1981). *Inventario de los glaciares de la cuenca del Rio Mendoza.* Conicet-Ianigla, Mendoza. 62 pp.

Gardner, J. S. and Bajewsky, I. (1987). Hilda rock glacier stream discharge and sediment load characteristics, Sunwapta pass area, Canadian Rocky Mountains. In Giardino, J. R. Schroder, J. F., Jr. and Vitek, J. D. (Eds), *Rock glaciers.* Allen and Unwin, London. 335 pp.

Garleff, K. and Stingl, H. (1985). Geomorphologische Aspekte aktuellen und vorzeitlichen Permafrostes in Argentinien. *Zentralblatt für Geologie und Paläontologie 1985*, **9/10**, 1367-1374.

Häckel, H., Häckl, K. and Kraus, H. (1970). Tagesgänge des Energiehaushaltes der Erdoberfläche auf der Alp Chukkung im Gebiet des Mt. Everest. *Khumbu Himal*, **7**, 71-134.

Haeberli, W. (1985). *Creep of Mountain Permafrost: Internal Structure and Flow of Alpine Rock Glaciers.* Mitt. Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie an der ETH Zurich, 77. 142 pp.

Happoldt, H. and Schrott, L. (1989). Globalstrahlung und Bodentemperaturen in der periglazialen Hohenstufe am Aconcagua, argentinische Hochanden. In Hüser, K., Kleber, A. and Stingl, H. (Eds), Beträge zur Geomorphologie: Quartärmorphologie Relief und Tektonik. *Bayreuther Geowissenschaftliche Arbeiten*, **14**, 35-45.

Harris, S. A. (1986). *The Permafrost Environment.* Croom Helm, London. 276 pp.

Hoffmann, J. A. J. (1975). *Atlas climatico de America del Sur.* WMO-UNESCO, Budapest.

Kraus, H. (1987). Specific surface climate. In Hellwege, K.-H. and Madelung, O. (Eds), *Landolt-Börnstein: Zahlenwerte und Funktionen aus Naturwissenschaften und Technik*, N. S., 5, Band 4 (c), *Klimatologie.* Teil 1, 29-92.

Leiva, J. C., Gabrera, G. and Lenzano, L. (1986). Glacier mass balances in the Cajon del Rubio, Andes Centrales Argentinos. *Cold Regions Science and Technology*, **13**, 83-90.

Minetti, J. L. and Sierra, E. M. (1989). The influence of general circulation patterns on humid and dry years in the Cuyo Andean region of Argentina. *Journal of Climatology*, **9**, 55-68.

A Handbook on Periglacial Field Methods

International Permafrost Association (IPA)
The Working Group on Periglacial Processes and Environments

Editors:

Ole Humlum
The University Centre on Svalbard, P.O.Box 156, N-9171 Longyearbyen, Norway, and University of Oslo, P.O. Box 1042 Blindern, N-0316 Oslo, Norway.

Norikazu Matsuoka
Institute of Geoscience, University of Tsukuba Ibaraki 305-8571, Japan

Version 20040406

Active Layer Temperature Monitoring in Blocky Material



Susanne Hanson, Glaciology and Geomorphodynamic Group, Department of Geography, University of Zürich,

Switzerland, e-mail: shanson@geo.unizh.ch

Introduction

The processes in the active layer and its connection to the atmosphere is of great importance for the state of the frozen ground below. These processes depend to a great extend on the actual material of the active layer (e.g. boulders, solid bedrock, gravel or soil) and the fieldwork should be designed with regards to what sub-surface is being measured. The here discussed procedures focus especially on active layer monitoring in areas of coarse boulders which usually covers considerable parts of the high alpine environment. Two main procedures are considered. One simple and quit cheap; the other more sophisticated and definitely more expensive and difficult to complete.

In bore hole palaeoclimatology, it is commonly assumed that a direct coupling exists between air and ground temperatures. This assumption is valid only if variables affecting ground-surface temperature exchange have remained constant through time. It should therefore be taken into awareness that ground temperatures can contain non-climatic noise due to changes in ground-surface variables, including vegetation cover, duration and thickness of snow cover, precipitation and melt water, wind speed and thereby wind pumping within the boulders, net radiation, phase change and boundary conditions. All this, as well as if one measure site or a network of sites is

necessary should therefore be considered when designing the fieldwork in proportions to what is expected to be evaluated from the data.

Processes which influence the temperature regime within the active layer has been discussed in the literature (e.g. Williams and Smith, 1989; Humlum, 1997; Humlum, 1998; Harris and Pedersen, 1998; Kane et al., 2001; Hinkel et al., 2001; Schmidt et al., 2001)

Miniature temperature data loggers (mini loggers)

Mini loggers can be used as a simple and cheap approach when establishing a temperature profile above and within the active layer. The mini loggers are described in detail elsewhere in this publication. The mini loggers can normally be programmed to measure and store data at a variety of time spans and are simply placed with the desired spacing within the boulders. Mini loggers, though do not have endless memories and the more often temperatures have to be registered the shorter the time the mini loggers will be operating. Further disadvantages are that the batteries have to be replaced to not loose data and that the resolution of the data often is quite coarse.

Bore hole and thermistor chain

The system recording the data using this approach consists of the thermistor sensor chain, lowered in a bore hole, and connected to a data logger and a storage module normally driven by a battery or a solar panel. The data logger is the brain of a data acquisition system. They do the measurements at a specified scan rate and process the data. The data logger needs to be programmed to measure and download data at a certain time and form. The storage module is the device used to transport the data and programs between the field site and the office or transferring the data directly to a laptop. Furthermore, it also increases the data logger's storage capacity by storing data and programs in a solid state module or a memory card. The thermistor chain itself consists of the thermistor sensors which are placed with the desired space between them and wrapped up in a plastic coating.

The drilling

This part of the fieldwork is not to be underestimated, especially not if the drilling takes place in loose material or boulders. It is heavy work and do involve quit a lot of practice. If one has to do the drilling one-self several things have to be taken into consideration.

The type of drill needed is dependent on how deep the bore holes will be, the diameter of the hole and the material within the drilling takes place. The drilling requires electricity and water supply which can turn out to be a problem in remote areas. It is possible to drill dry but it is much to prefer drilling with water. This will cool the drilling head during the drilling, smoothen the drilling and is a

good deal faster than dry-drilling.

For the design of the bore hole system, the first step is to decide the diameter of the bore hole. To reduce air circulation within the bore hole choose the diameter of the drilling tubes as small as possible. Otherwise the air circulation within the bore hole, once established, can disturb the natural temperature profile. The chain should be fastened to a weight at the end to be sure that there is weight enough to keep the chain straight and get it all the way to the bottom. This weight can have a larger diameter than the actually chain which is to keep in mind when deciding the diameter. Consider as well the option of wrapping neoprene tightly to one side of the chain. When the chain is lowered in the afterwards the sensors will be pressed against the wall of the bore hole. This will result in a more precise measurement of the material and also prevent air circulation in the hole.

Next step is to decide the length of the bore tubes. It is a good idea to divide the full length of the bore hole, and thereby the tube length, into a certain number of meters. Or said in another way: if the hole has to be 6m deep use 6 * 1m. tubes plus one 1/2m. tube. This is due to practical reasons during the drilling.

Third step is to decide for the drilling crowns. It is necessary to know the geology of the material where the drilling will take place. In loose or coarse material several different crowns that can be changed according to varying material during the drill are needed. This often implies at least one crown for loose material and one that fit the main hardness of the boulders. Let the company guide you according to the material, how deep the bore holes will be and how many holes needs to be drilled.

A final very important consideration is wherever the bore hole should be installed with an inner tube. An inner tube is a thin plastic tube which is installed during the drilling. The advantage of installing an inner tube is that a lot of problems will be avoided during the actual drilling as it prevent the hole from collapsing every time the tubes are pulled out of the hole to be emptied. The disadvantage is that it will also act as a thin barrier between the thermistor sensors and the material which temperature is to measure.

The sensor chain

The chain itself consists of the sensors and the bundle of their wires coated tightly with a plastic mantle. A temperature sensor consisting of a semiconductor that provides rapid and large changes in resistance for relatively small changes in temperature. Several configurations of the wires can be devised to minimize the risk of loosing data from all the sensors if some part of the chain is damaged. Again it has to be considered that the very mantle protecting the sensors also reduce the precision of the measurements just as it is the case with the coating of the bore hole.

It is possible to fabricate the chain oneself but it is definitely easier to let the company from where the sensors are bought construct it. The extra money can quickly turn out to be good value in the long run. Whatever the choice is the following issues has to be considered.

First the decision has to be made on how fine the spacing between the sensors on the chain should be. The temperature sensor spacing in the bore hole is usually dependent on the vertical resolution required and the stratification of the sub-surface. The top 50cm will experience the most rapid near-surface short-term temperature variation due to the diurnal changes of the atmosphere above. There is thus a certain logic in less spacing between the sensors in the upper 50cm to 1 m of the chain. The registration of the exact surface temperature is quite tricky as the actual boundary is infinitely thin. A mini logger or another thermistor sensor placed nearby as a reference is one approach.

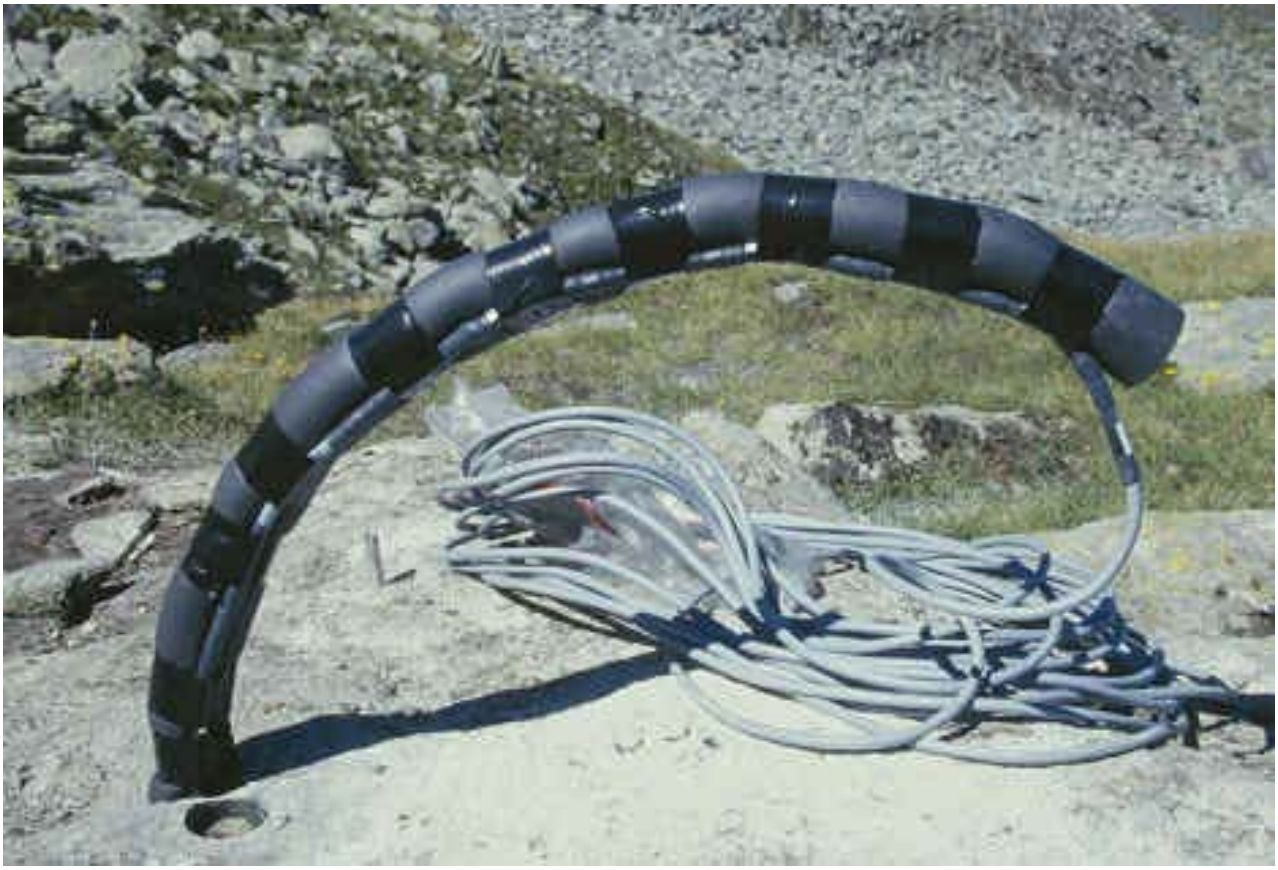


The drill with drilling tubes, Corvatsch, 2002. Photo: P. Blétry.

The thermistor chain should be calibrated depending on the accuracy and temperature range of interest as well as the absolute accuracy of the whole system should be taken into account. If measuring over a wide range of temperatures calibration of each thermistor in several temperature ranges is needed. This will give a calibration curve for each sensor, for each temperature range. These are then applied individually for the conversion of the measured resistance in the corresponding range of temperature. In such a case it makes sense to log the data as measured resistance. If the actual temperature range is narrow the data logger can be programmed to calculate and store the data as temperatures.

The measured temperatures in the bore hole will for some time reflect the fact that drilling generates a lot friction heat which is transmitted into the surrounding material. It is hard to say how long time it takes before the system is back to its original state as it depends on the actual situation. Three months to half a year has been reported. The temperature profile has to be examined closely till it is evident that it is no longer cooling and first from then on the data can be used.

The durability of the sensors has to be judged as well. Over time the sensors should be calibrated again if possible. This is possible only if the chain can be pulled out e.g. the chain is lowered in a bore hole which is coated or drilled in firm bedrock. If the chain is lowered in a hole drilled in loose material the chances that the hole is collapsed at some point is high and it can not be recommended to pull the chain out as it will probably not be possible to lower it back in again.



Lowering the chain in one of the bore holes at Corvatsch, 2002. Neopren is attached to the chain to prevent circulation. Photo: S. Hanson

Setting up the system

Always inspect if the measuring site is also prone to avalanches or other natural hazards. When the system is established cover all exposed wires on the ground with rocks. That will to some extend protect the wires from e.g. animals which chews in the cables and from weathering of wind and stone fall. Do also remember to do a GPS point measurement to be able to locate the site under a thick snow cover. When the system is first established there is not much maintaining other than checking that the system is running and repair ongoing weathering.

References

Harris, S.A. and D.E Pedersen, 1998: Thermal regimes beneath coarse blocky materials. Permafrost and Periglacial Processes, 9 (2): 107-120.

Hinkel, K.M., F. Paetzold, F.E. Nelson, J.G. Bockheim, 2001: Patterns of soil temperature and moisture in the active layer and upper permafrost at Barrow, Alaska: 1993-1999. Global and Planetary Change, 29: 293-309.

Humlum, O., 1997: Active layer thermal regime at three rock glaciers in Greenland. Permafrost and Periglacial Processes, 8: 383-408.

Humlum, O., 1998: Active layer thermal regime 1991-1996 at Qeqertarsuaq, Disko Island, Central Greenland. Arctic and Alpine Research, 30 (3): 295 -305.

Kane, L.D., K.M. Hinkel, D.J. Goering, L.D. Hinzman, S.I. Outcalt, 2001: Non-conductive heat transfer associated with frozen soils. Global and Planetary Change, 29: 275 - 292

Schmidt, W.L., W.D. Gosnold, J.W. Enz, 2001: A decade of air-ground temperature exchange from Fargo, North Dakota. Global and Planetary Change, 29: 311-325

Williams, P.J. and M.W. Smith, 1989: The frozen earth: fundamentals of geocryology. Cambridge, Cambridge University Press. 306 p.

Changes of the 0°C isotherm and the equilibrium line altitude in central Chile during the last quarter of the 20th century

JORGE F. CARRASCO[1,2], GINO CASASSA[2] & JUAN QUINTANA[1]

1 *Dirección Meteorológica de Chile, Casilla 717, Correo Central, Santiago, Chile*
jorge.carrasco@meteochile.cl

2 *Centro de Estudios Científicos, Av. Prat 514, Valdivia, Chile*

Abstract An overall retreat of glaciers has been observed in the Andes of central Chile during the last ~100 years. Precipitation is mainly of frontal origin and concentrates in winter months. Analysis of precipitation data shows a decrease until 1976, an increase thereafter north of 34ºS and a decrease south of 34ºS, but overall no significant trends during the last quarter of the 20th century. Analysis of radiosonde data of central Chile shows mid-tropospheric warming with an elevation increase of the 0ºC isotherm of 122 ± 8 m and 200 ± 6 m in winter and summer, respectively, during the 27-year period between 1975 and 2001. The results point to a snowline elevation increase in the region during the last quarter of the 20th century and a concurrent rise of the equilibrium line altitude (ELA) and suggest that mid-troposphere warming is the main cause for glacier retreat in central Chile.

Key words central Chile; climate change; equilibrium line altitude; glaciers; troposphere warming; zero isotherm altitude

Changements de l'isotherme 0°C et de la ligne d'équilibre des neiges dans le Chili central durant le dernier quart du 20ème siècle

Résumé Un recul glaciaire général a été observé dans les Andes du Chili central durant les ~100 dernières années. Les précipitations sont essentiellement d'origine frontale et sont concentrées pendant les mois d'hiver. L'analyse de données de précipitation montre une diminution jusqu'en 1976, puis une augmentation au nord de 34°S et une diminution au sud de 34°S, mais dans l'ensemble aucune tendance significative durant le dernier quart du 20ème siècle. L'analyse de données de radiosondage du Chili central montre un réchauffement du milieu de la troposphère avec une élévation de l'isotherme 0°C de 122 ± 8 m et 200 ± 6 m, respectivement en hiver et en été, durant la période 1975–2001 de 27 ans. Les résultats mettent en évidence, dans la région, une élévation de la limite des neiges durant le dernier quart du 20ème siècle et une élévation concomitante de la ligne d'équilibre des neiges, et suggèrent que le réchauffement du milieu de la troposphère est la cause principale du recul glaciaire du Chili central.

Mots clefs Chili central; changement climatique; ligne d'équilibre des neiges; glaciers; réchauffement de la troposphère; altitude de l'isotherme zéro

INTRODUCTION

It is a well-established fact that glaciers in central Chile (considered here as the region between 30 and 38ºS) have been retreating and shrinking rapidly during the last decades (e.g. Casassa, 1995; Rivera *et al*., 2002), presumably due primarily to climate warming (Aceituno *et al*., 1993; Rosenblüth *et al.*, 1997; IPCC, 2001). Glaciers are a very important part of the hydrological cycle as a temporal storage of water. The mass balance of glaciers is highly sensitive to climate changes, and the response times for mountain glaciers in central Chile ranges from seasonal to yearly time scales for surface mass balance (Escobar *et al*., 1995) to several years in terms of frontal

 Copyright © 2005 IAHS Press

changes. Glacier variability can be monitored by information of changes in the position of the equilibrium line altitude (ELA). However, ELA data are very limited for central Chile (Rivera *et al*., 2000), and the snowline elevation observations in this region are carried out only occasionally by *Dirección General de Aguas* (DGA) from May to December, usually after a snowfall event. The DGA data set covers the last 25 years but preliminary analyses show that it is unreliable for studying the long-term trend behaviour of the snowline (Casassa *et al*., 2003).

Another relevant source of information, which has not been previously used in central Chile for deriving the behaviour of the snowline and ELA, is the daily temperature profile obtained from radiosonde data. Station Quintero (32º47′S, 71º33′W, 8 m a.s.l.) was installed in central Chile at a coastal location in 1958. In August 1999 the station was relocated approx. 100 km south along the coast, to its current location, Santo Domingo (33º38′S, 71º38′W, 77 m a.s.l.). Since 1958, two launches per day (00:00 and 12:00 h UTC) are performed at Quintero station providing an unique data set for analysing atmospheric variables such as air temperature, relative humidity, wind direction and wind speed at different altitudes from the near surface to the upper atmosphere. These daily data are relayed to the World Meteorological Centres through the Global Telecommunication System (GTS) of the World Meteorological Organization (WMO) and they have been feeding the numerical forecast products. In this paper, recent changes in snowline elevation (and ELA) are derived from the analysis of 0ºC isotherm altitudes based on radiosonde data and precipitation data in central Chile. The analysis is relevant for discussions of future scenarios of glacier recession in the region, and their impacts on regional water supply.

CLIMATIC BACKGROUND

The climatic characteristics of the region are defined by the quasi-permanent influence of the South Pacific anticyclonic centre and the seasonal displacement of the westerly regime that steers frontal depressions towards central Chile during the winter. Along with these meteorological factors, the climate is affected by the cold oceanic current (Humbolt current) that runs northward along the coastal shore of Chile and Peru, and is strongly influenced by the regional topography characterized by the low-altitude coastal cordillera, the central valley and the high Andes to the east. The precipitation regime increases southward and with terrain elevation, and shows a strong seasonality with a dry summer and with five months (May–September) concentrating about 80–90% of the total annual precipitation.

The seasonal and latitudinal variations in the near-surface air temperature pattern are modified by the regional and local topography. On average, the annual minimum (maximum) temperatures at coastal stations can be 2–4ºC warmer (3–7ºC colder) than those of the central valley. Very few weather stations are available in the central Andes of Chile for assessing air temperatures at high elevations. At Farellones, a ski resort located at 33º21′S, 70º18′W, 2570 m a.s.l., the minimum (maximum) monthly mean temperature ranges on average between 8.0ºC (19.1ºC) in January and –1.2ºC (6.6ºC) in July. This is about 4ºC (10ºC) colder than the temperatures recorded in winter (summer) in the central valley, at an average altitude of 600 m a.s.l.

Copyright © 2005 IAHS Press

TEMPERATURE TRENDS

On average, mean surface air temperatures from instrumental records from Southern Hemisphere stations show an increment of about 0.3–0.6ºC during the last century and about 0.2–0.3ºC since the mid-1970s (IPCC, 2001). The poor quality of the instrumental data for South America during the first part of the 20th century hampers the analysis of temperature trends because of discontinuities and inhomogeneities due to observational gaps and errors, and also due to sensor and/or location changes, information which is frequently undocumented. Some Chilean weather stations deployed after 1950 also show the above shortcomings (Rosenblüth *et al*., 1997).

The study of Rosenblüth *et al*. (1997) showed an overall statistically significant warming of about 2.8ºC since the end of the 19th century to the end of the 20th century in central Chile. However, this warming trend has not been linear, but instead it shows periods of cooling such as the one recorded from the 1930s until the mid-1960s. The warming trend is also strongly influenced by the El Niño Southern Oscillation (ENSO) events, which explains part of the variance of the annual temperature anomalies, mainly in the central-northern part of Chile (Rosenblüth *et al*., 1997).

Figure 1 shows the mean annual extreme (minimum and maximum) temperature anomalies from 1961 to 2001 for six stations located along the coast and along the central valley, which belong to the Chilean Weather Service (*Dirección Meteorológica de Chile*). There are no missing data during the period. The anomalies were constructed using the annual standard anomalies (with respect to the 1961–1990 period) for each station upon which an exponential smoothing was applied for filtering the interannual variability (Rosenblüth *et al.* 1997; Carrasco *et al*., 2002), given by:

$$y_t = cx_t + (1-c)y_{t-1} \qquad t = 2, 3, ..., n \tag{1}$$

$$z_t = cy_t + (1-c)z_{t+1} \qquad t = (n-1), (n-2), ..., 1 \tag{2}$$

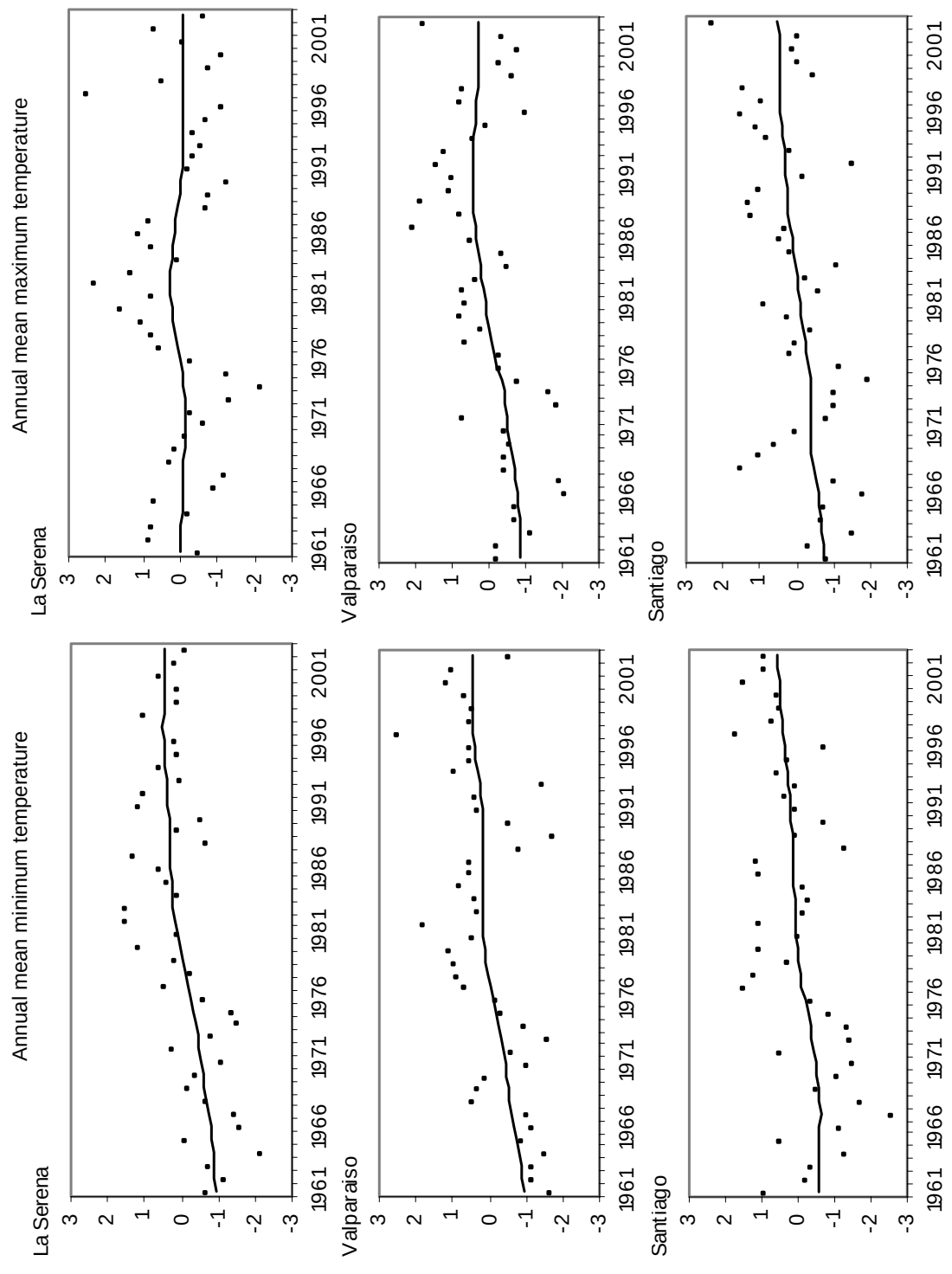
where equations (1) and (2) are, respectively, the first forward and second backward smoothing. The first value y_t is the average of the first five years of the series and z_t corresponds to the final value of the first smoothing. The degree of smoothing (c), which ranges from 1 (maximum) to 0, used here is 0.11, which filters out the interannual variability but preserves the long-term behaviour.

An overall warming of 1.3–2.1ºC (0.2–1.5ºC) occurred in central Chile in minimum (maximum) near-surface air temperature during the 40-year period from 1961 to 2001. This reveals that the temperature increase observed until 1992 by Rosenblüth *et al.* (1997) continued thereafter, but with a more moderate warming during the last 20–25 years. In fact, all the temperature series from Fig. 1 show a change from negative to positive anomalies around 1976/77, which coincides with the change in the Southern Oscillation regime that took place in the Pacific Ocean during that period (Giese *et al*., 2002). Note that, if one filters the 1976/77 shift, the temperature trend prior to and after 1976 is approximately zero.

PRECIPITATION TRENDS

Table 1 lists all the stations with precipitation data for the last 70–100 years in central Chile. Monthly row data were available for this study with some missing data.

Copyright © 2005 IAHS Press



Copyright © 2005 IAHS Press

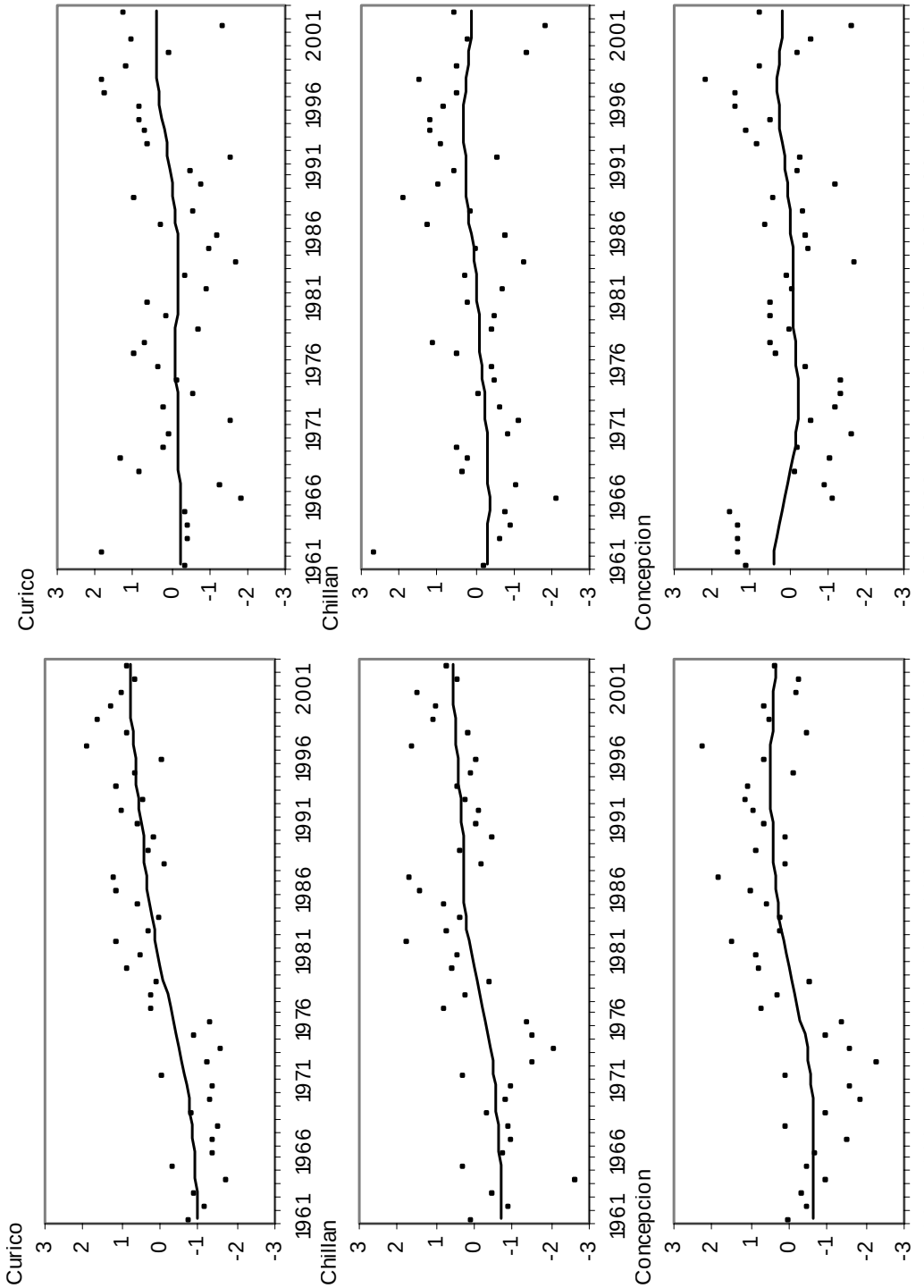


Fig. 1 Annual standard anomalies (solid squares) and exponential smoothing filter (solid lines, Rosenblüth *et al.* 1997) of the mean minimum (left panels) and maximum (right panels) air temperatures for selected stations in central Chile for the 1961–2003 period.

Copyright © 2005 IAHS Press

Table 1 List of raingauge stations with long time series for central Chile, indicating geographical location and available period as used in Fig. 3. The stations used in Fig. 2 are indicated in bold.

Station	Latitude (ºS)	Longitude (ºW)	Elevation (m a.s.l.)	Period
La Serena	**29.90**	**71.20**	**142**	**1900–2000**
Vicuña	30.03	70.73	650	1930–2000
Combarbalá	31.18	71.03	904	1930–2000
Illapel	31.60	71.18	350	1930–2000
Puerto Oscuro	31.42	71.58	140	1930–2000
La Ligua	32.45	71.27	58	1930–2000
San Felipe	32.75	70.68	650	1930–2000
Limache	33.02	71.30	120	1930–2000
Valparaíso	**33.02**	**71.63**	**41**	**1900–2000**
Quilpué	33.07	71.47	101	1930–2000
Santiago	33.45	70.70	520	1900–2000
La Obra	33.58	70.50	799	1930–2000
Queltehues	33.82	70.20	1365	1930–2000
Aculeo Pintue	33.88	70.92	355	1930–2000
Sitio K. Barahona	34.12	70.52	1672	1930–2000
Coya	34.20	70.55	785	1930–2000
Pumanque	34.62	71.67	785	1930–2000
Lolol	34.75	71.67	170	1930–2000
Curicó	34.98	71.23	225	1930–2000
Linares	35.83	71.60	157	1930–2000
Cauquenes	35.97	72.33	142	1930–2000
Parral	36.15	71.83	170	1930–2000
Bullileo	36.28	71.46	600	1930–2000
San Carlos	36.42	71.95	172	1930–2000
Chillán	36.60	72.43	124	1930–2000
Bulnes	36.75	72.32	83	1930–2000
Concepción	**36.83**	**73.03**	**12**	**1900–2000**

Homogeneity tests and gap filling were applied to the precipitation series following Alexandersson (1986). One-hundred-year precipitation records in central Chile are available only for La Serena, Valparaíso, Santiago and Concepción (see Table 1). Figure 2 shows the precipitation behaviour in central Chile during the last century, based on these stations. Large interannual variability can be observed for each individual series. Previous studies have shown that this variability is related to ENSO events, with above (below) normal precipitation in central Chile being likely to occur during the warm (cold) phase of El Niño (Aceituno, 1988; Rutllant & Fuenzalida, 1991). Applying the exponential smoothing for filtering the interannual variability, the decadal behaviour of the precipitation regime is obtained for the region. This large-scale variability can be associated with the Pacific Decadal Oscillation (PDO, referred to also as Interdecadal Pacific Oscillation) where the above (below) normal precipitation concurs with the positive (negative) phase of the PDO (Montecinos & Aceituno, 2003; Quintana, 2004).

A linear regression applied to the smoothed precipitation series of the four stations with long-record data (1900–2000) available in central Chile reveals the secular behaviour characterized by an overall decrease (Figs 2 and 3(a)), which is statistically significant at 95% (applying a Monte Carlo test), except for Santiago station. However, analysis for both the 1950–2000 and 1970–2000 periods shows a slight

Copyright © 2005 IAHS Press

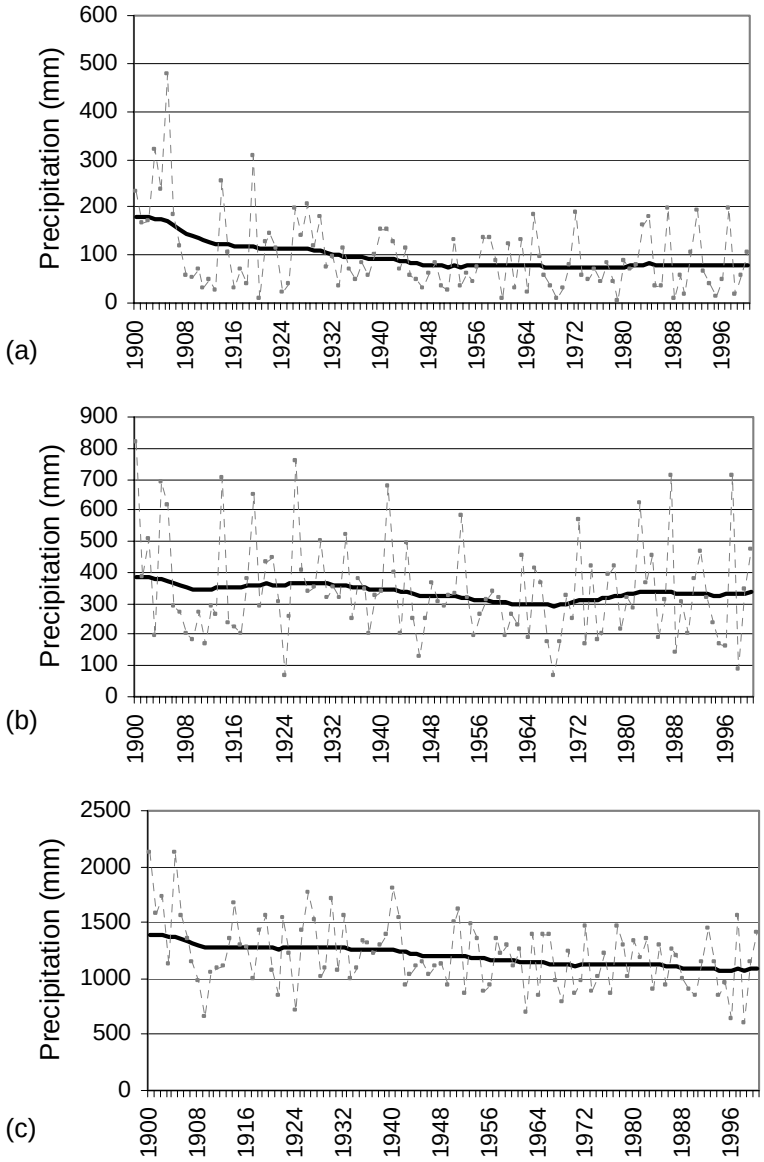


Fig. 2 Precipitation behaviour during the 20th century at (a) La Serena, (b) Valparaíso and (c) Concepción stations. Dashed lines correspond to annual precipitation and variability, while the solid black lines refer to the long-term behaviour after applying an exponential smoothing filter following Rosenblüth *et al.* (1997).

increase in precipitation that took place northward of 34ºS and 33ºS, respectively (Fig. 3(b) and (c)), although the increase is not statistically significant. On the other hand, analysis of the daily precipitation in central Chile indicates that the annual precipitation days have decreased from 1970 onward. Therefore, the precipitation events have become less frequent but more intense toward the end of the last century.

The positive trend during the last 30–50 years is highly influenced by the increased activity of ENSO events (intensity and frequency) that took place after the climate shift observed during the mid-1970s, due to the presence of the positive phase of the PDO during the last quarter of the 20th century (Giese *et al.*, 2002). South of 34ºS a precipitation decrease is observed, although not statistically significant.

Copyright © 2005 IAHS Press

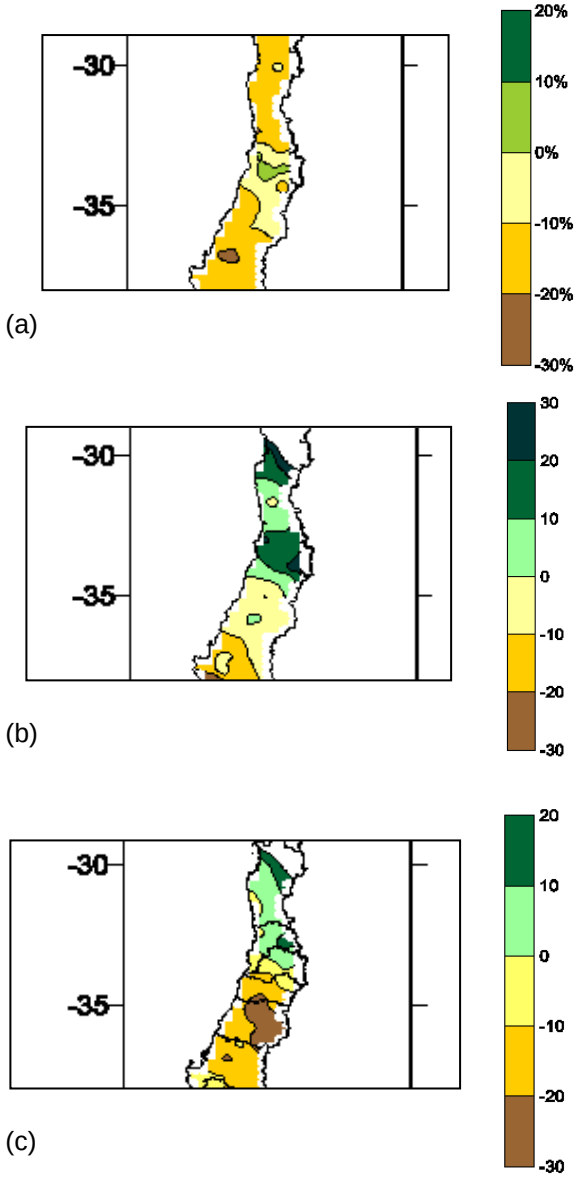


Fig. 3 Percentage of precipitation change in central Chile over the (a) 1900–2000, (b) 1950–2000 and (c) 1970–2000 periods, using all stations listed in Table 1.

ZERO ISOTHERM ALTITUDE BEHAVIOUR

Figure 4 shows the mean annual and seasonal (summer and winter) behaviour of the zero isotherm altitude (ZIA) as derived from the daily vertical profile from the radiosonde information at Quintero station at 12:00 UTC (universal time coordinate) from 1975 onward. Only few and random days were missing, so monthly averages could be calculated for the entire period. It is assumed that, for a long-term average and above the boundary layer, the upper-level data have a horizontal representation of at least ~150 km around the radiosonde station. The new location of the launched station Santo Domingo is within this radius, so the last two and a half years were directly used in this study. An exponential filter was applied for smoothing the

Copyright © 2005 IAHS Press

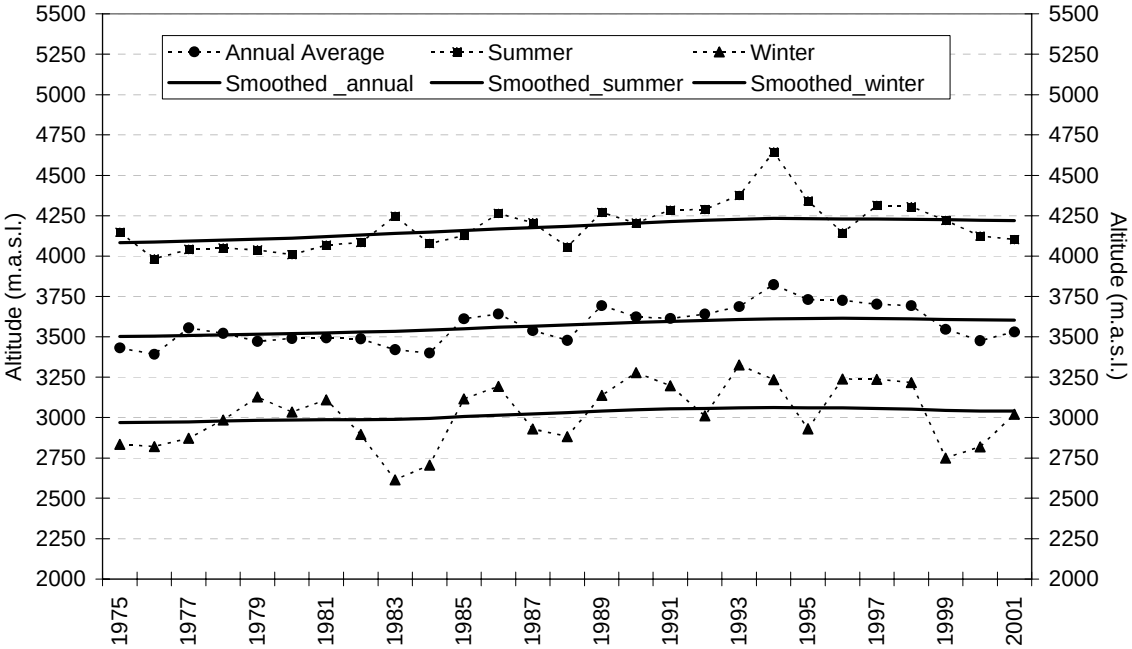


Fig. 4 Annual (•), winter (▲) and summer (■) mean of the altitude of the 0°C air temperature (ZIA) in central Chile as derived directly from the radiosonde data at Quintero station. Lines across the annual and seasonal data correspond to the secular trends after applying an exponential filter (Rosenblüth *et al.*, 1997).

interannual variability in order to detect more clearly the secular tendency of the ZIA in the last quarter of the 20th century. A linear trend over the filtered curve reveals that the annual ZIA increased 152 ± 4 m during the period, with an increase of 200 ± 6 m during the summer and 122 ± 8 m during the winter. However, the seasonal and annual data suggest that the positive trend was interrupted at the beginning of the 1990s (Fig. 4). This behaviour concurs with the stable condition or negative trends that have been observed in surface temperature records during recent decades. Also, analysing the behaviour of the ZIA, taking into account only the days with precipitation in central Chile, a slight increase of only 12 m was found during the same period. This is an indication that the observed warming has occurred mainly during days with no precipitation. It can also be inferred that, on average, the area affected by snow precipitation in the central Andes of Chile has not changed substantially. On the other hand, the ZIA trend during the period suggests enhanced snow melt during periods with no precipitation, for example after the occurrence of frontal systems.

The ZIA and precipitation profiles along a north–south transect from 30 to 38ºS is shown in Fig. 5. The mean annual precipitation amount is also plotted along a latitudinal transect from 30 to 38ºS (Fig. 5), being determined using all the raingauge stations with available data for the 1961–1990 period (approx. 260 stations). Most of the surface stations are located in the central valley and only a few of them are above 1200 m a.s.l. A latitudinal gradient of the mean annual precipitation at 2500 m a.s.l. was obtained by first calculating the altitudinal variation of the precipitation for each one degree of latitude using the weather stations within the latitudinal belt of ±0.5 degrees, and secondly by extrapolating the amount of precipitation at 2500 m a.s.l. at each degree of latitude. The discrete mean values, plotted in Fig. 5, were then used to

Copyright © 2005 IAHS Press

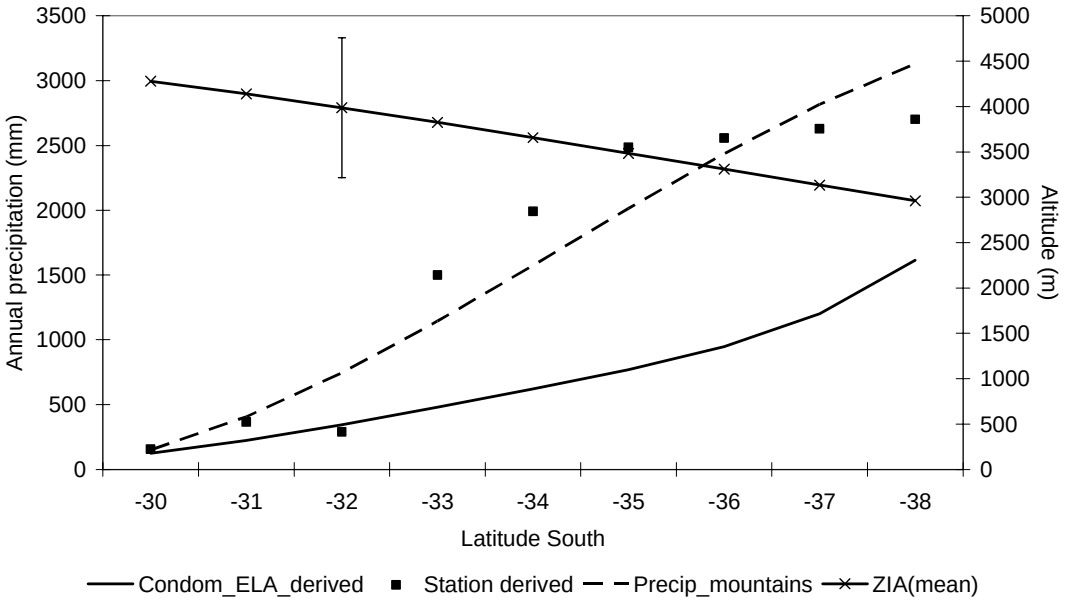


Fig. 5 Latitudinal gradient of the present-day ZIA in central Chile (thick line with crosses), as derived from radiosonde data at Antofagasta, Quintero, Puerto Montt and Punta Arenas ($ZIA_{(mean)}$, see equation (4)). The vertical bar is the +1 and –1 standard deviation at Quintero station. Black squares refer to the derived mean annual precipitation data for every one degree of latitude at 2500 m a.s.l. in Chile. The thin dashed line (P_{2500}) is the empirical latitudinal gradient fix to the annual precipitation at 2500 m a.s.l. (equation (3)). The lower thick line is the latitudinal gradient of precipitation as derived from the ELA using Condom's expression (2002).

find a polynomial expression (equation (3)) that represents the latitudinal profile of the mountain precipitation (P) in central Chile, using as a reference the 2500 m altitude:

$$P = -4.1494L^3 + 427.4L^2 - 14234L + 154544 \quad (3)$$

where P is expressed in mm year^{-1} and L is the latitude in degrees from 30 to 38ºS.

In order to assess the latitudinal gradient of the ZIA, radiosonde data of Antofagasta (23º26′, 70º26′, 135 m a.s.l.), Puerto Montt (41º26′S, 73º07′W, 81 m a.s.l.) and Punta Arenas (53º00′S, 70º58′W, 37 m a.s.l.) were analysed along with those from Quintero station. The daily ZIA data at these stations were averaged over the 10-year period, 1990–1999, to obtain at each radiosonde station the annual mean altitude of the zero degree isotherm. The four ZIAs derived at these locations were used to find an empirical expression (equation (4)) for obtaining the mean latitudinal variation of the annual ZIA in Chile from 22 to 57ºS:

$$ZIA_{(mean)} = -9.1\times10^{-3}L^4 - 1.6212L^3 - 104.37L^2 - 2734.2L - 20219.0 \quad (4)$$

where L is the latitude in degrees, which varies from 23 to 53º and $ZIA_{(mean)}$ is expressed in m a.s.l.

Figure 6 shows the latitudinal variation of the ZIA for central Chile according to equation (4). It can be seen that the ZIA decreases southward from ~4200 m a.s.l. at 30ºS to ~3000 m a.s.l. at 38ºS. According to data from Quintero, the ±1 standard deviation is ~770 m, with higher annual variability in southern latitudes as a result of more frequent frontal activity in this region (south of 36ºS).

Copyright © 2005 IAHS Press

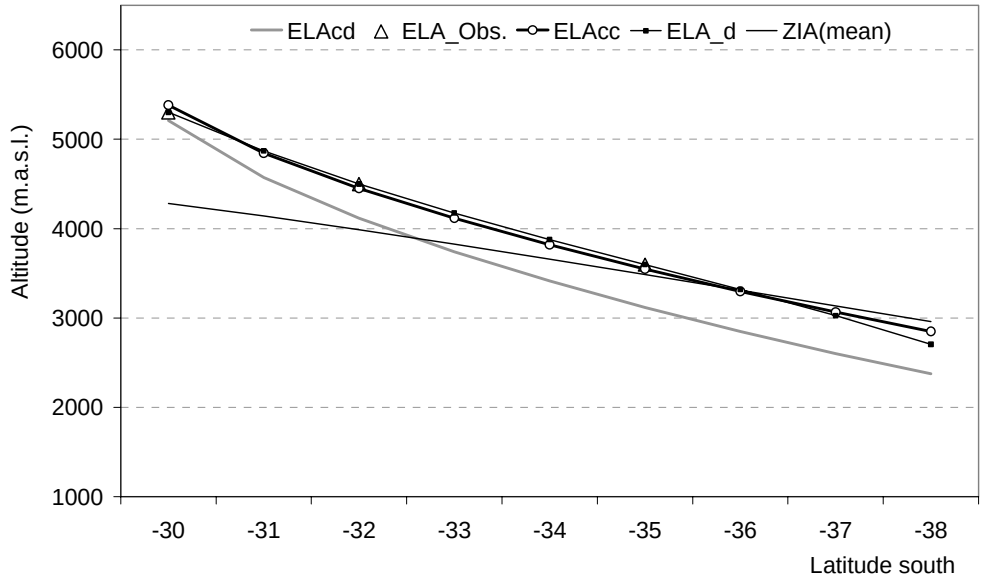


Fig. 6 The grey line is the mean annual latitudinal gradient of the ELA obtained using Fox's expression (1993) (ELA_{cd}), while the line with open circles is the ELA obtained using a new expression for central Chile (ELA_{cc}, equation (7)). Open triangles represent ELA data obtained from different field studies (*ELA_Obs.*, Table 2). The black line with small squares is the empirical adjustment of the ELA formula to the field data (ELA_d, equation (6)). The thin line is the calculated $ZIA_{(mean)}$ according to equation (4).

EQUILIBRIUM LINE ALTITUDE BEHAVIOUR

Glacier advances and retreats are largely influenced by the regional and local air temperature and precipitation behaviour, which control the extent and mass balance of the area of accumulation in the upper zones and the area of ablation in the lower zones. In other words, these two atmospheric variables determine the equilibrium line altitude (ELA), which corresponds to the altitude where the annually-integrated mass balance is zero, and is approximately equivalent to the glacier snowline at the end of the summer. The ELA and snowline data in Chile are scarce and normally unreliable. An empirical relationship was used for deriving the ELA based on the annual mean ZIA along with the annual accumulation precipitation data (equation (5)) using the expression derived by Condom (2002), from the relationship between snowline altitude and precipitation established by Fox (1993**.** These expressions were originally derived to estimate the ELA over the Altiplano in the Andes of Peru and Bolivia. As a first approximation, the original expression of Fox and Condom (ELA_{cd}) is used, without any adjustment for central Chile:

$$ELA_{cd} = 3427 - 1148 \times \log(P) + ZIA \quad (5)$$

where P is annual precipitation in mm, ZIA is in m a.s.l. and ELA_{cd} is in m a.s.l.

Figure 6 shows the latitudinal gradient of the ELA as calculated at each degree of latitude using equations (4) and (5). This result was compared with the ELA information (*ELA_Obs.*) obtained from available field data (Table 2). Overall, the concurrent empirically calculated ELA values (equation (5)) are 100–700 m lower than those obtained from field data (Table 2), with a mean difference of 375 ± 124 m (see

Copyright © 2005 IAHS Press

Table 2 List of available ELA data (*ELA_Obs.*) in the central Chilean Andes.

Glacier	*ELA* (m)	Latitude (S)	Longitude (W)	Reference
-	5900	27º00′	-	Hastenrath (1971)
-	5300	30º00′	-	Hastenrath (1971)
-	4500	32º00′	-	Hastenrath (1971)
Palomo	3596*	34º14′	70º08′	(Lequesne, personal communication)
Cipreses	3559*	34º15′	70º30′	(Lequesne, personal communication)
Cortaderal	3740*	34º16′	70º08′	(Lequesne, personal communication)
Universidad	3497*	34º18′	70º17′	(Lequesne, personal communication)
Mocho	1920†	39º23′	-	Calculated by Rivera *et al*. (in press).

* measured during the year 2000 from aerial photographs.
† calculated for 2003–2004 based on field data.

Fig. 6). Therefore, the observed field ELA data were used to obtain a polynomial expression that describes a latitudinal ELA profile (ELA_d, equation (6)) valid for central Chile:

$$ELA_d = -2.4233L^3 + 254.93L^2 - 9216.8L + 117796 \quad (6)$$

where L is the latitude in degrees from 30º to 38ºS.

A new Fox-Condom type expression for the ELA was derived using the latitudinal precipitation expression of equation (3) and the ELA gradient of equation (6). For this, a linear relationship was found (R^2 = 0.97) between the snowline normalized altitude ($ELA_d - ZIA$) as defined by Fox (1993) and the logarithm of the precipitation at 2500 m a.s.l. The result is an empirical expression (equation (7)) for the ELA in central Chile (ELA_{cc}) valid between 30 and 38ºS:

$$ELA_{cc} = 3104.9 - 920.24\log(P) + ZIA_{(\text{mean})} \quad (7)$$

where P is the annual precipitation at 2500 m a.s.l. and $ZIA_{(\text{mean})}$ is obtained from equation (4).

It can be noted by comparing Figs 5 and 6 that ELA_{cc} is above (below) the ZIA northward (southward) of 36ºS. According with the latitudinal precipitation gradient, southward from 36ºS the annual accumulation is greater than 2300 mm year^{-1}.

ANALYSIS OF RECENT PAST AND PROJECTIONS OF FUTURE CHANGES

The recent behaviour of the near-surface air temperature and precipitation trends as described in the previous section should force changes in ice/snow bodies in the central Andes of Chile. Glaciers are strongly sensitive to climate variations, but their behaviour also depends upon local factors, such as the geometry of the valley, existence of a calving front, thickness and type of detritic material covering the glacier, hypsometry of the glacier basin, geothermal heating and ice dynamic factors.

The glacier response to climatic variations in the Chilean central Andes has shown a significant frontal retreat during the last four decades, as well as an important areal reduction and thinning (Rivera *et al*., 2002). This is believed to be a response to

Copyright © 2005 IAHS Press

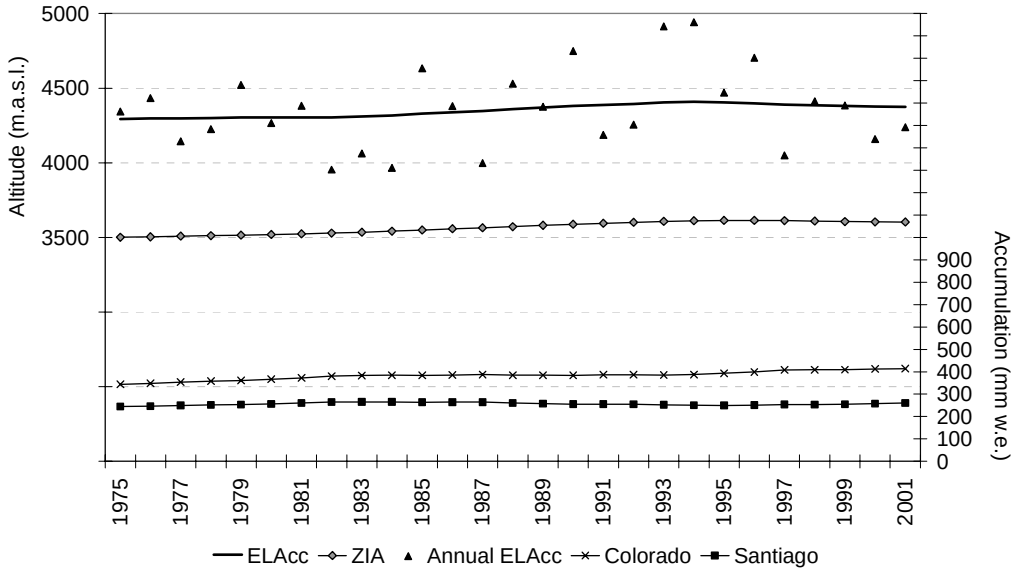


Fig. 7 Values of ELA_{cc} derived using equation (7). The black line across them is the secular trend after applying an exponential filter (Rosenblüth *et al.*, 1997) for smoothing the interannual variability. The ZIA values are the annually-smoothed ZIA values from Quintero station. Colorado (33º21′S, 2280 m a.s.l.) and Santiago (33º45′S, 520 m a.s.l.) are the respective annually-smoothed precipitation data.

atmospheric warming, the secular decrease in the amount of total annual precipitation and the subsequent increase in the elevation of the snowline in the region.

Analysis of the air temperature indicates that in central Chile, there has been a significant mean warming of 1.3ºC during the last 40 years, although no significant changes in precipitation have been observed in the same period. Calculating the ELA_{cc} during the 27-year period from equation (7), using the annual ZIA at Quintero and the precipitation at Colorado station (33º21′S, 2280 m a.s.l.), it is found that the ELA_{cc} rose 127 m in the period (Fig. 7), i.e. ~25 m less than the annual ZIA.

For examining future changes, one can make some projections of the expected ZIA and ELA trends in the central Chilean Andes, using the present-day latitudinal ZIA and ELA_{cc} gradients obtained here together with the future IPCC scenarios (IPCC, 2001). For this, the precipitation and temperature predictions estimated for scenarios A2 and B2 were selected for the 2070–2100 period, at each degree of latitude between 30ºS and 38ºS. Scenario A2 describes a heterogeneous future world with increasing population, regional economic development and fragmented technological change. Scenario B2 describes a convergent future world with population peaking at mid-century, with global solution to economic, social and environmental sustainability (IPCC, 2001). Firstly, the changes in precipitation according to both scenarios were estimated. The amount of changes expected was subtracted from the present-day annual precipitation derived from ELA_{cc} data, since a decrease in precipitation is expected in central Chile. The result is a latitudinal precipitation gradient for future A2 and B2 scenarios.

Secondly, a future ZIA was obtained using the surface air temperature predicted for both scenarios A2 and B2 in Chile. From this information the increase of the ZIA was calculated obtaining the future latitudinal ZIA gradient for both A2 and B2

Copyright © 2005 IAHS Press

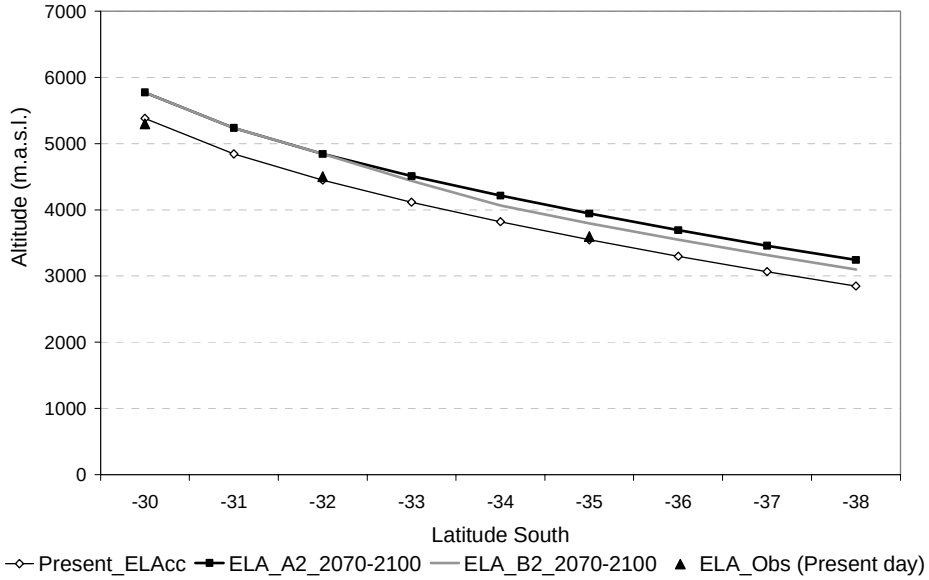


Fig. 8 Present-day latitudinal ELA_{cc} gradient (Present_ELAcc) along with the predicted latitudinal ELA gradient for scenarios A2 (ELA_A2_2070–2100) and B2 (ELA_A2_2070–2100). The *ELA_Obs*. data are present ELA data obtained from field observations (Table 2).

scenarios. Finally, using the precipitation and ZIA gradient obtained for scenarios A2 and B2, the future ELA was calculated using equation (7). The results indicate that the ELA could rise about 440 m (350 m) in central-south Chile for scenario A2 (B2) at the end of the 21st century (see Fig. 8).

To determine the influence of the air temperature increase and precipitation decrease on the ELA for future A2 and B2 scenarios, the ELA changes were evaluated under the hypothetical cases of changes due only to air temperature increase and due only to precipitation decrease. Results indicate that about 84% (88%) of the ELA increment for scenario A2 (B2) is due to air temperature increase. Therefore, this environmental parameter appears as the main factor for future rise of the ELA, rather than the decrease in precipitation.

FINAL REMARKS

A generalized retreat of glaciers has been documented in the central Chilean Andes. This can be a consequence of the impact of recent changes in atmospheric variables such as temperature and precipitation. Analysis of the available weather station data indicates a surface warming of 1.3ºC since the 1960s. During the last quarter of the 20th century, a slight increase in precipitation was observed from 34ºS (just south of Santiago) to the north, while southward of 34ºS an overall decrease has been taking place. This behaviour is probably due to the influence of ENSO which is stronger northward of 34ºS. The analysed period includes the 1976/77 climate shift, which is clearly observed in the warming of the air surface temperature and in the slight increase in precipitation in the last quarter of the 20th century. Using the radiosonde information, an increase in the elevation of the zero degree isotherm altitude at Quintero was also found.

Copyright © 2005 IAHS Press

It is concluded that the parameters of the Fox-Condom ELA expression derived for tropical latitudes is not applicable in central Chile. For this reason, the latitudinal precipitation derived at 2500 m a.s.l. and ZIA data from radiosonde stations were used to determine the ELA in central Chile for the 1975–2001 period. The results reveal an elevation of the ELA within the period. Because the precipitation has not significantly changed since the 1970s, it is concluded that the ELA has risen mainly due to temperature change in this period. Based on temperature data during precipitation events, no significant change has been occurring in the type of precipitation. In contrast, warming has concentrated during periods with no precipitation, pointing to an enhanced melting of glaciers. However, the number of events (days with precipitation) have decreased after the 1970s, indicating that precipitation events are becoming less frequent but more intense. This also suggests that glaciers are exposed to more days with atmospheric conditions appropriate for melting.

Projections using the A2 and B2 scenarios for the end of the 21st century indicate that ELA in central Chile (30–38ºS) will rise around 400 m compared to its present-day location, with a slightly higher change expected under scenario A2. Changes in air temperature rather than precipitation are projected to be the main contributor to the future rise of the ELA.

The observed glacier retreat in central Chile concurs with the increasing elevation of the ELA mainly as a result of atmospheric warming. In accordance with the predicted changes in ELA, one can expect that glaciers will continue to retreat during the 21st century under scenarios A2 or B2, or any other warming scenario. The magnitude of the ELA increment and therefore the glacier retreat is uncertain due to the uncertainty of the prediction. However, the possible impact on glacier recession in central Chile should be considered in future environmental and social evaluations.

Acknowledgements Project Fondecyt 1040989 is acknowledged. *Centro de Estudios Científicos* is a Millennium Science Institute and is funded in part by grants from Fundación Andes and the Tinker Foundation, with partial support from CMPC (*Compañia Manufacturera de Papeles y Cartones*). The authors also thank *Dirección Meteorológica de Chile* for supporting this study.

REFERENCES

Aceituno, P. (1988) On the functioning of the Southern Oscillation in the South American sector. Part I: surface climate. *Monthly Weather Rev.* **116**, 505–524.

Aceituno, P., Fuenzalida, H. & Rosenblüth, B. (1993) *Climate Along the Extratropical West Coast of South America* (ed. by H. A. Mooney, E. R. Fuentes & B. Kronberg), 61–69. Academic Press, San Diego, California, USA.

Alexandersson, H. (1986) A homogeneity test applied to precipitation data. *J. Climatol.* **6**, 661–675.

Carrasco, J. F., Casassa, G. & Rivera, A. (2002) Meteorological and climatological aspects of the Southern Patagonia Icefield, Patagonia. In: *The Patagonian Icefields: Unique Natural Laboratory for Environmental and Climate Change Studies* (ed. by G. Casassa, F. Sepúlveda & R. Sinclair) (Series of the Centro Estudios Científicos), 29–41. Kluwer Academic/Plenum Publishers, New York, USA.

Casassa, G. (1995) Glacier inventory in Chile: current status and recent glacier variations. *Ann. Glaciol.* **21**, 317–322.

Casassa, G., Rivera, A. Escobar, F. Acuña, C. Carrasco, J. & Quintana, J. (2003) Snow line rise in central Chile in recent decades and its correlation with climate. EGS-AGU-EUG Joint Assembly (Nice, France, 6–11 April 2003), EAE03-A-14395, CR8-1TH2O-007 CD-ROM. *Geophys. Res. Abstract* **5**, 14395.

Condom, T. H. (2002) Dynamiques d'extension lacustre et glaciaire associées aux modifications du climat dans les Andes Centrales. PhD Thesis, University of Paris VI-Pierre et Marie Curie, Paris, France.

Escobar, F., Casassa, G. & Pozo, V. (1995) Variaciones de un glaciar de montaña en los Andes de Chile central en las últimas dos décadas. *Bull. Inst. Fr. Etudes Andines* **24**(3), 683–695.

Copyright © 2005 IAHS Press

Fox, A. N. (1993) Snow-line altitude and climate in the Central Andes (5–22ºS) at present and during the late Pleistocene glacial maximum. PhD Thesis, Cornell University, Ithaca, New York, USA.

Giese, B. S., Urizar S. C. & Fuckar, N. S. (2002) Southern Hemisphere origins of the 1976 climate shift. *Geophys. Res. Lett.* **29**, 1014, DOI 10.1029/2001GL013268.

Hastenrath, S. (1971) On the Pleistocene snow-line depression in the arid regions of the South American Andes. *J. Glaciol.* **3**, 255–267.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2001) *Climate Change 2001: The Scientific Basis*. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the IPCC, Cambridge University Press, New York, USA.

Montecinos, A. & Aceituno, P (2003) Seasonality of the ENSO related rainfall variability in central Chile and associated circulation anomalies. *J. Climate* **16**, 281–296.

Quintana, J. (2004) Estudio de los factores que explican la variabilidad de la precipitación en Chile en escala de tiempo interdecadal (Study of the factors that explain the precipitation variability in Chile). MSc Thesis, Universidad de Chile, Santiago, Chile.

Rivera, A., Casassa, G. Acuña, C. & Lange, H. (2000) Variaciones recientes de glaciares en Chile (Recent glaciar variations in Chile). *Investigaciones Geográficas, Universidad de Chile* **34**, 29–60.

Rivera, A., Acuña, C., Casassa, G. & Bown, F. (2002) Use of remote sensing and field data to estimate the contribution of Chilean glaciers to the sea level rise. *Ann. Glaciol.* **34**, 367–372.

Rosenblüth, B., Fuenzalida, H. & Aceituno, P. (1997) Recent temperature variations in southern South America. *Int. J. Climatol.* **17**, 67–85.

Rutllant, J. & Fuenzalida, H. (1991) Synoptic aspects of the central Chile rainfall variability associated with the Southern Oscillation. *Int. J. Climatol.* **11**, 63–76.

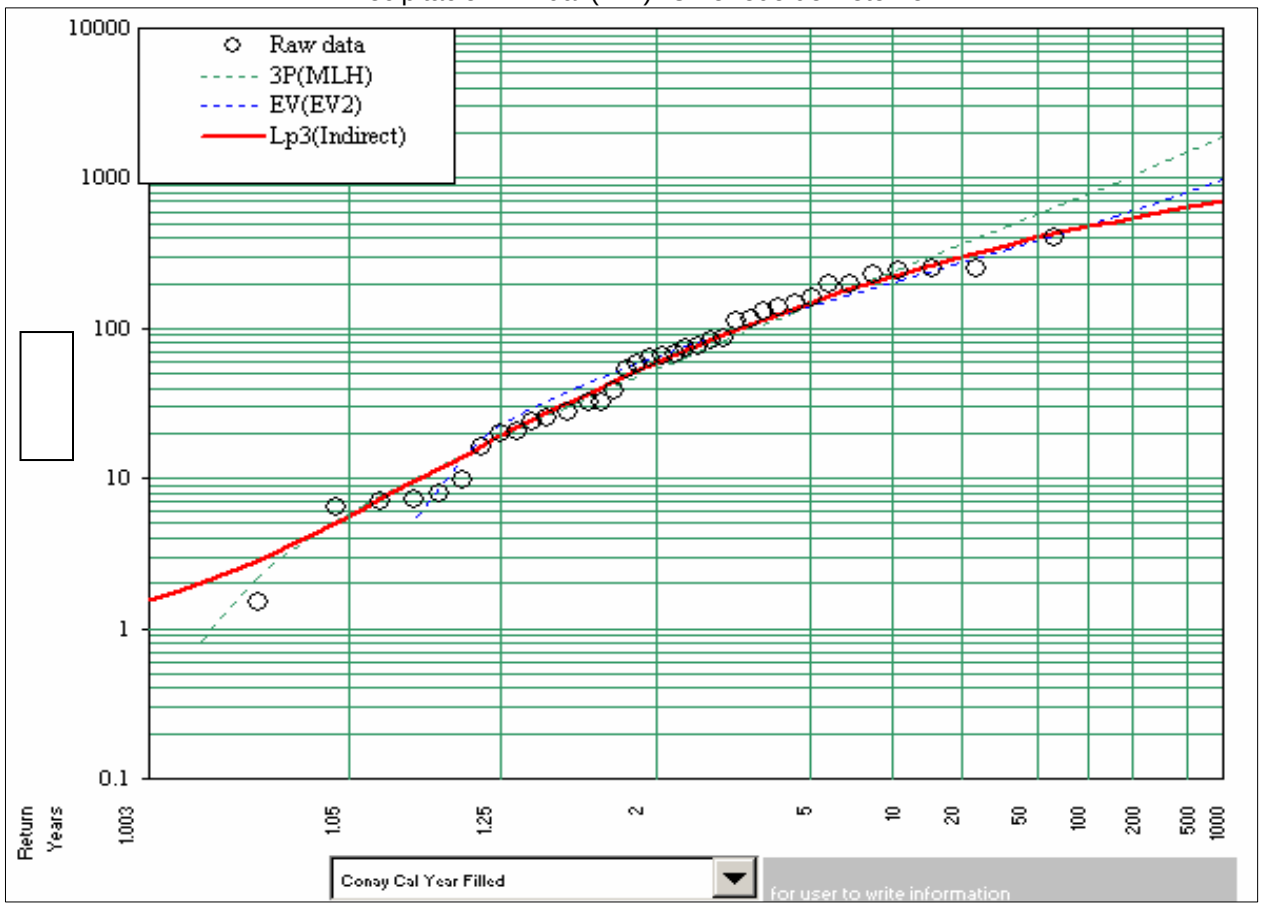
Received 17 November 2004; accepted 30 August 2005

Copyright © 2005 IAHS Press

GRÁFICOS DE PRECIPITACIÓN REGIONAL

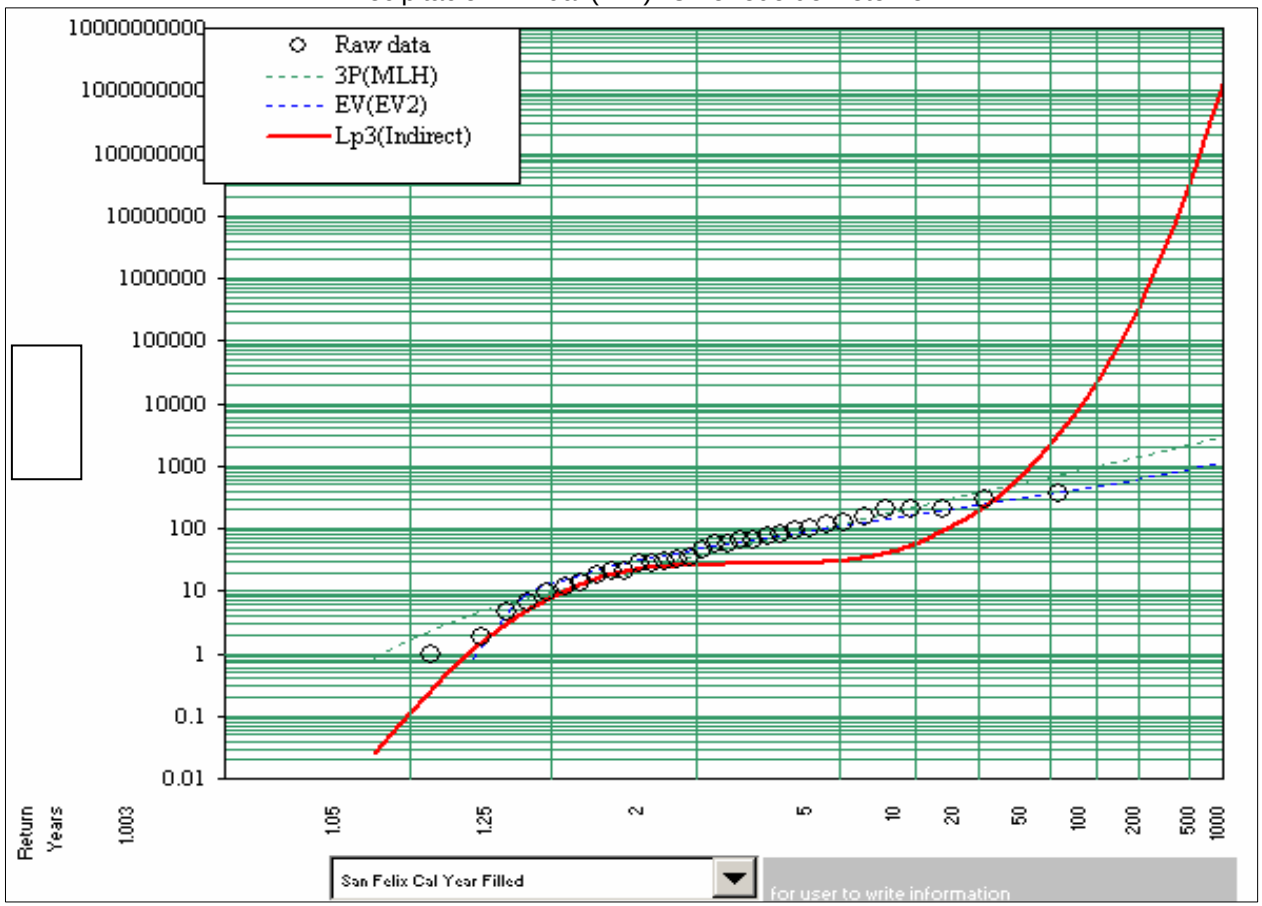
Estación Conay

Precipitación Annual (mm) vs Período de Retorno



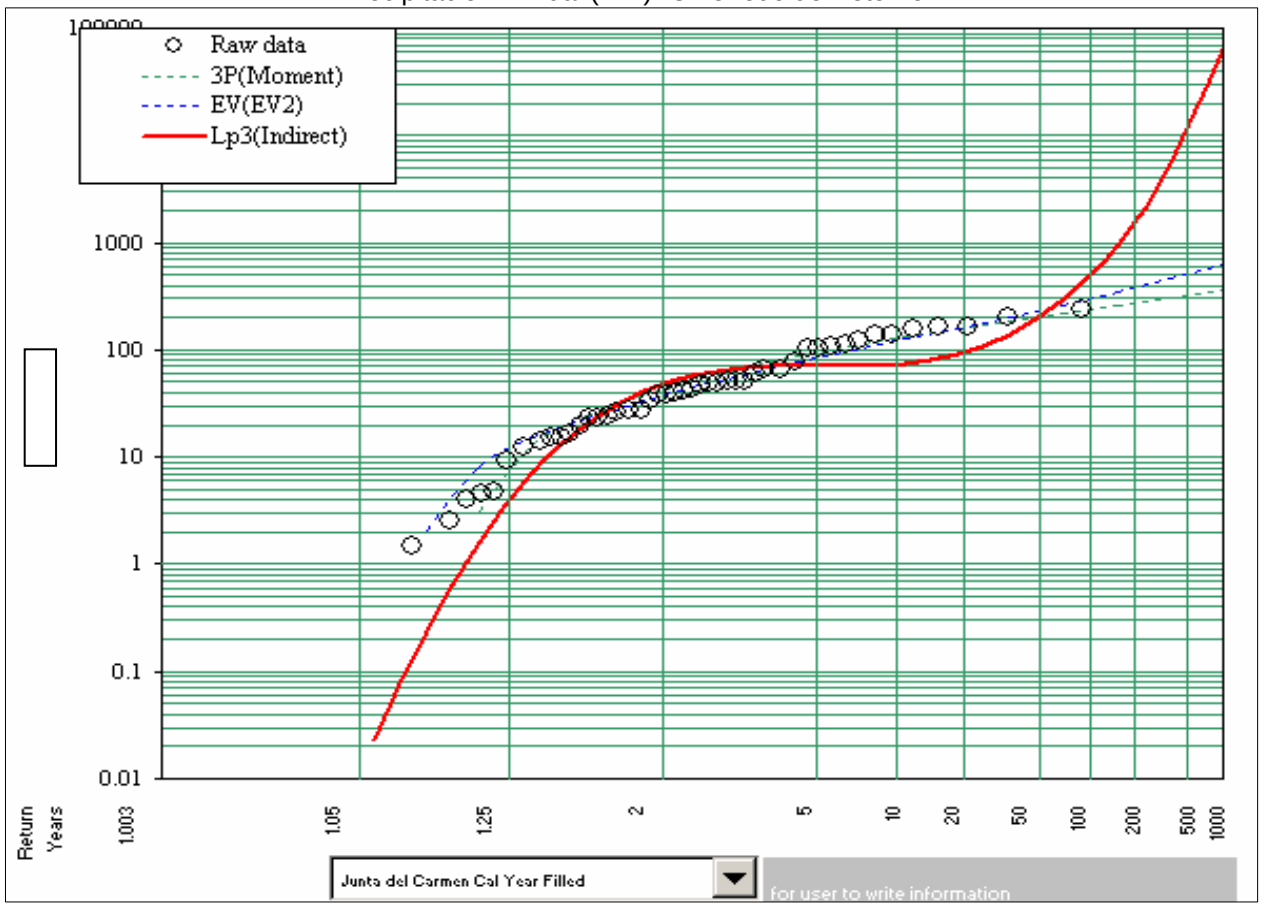
Estación San Félix

Precipitación Annual (mm) vs Período de Retorno



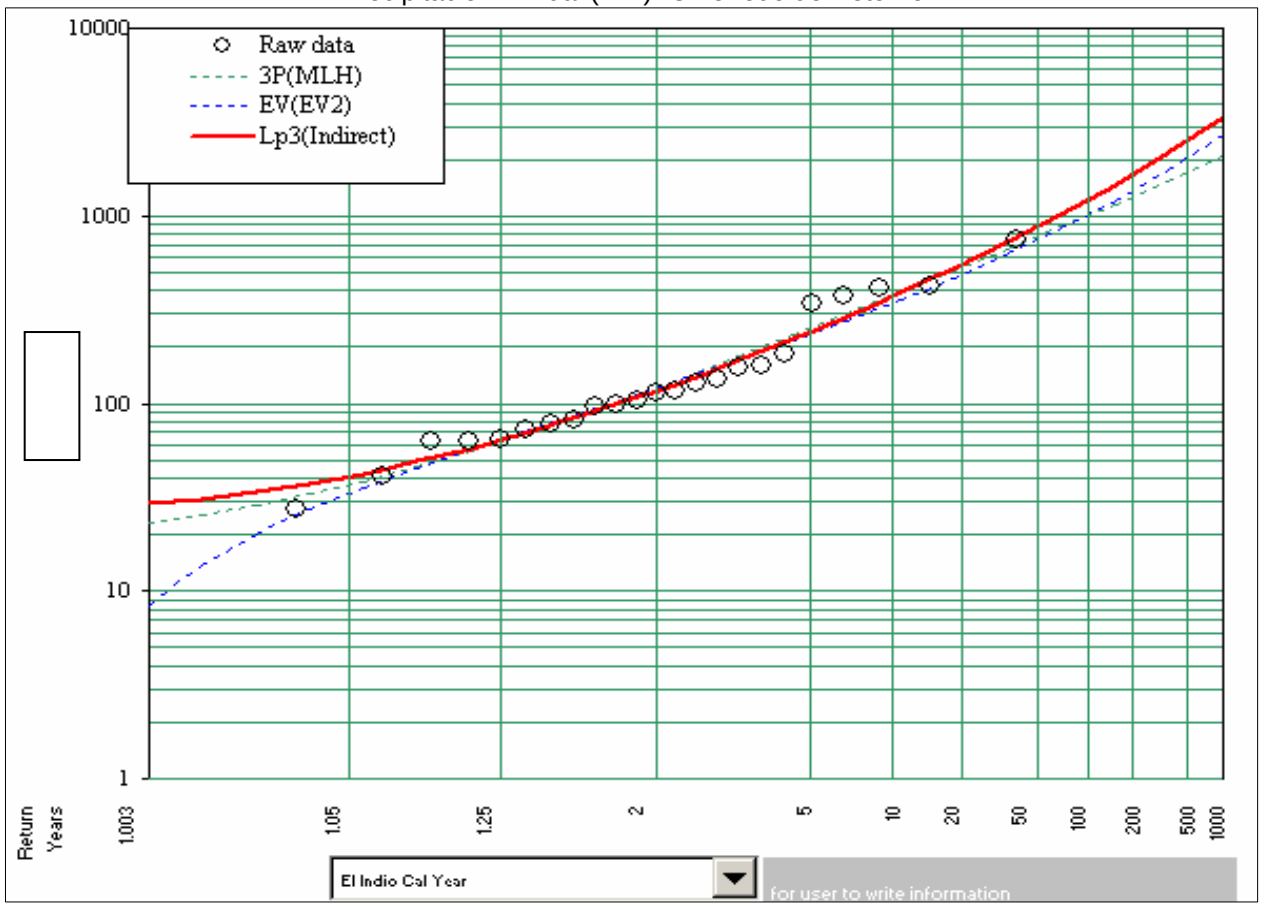
Estación Junta de Carmen

Precipitación Annual (mm) vs Período de Retorno



El Indio

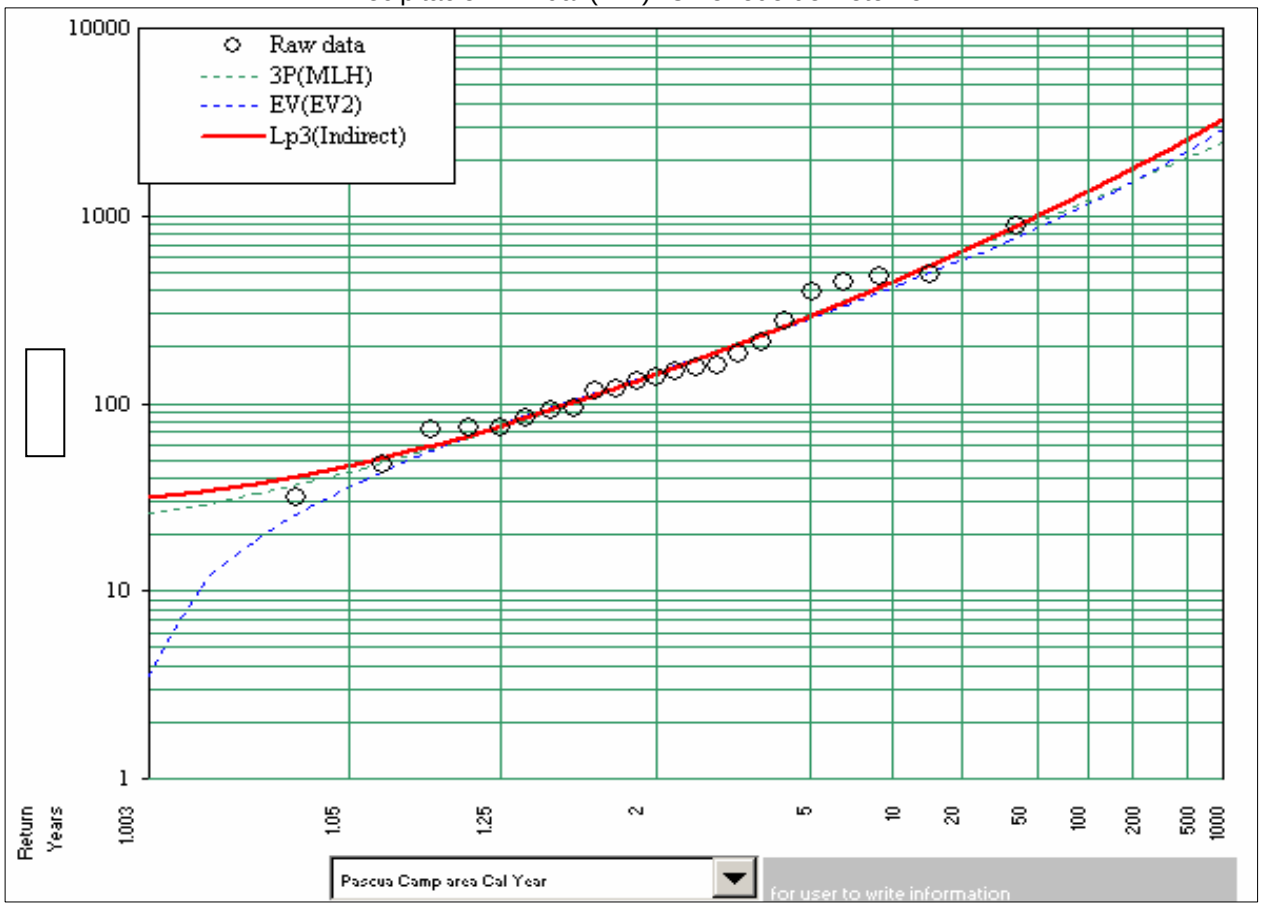
Precipitación Annual (mm) vs Período de Retorno



GRÁFICOS DE PRECIPITACIÓN PASCUA-LAMA

Campamento Pascua

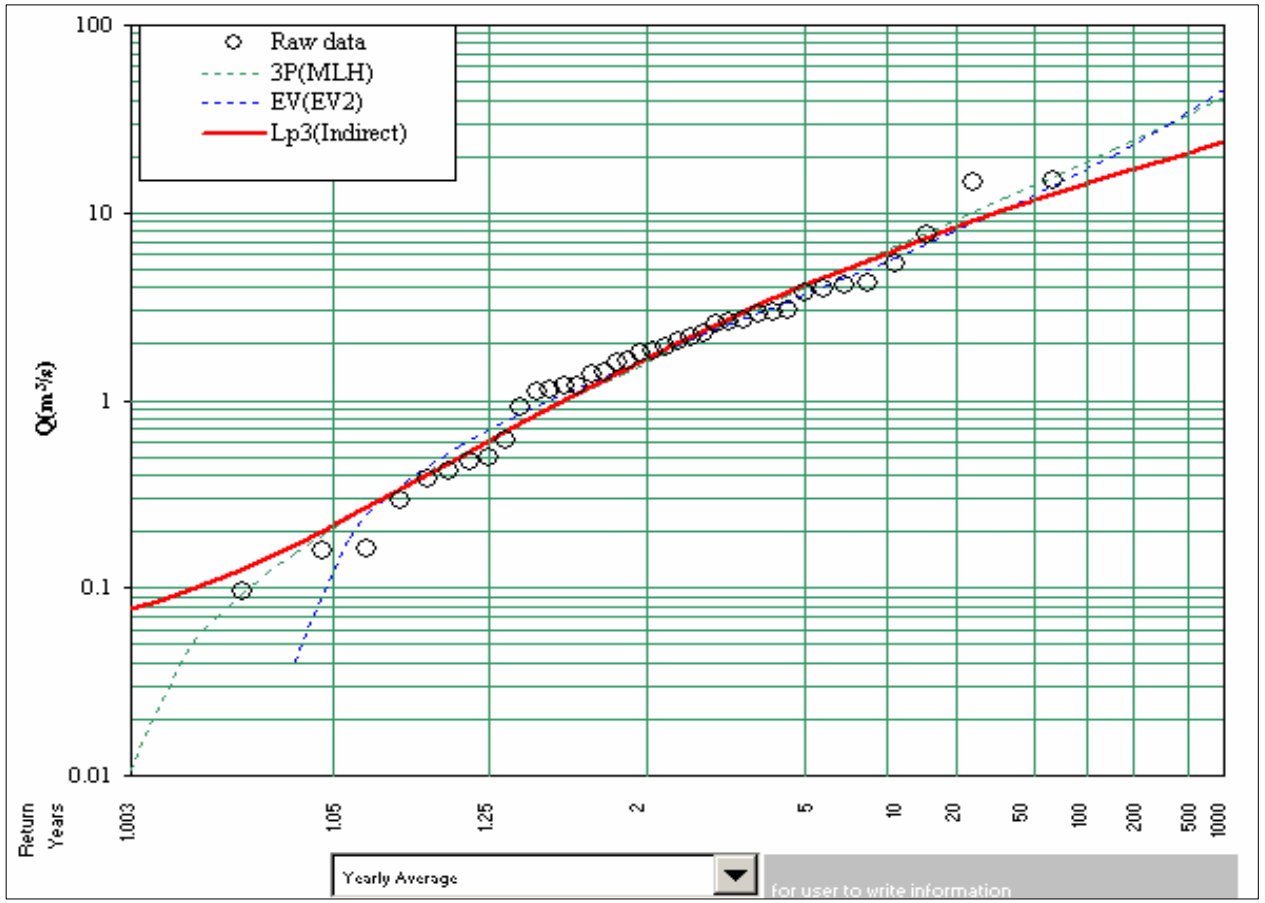
Precipitación Annual (mm) vs Período de Retorno



GRÁFICOS ANÁLISIS DE CAUDALES DE ESTACIONES REGIONALES

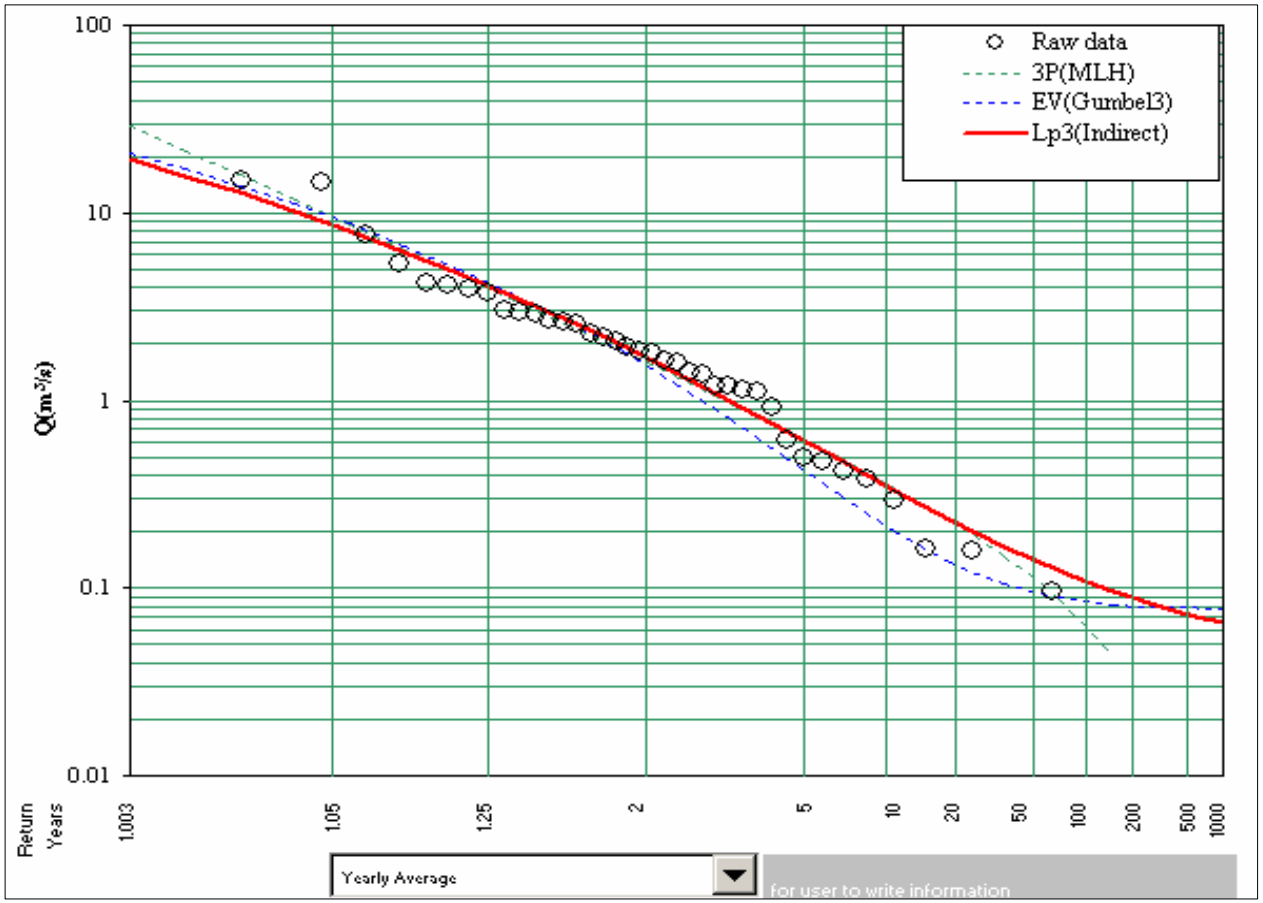
Rio del Carmen - Estación Corral - Caudal Alto

Caudal vs Período de Retorno - Promedio Anual



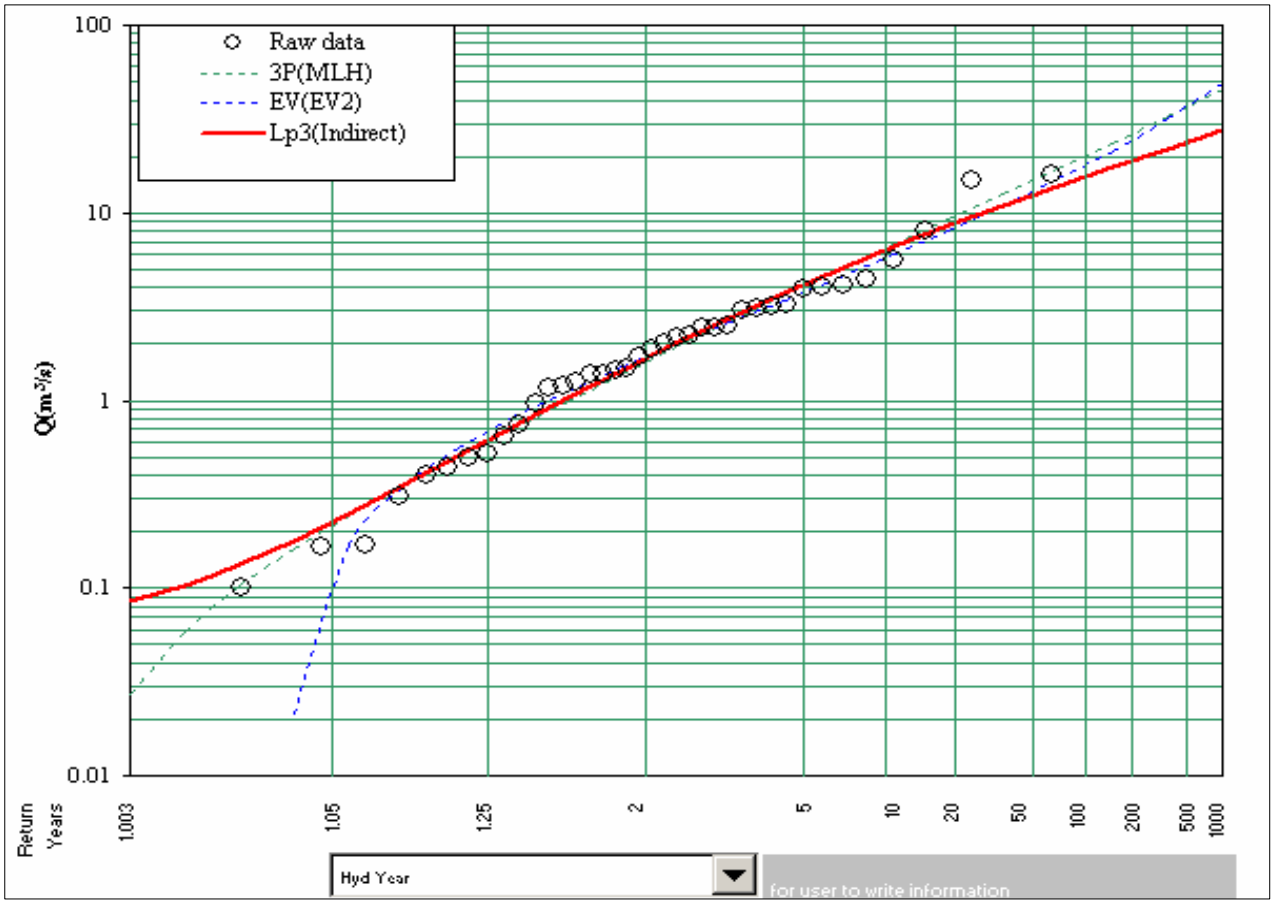
Rio del Carmen - Estación Corral - Caudal Bajo

Caudal vs Período de Retorno - Promedio Anual



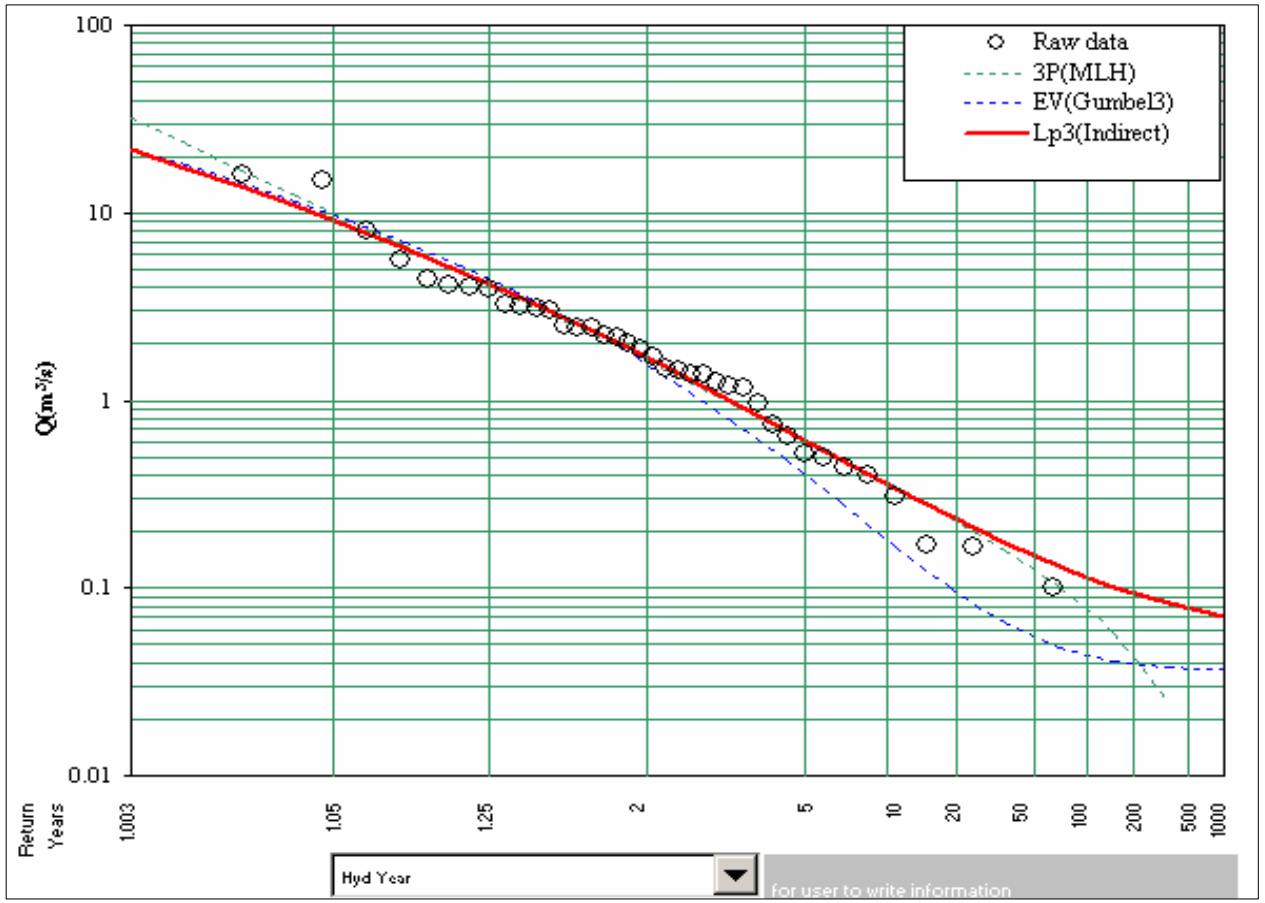
Estación Carmen San Félix / La Majada - Caudal Alto

Caudal vs Período de Retorno - Promedio Anual



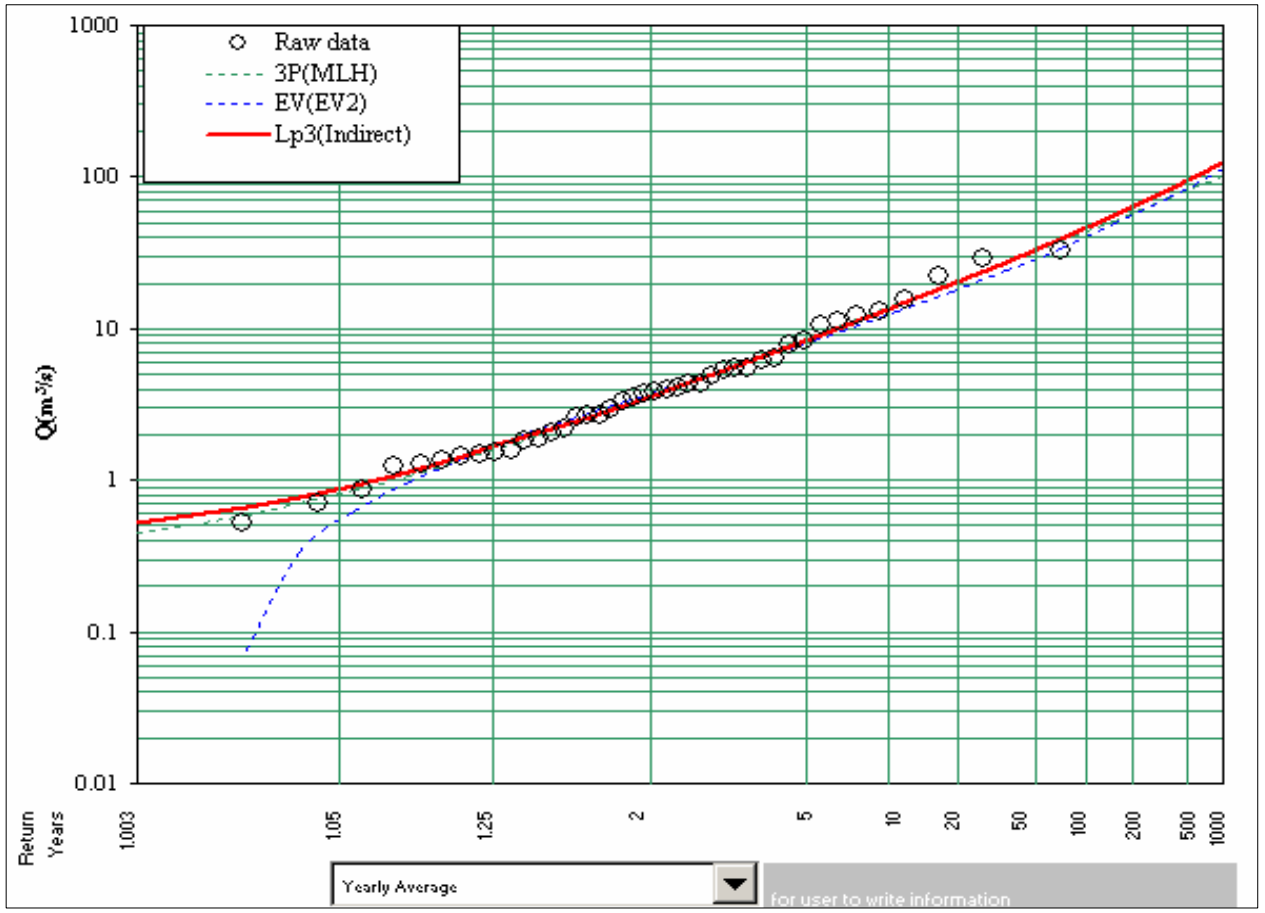
Estación Carmen San Félix / La Majada - Caudal Bajo

Caudal vs Período de Retorno - Promedio Anual



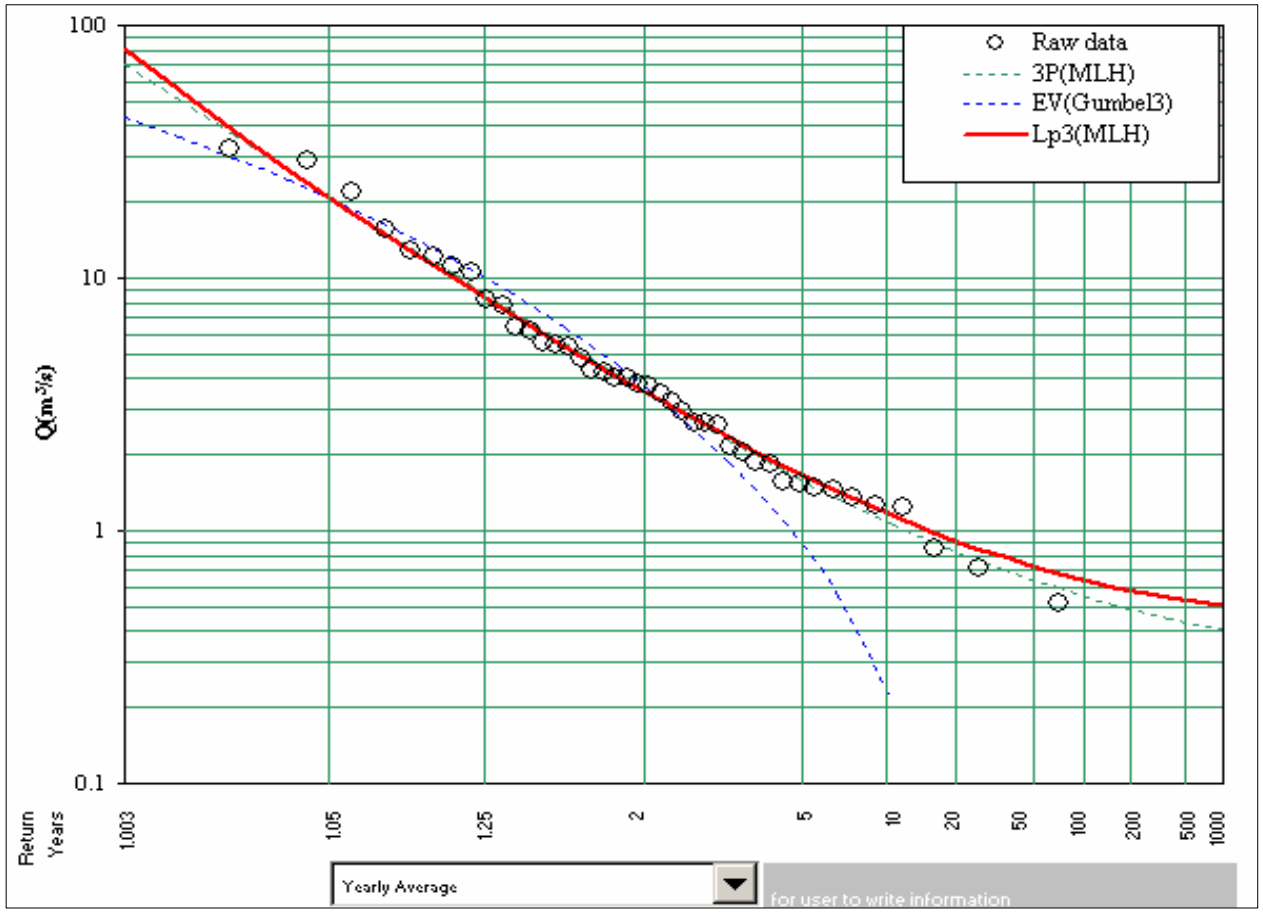
Estación Huasco en Santa Juana - Caudal Alto

Caudal vs Período de Retorno - Promedio Anual



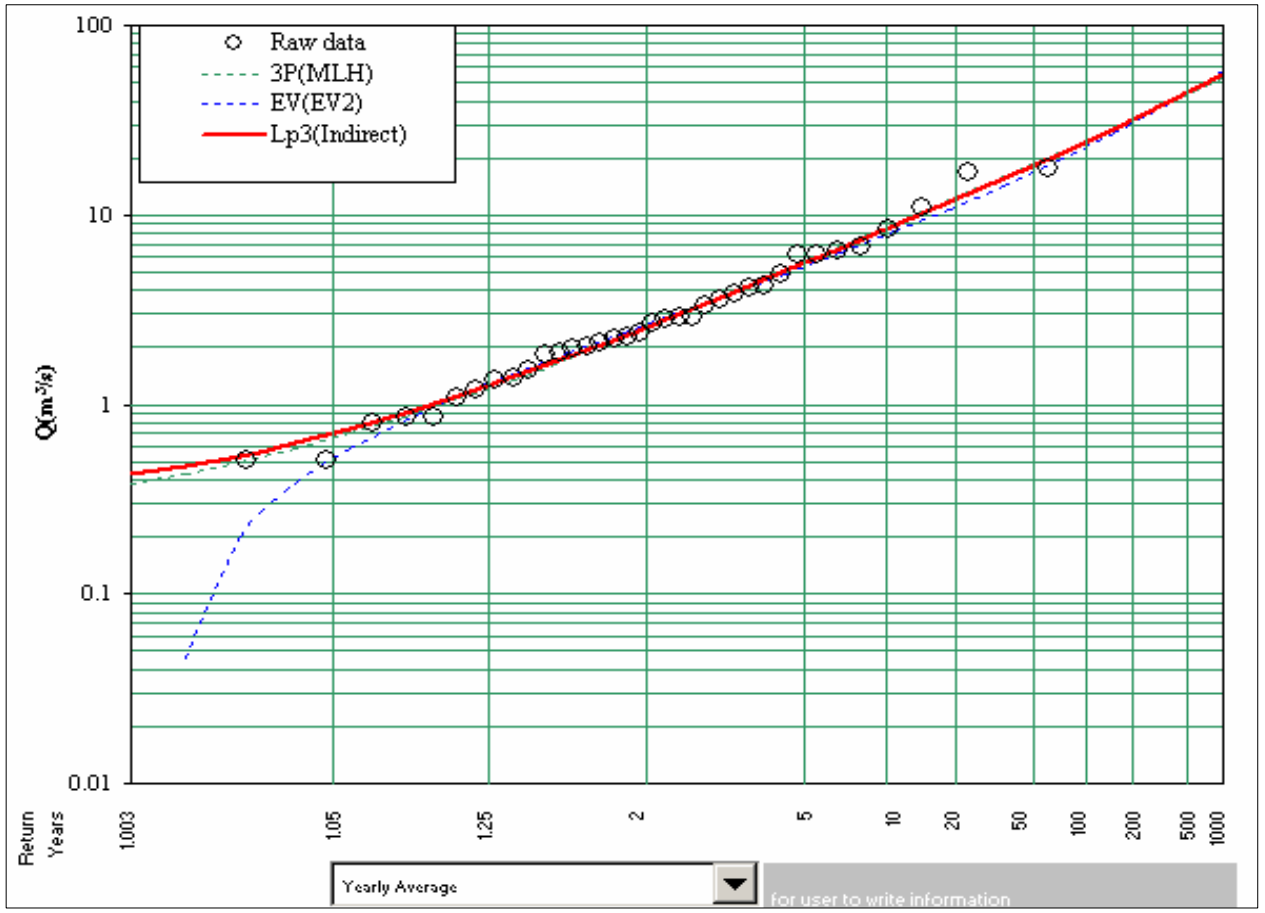
Estación Huasco en Santa Juana - Caudal Bajo

Caudal vs Período de Retorno - Promedio Anual



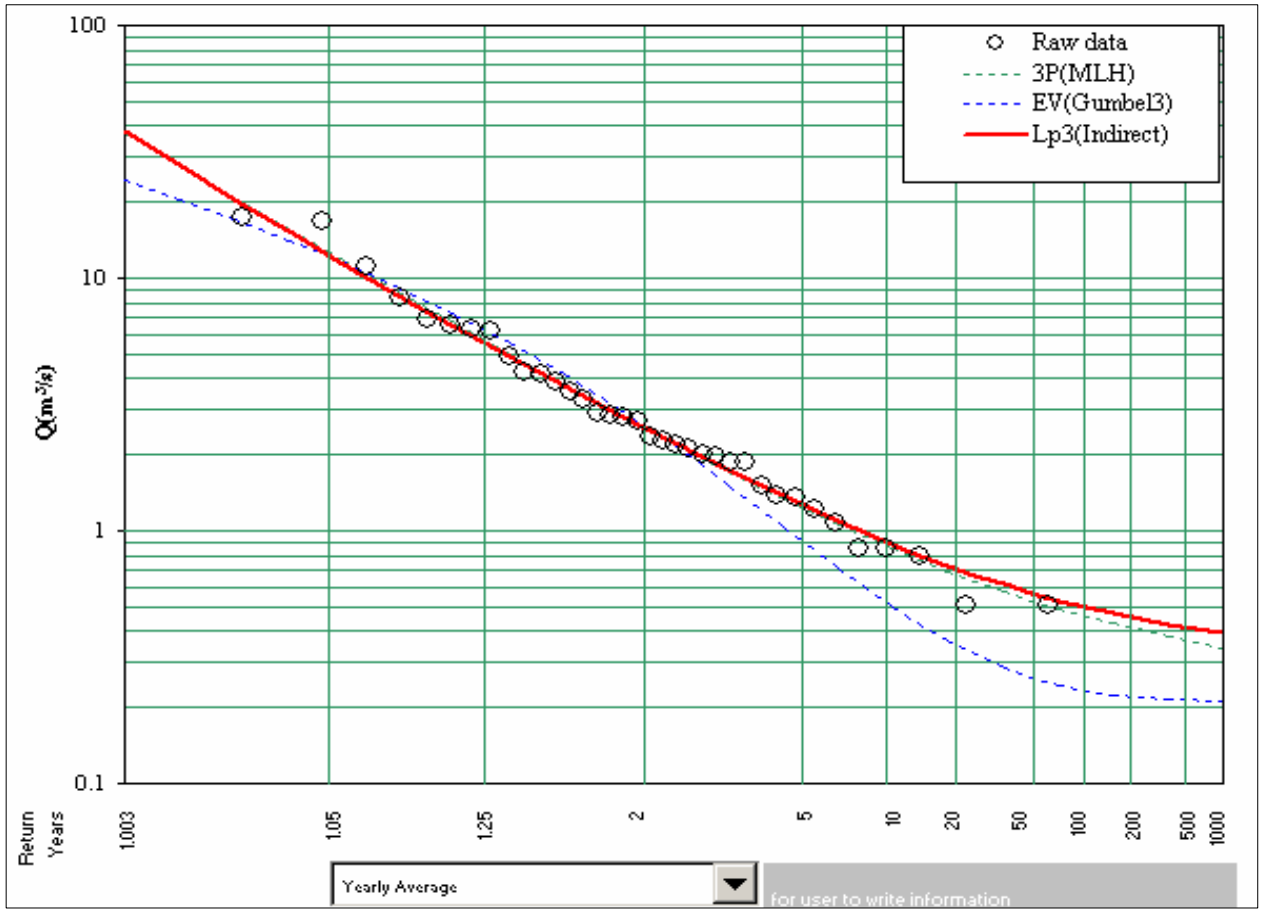
Estación Tránsito en Angostura Pinte - Caudal Alto

Caudal vs Período de Retorno - Promedio Anual



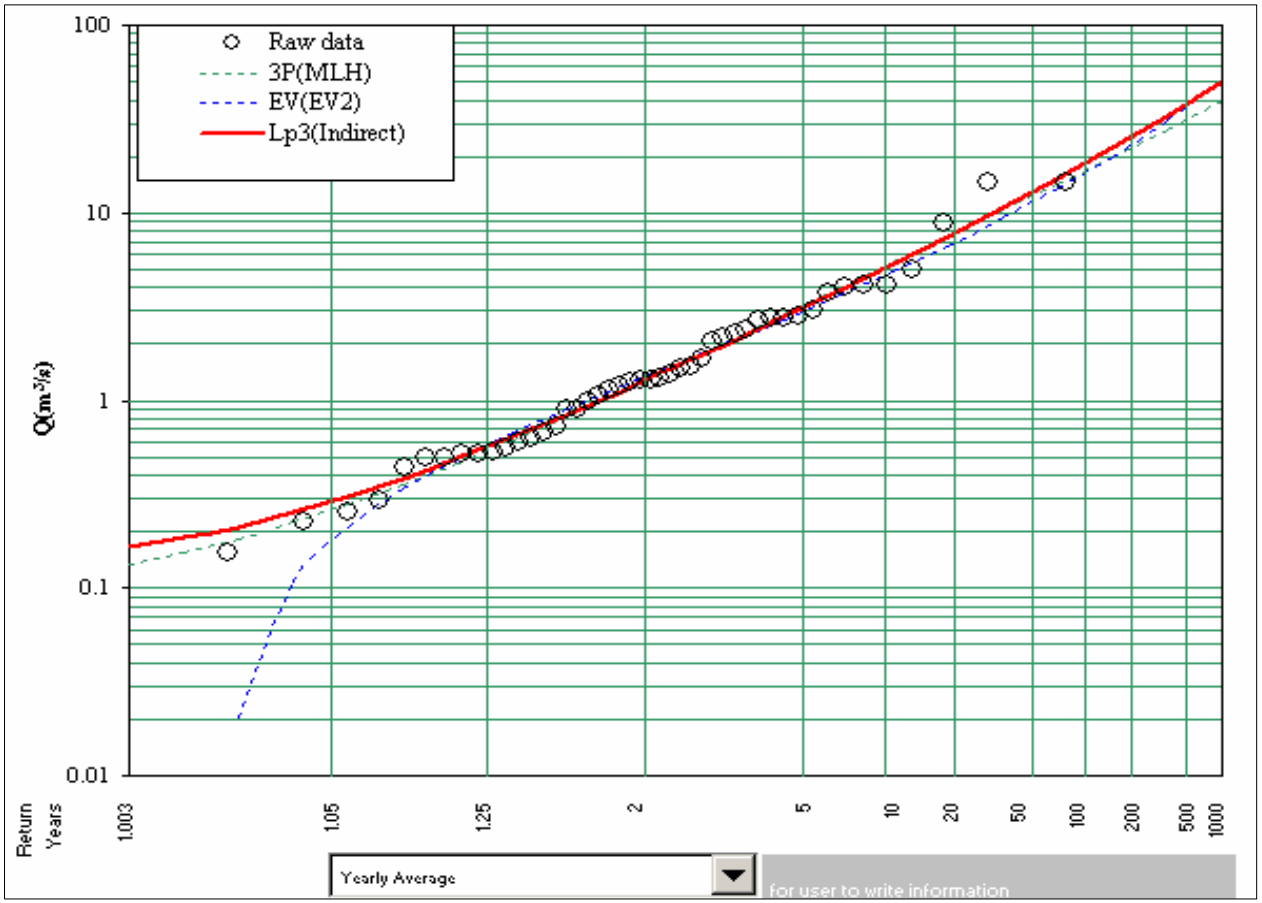
Estación Tránsito en Angostura Pinte - Caudal Bajo

Caudal vs Período de Retorno - Promedio Anual



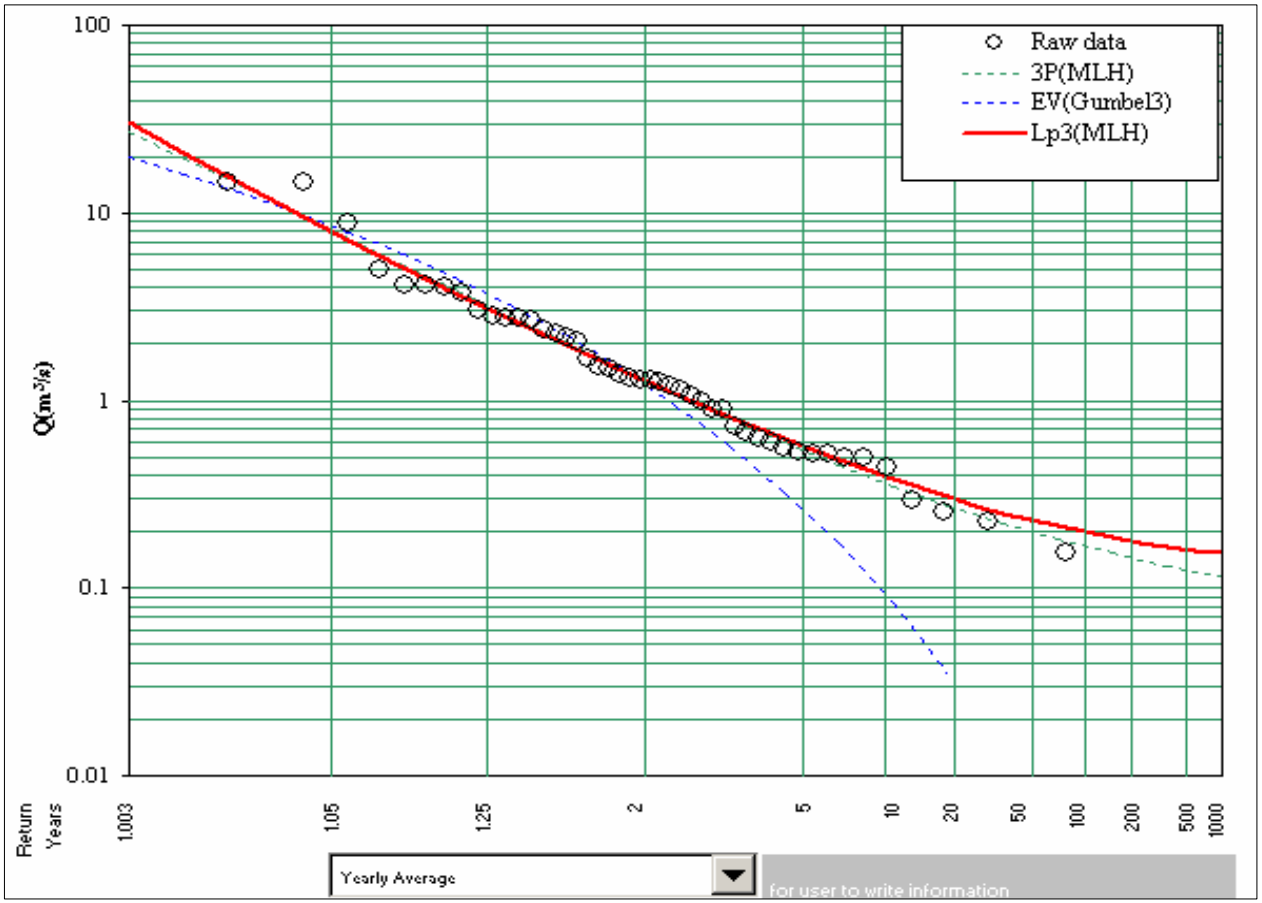
Estación Carmen en Corrales - Caudal Alto

Caudal vs Período de Retorno - Promedio Anual



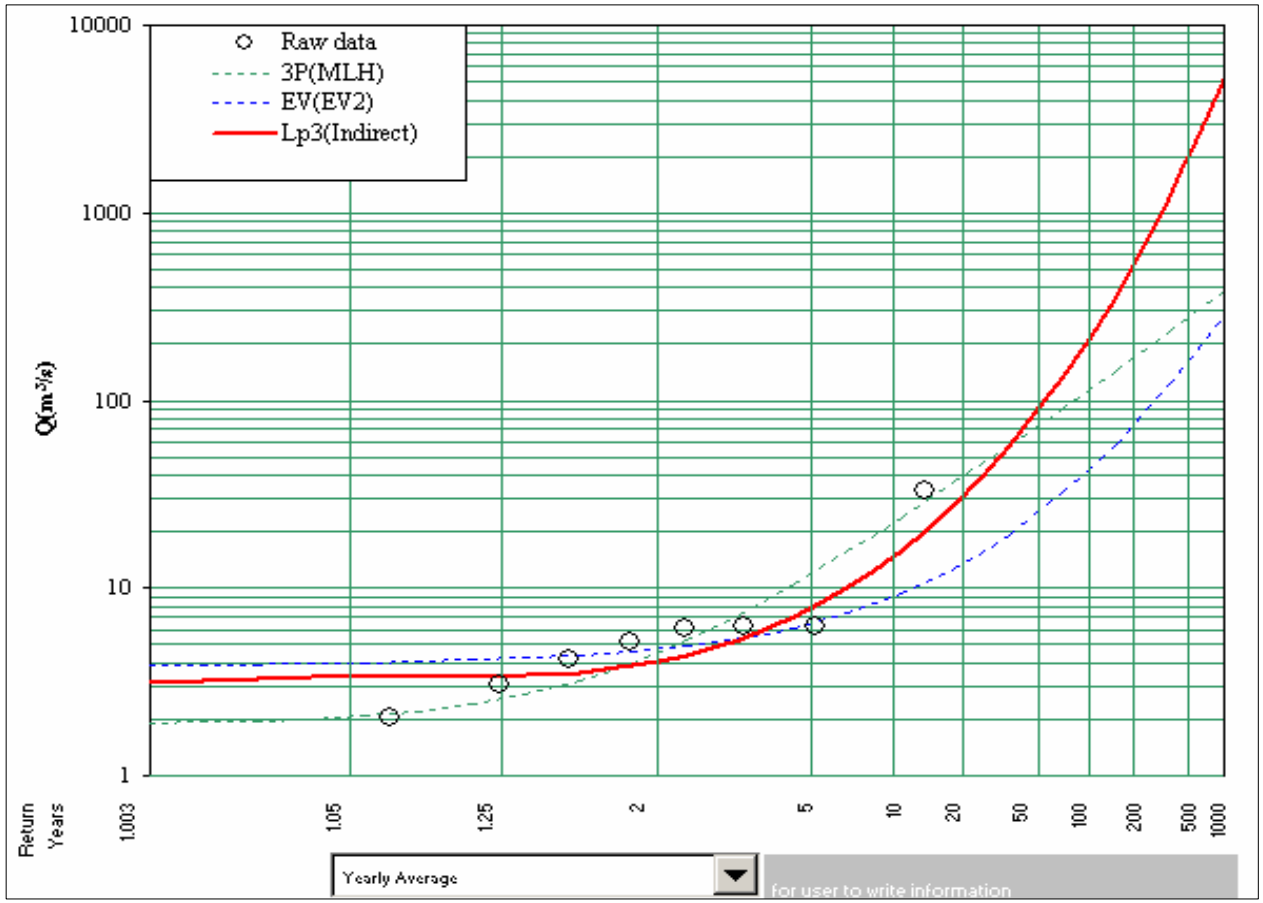
Estación Carmen Ramadillas - Caudal Bajo

Caudal vs Período de Retorno - Promedio Anual



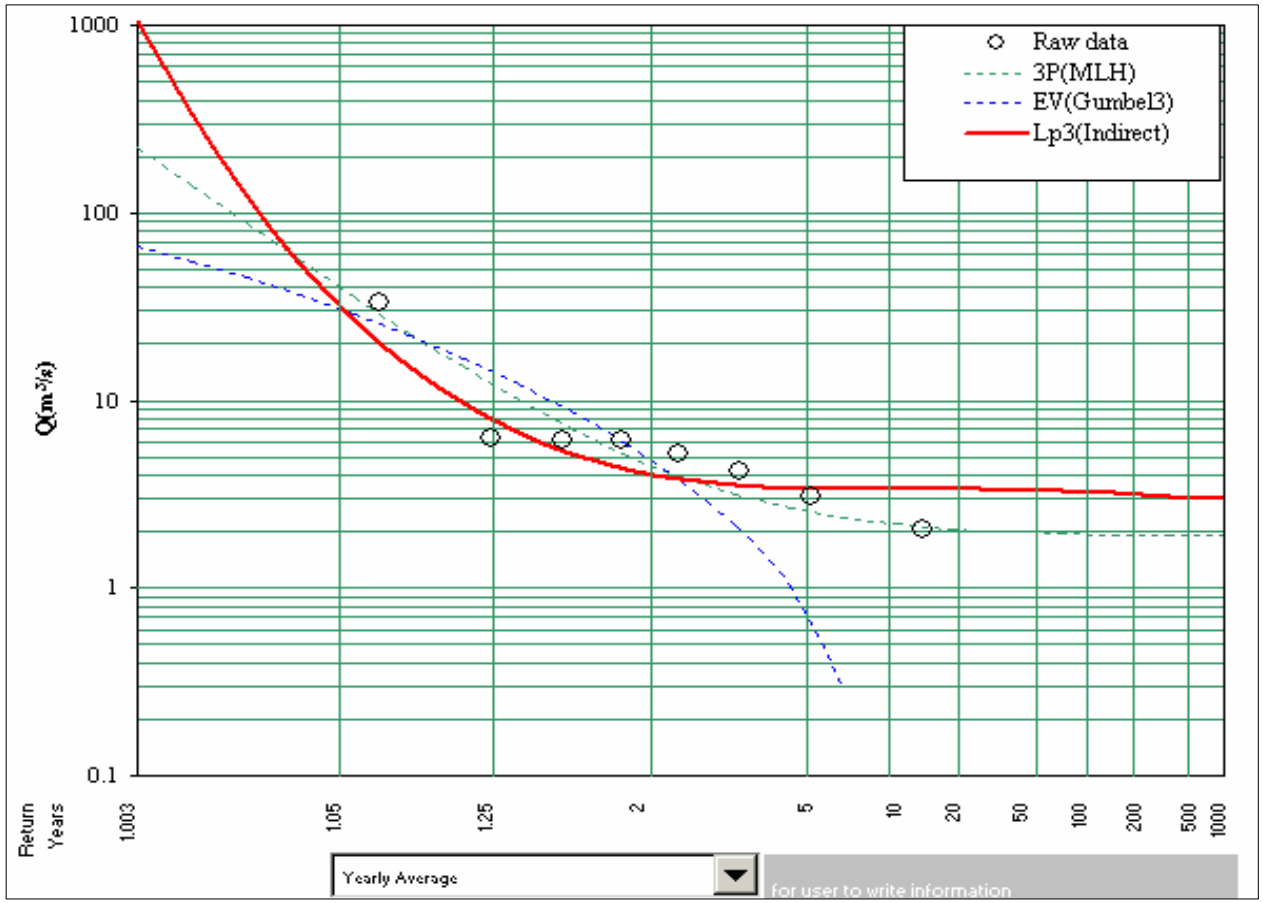
Estación Huasco en Algodones - Caudal Alto

Caudal vs Período de Retorno - Promedio Anual



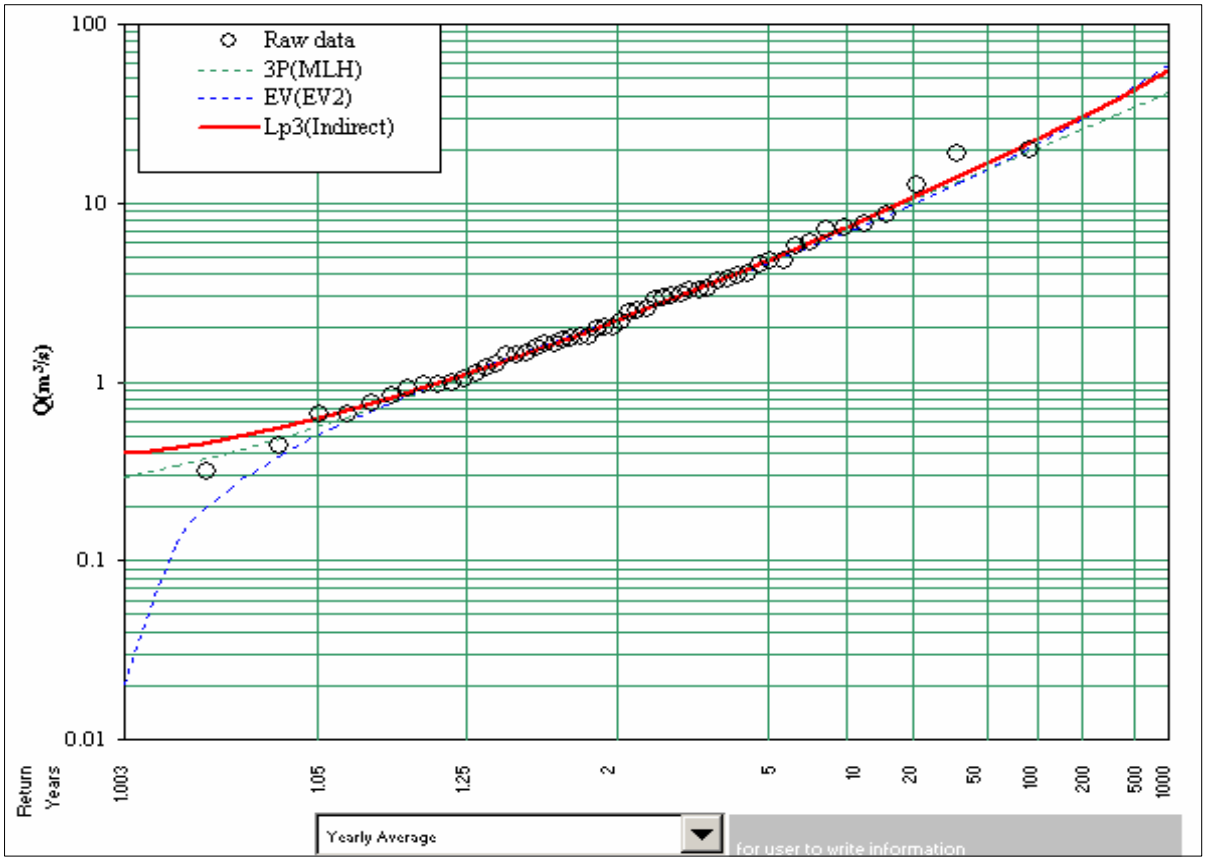
Estación Huasco en Algodones - Caudal Bajo

Caudal vs Período de Retorno - Promedio Anual



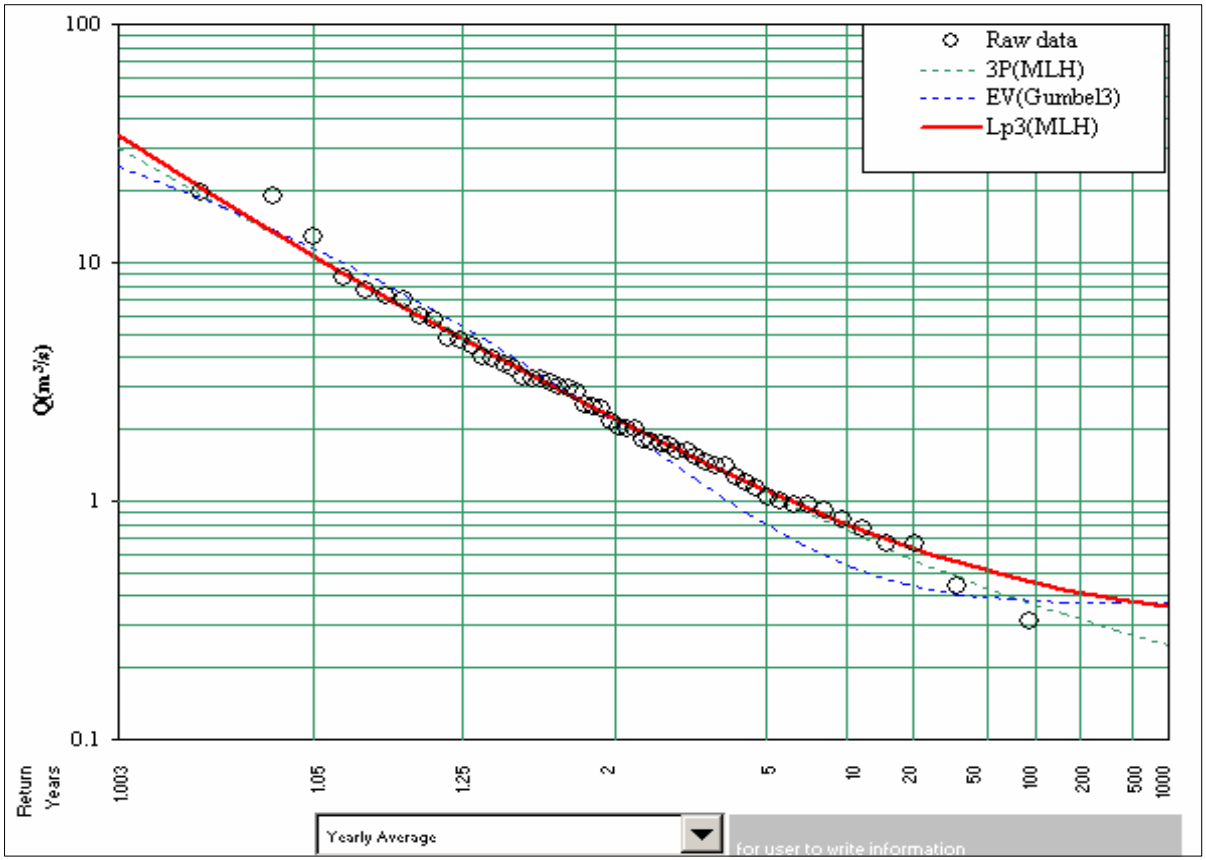
Estación Tránsito Carmen - Caudal Alto

Caudal vs Período de Retorno - Promedio Anual



Rio Tránsito Estación Carmen - Caudal Bajo

Caudal vs Período de Retorno - Promedio Anual



Modelo Hidrológico de la Cuenca del Río Estrecho

Enero de 2006

Preparado por:

Michael A. Jones
7609 Pickard NE
Albuquerque, NM, USA 87110
maj666@comcast.net
505-280-4985

Para:

Proyecto Pascua-Lama
Compañía Minera Nevada

Modelo Hidrológico de la Cuenca del Río Estrecho

Enero de 2006

Índice General

1 Introducción 6
1.1 Area del Estudio 6
1.2 Hoya Superior del Estrecho 8
1.3 Puntos de Monitoreo 11
2 Marco Hidrológico 13
2.1 Caudales Superficiales 14
2.2 Agua Subterránea 17
2.2.1 Cuenca Superior 18
2.2.2 Pruebas de Acuífero 19
2.3 Precipitación 20
2.3.1 Representabilidad del Registro de la Estación El Indio 21
2.3.2 Patrones Temporales de Precipitación 22
2.3.3 Modelación de la Precipitación 24
2.3.4 Nieve acumulada en el glaciar 24
2.3.5 Partes Secas de la Cuenca 25
2.3.6 Precipitación Concluida 25
2.4 Evaporación y Sublimación 27
3 Estructura y Desarrollo del Modelo 29
3.1 Balances Hídricos de Nieve y Glaciares 30
3.1.1 Agua de Deshielo 30
3.1.2 Calibración del Balance 34
3.2 Modelo Numérico 35
3.2.1 Flujos de Aguas Subterráneas y Características de Acuíferos 37
3.2.2 Condiciones de Borde 40
3.2.3 Caudales Superficiales y Flujos entre las Aguas Superficiales y Subterráneas 41
3.2.4 Recargas de Aguas Subterráneas 45
3.2.5 Evapotranspiración de Aguas Subterráneas 45
4 Resultados de la Calibración del Modelo 46
4.1 Resumen de la Calibración 47
4.2 Agua Superficial 49
4.3 Agua Subterránea 54
4.4 Validación del Modelo 66
5 Distribuciones de Caudal 69
6 Balance Hídrico de la Hoya Superior del Estrecho 73
6.1 Balance Hídrico Resumido 73
6.2 Balance Hídrico Anual 74
6.3 Balance Hídrico Mensual 78
7 Applicaciones del modelo 81
7.1 Sistema de Manejo de Aguas 81
7.2 Cambios de Caudal 84
7.3 Cambios de Nivel de Agua Subterránea 87
7.4 Balance de Aguas del Rajo 88

8 Sensibilidad de los Resultados 91
8.1 Sistema de Manejo de Aguas 91
8.2 Cambios de Caudal 93
8.3 Cambios de Nivel de Agua Subterránea 93
8.4 Balance de Aguas del Rajo 95
9 Referencias 96

Índice de Tablas

Tabla 1.1. Puntos de Monitoreo 11
Tabla 2.1. Resumen de Caudales Medidos 15
Tabla 2.2. Resumen de Resultados de Pruebas de Acuíferos 19
Tabla 2.3. Precipitaciones Registradas en El Indio 20
Tabla 2.4. Precipitaciones Estimadas para las Hoyas Hidrográficas del Área de Estudio 26
Tabla 3.1a. Parámetros Climáticos Modelados 32
Tabla 3.1b. Valores Modelados de Temperatura y Fusión Potencial 33
Tabla 3.2. Parámetros de Acuífero Modelados 37
Tabla 3.3. Tramos de Río Modelados 42
Tabla 4.1. Resumen de la calibración del caudal de NE-4 ..... **Error! Bookmark not defined.**
Tabla 4.2. Resumen de la calibración de los niveles de agua subterránea **Error! Bookmark not defined.**
Tabla 6.1. Balance Hídrico Anual Resumido del Río Estrecho Superior 74
Tabla 6.2. Balance Hídrico Anual de la Cuenca del Estrecho Superior 75
Tabla 6.3. Balance Hídrico Mensual, Cuenca Superior del Río Estrecho 78
Tabla 7.1. Lagunas del Rajo 88

Índice de Figuras

Figura 1.1a. Hoyas Geográficas de la Cuenca del Río Estrecho y Puntos de Monitoreo 7
Figura 1.1b. Puntos de Monitoreo en la Hoya Superior del Estrecho 9
Figura 1.2. Características Geomorfológicas de la Hoya Superior del Estrecho 10
Figura 1.3. Unidades Hidrológicas de la Hoya Superior del Estrecho 11
Figura 2.1. Caudales Medidos 14
Figura 2.2a Caudales Medidos, Estaciones NE-2a y NE-5. 16
Figura 2.2b Caudales Medidos, Estaciones NE-5, 2003-2004. 16
Figura 2.3a. Niveles Medidos de Agua en Pozo RE-4a2 17
Figura 2.3b. Niveles Medidos de Agua en Pozo RE-8a 18
Figura 2.4. Niveles de agua de RE-1P con caudales de NE-5. 19
Figura 2.5. Correlación de Precipitación Anual de El Indio con Caudal del Río Estrecho 21
Figura 2.6. Correlación de Precipitación Anual de El Indio con Caudal del Río Jachal 22
Figura 2.7. Distribución Estacional de la Precipitación. 23
Figura 2.8. Distribución de la Precipitación Anual. 24
Figura 2.9. Evaporación Potencial Medido y Modelado 27
Figura 3.1. Diagrama Esquemático de Balances Hídricos 29
Figura 3.2. Valores Medidos y Modelados de Radiación Solar 31
Figura 3.3. Valores Medidos y Modelados de Temperatura 32
Figura 3.4. Malla del Modelo 35

Figura 3.5a. Zonas Hidrogeológicos en el Nivel 1 38
Figura 3.5b. Zonas Hidrogeológicos en el Nivel 2 39
Figura 3.6a. Nodos Fluviales y Sectores Afluentes Modelados 43
Figura 3.6b. Nodos Fluviales y Sectores Afluentes Modelados – Hoya Superior del Estrecho . 44
Figura 4.1a. Caudales Medidos y Simulados, Hoya Superior del Estrecho, Estación NE-5 50
Figura 4.1b. Caudales Medidos y Simulados, Hoya Intermedia del Estrecho, Estación NE-2A 51
Figura 4.1c. Caudales Medidos y Simulados, Quebrada Barriales, Estación NE-1A 52
Figura 4.1d. Caudales Medidos y Simulados, Extremo Inferior del Estrecho, Estación NE-4... 53
Figura 4.2a. Niveles de Agua Medidos y Simulados en el Pozo RE-1..... 55
Figura 4.2b. Niveles de Agua Medidos y Simulados en el Pozo RE-2..... 55
Figura 4.2c. Niveles de Agua Medidos y Simulados en el Pozo RE-3..... 56
Figura 4.2d. Niveles de Agua Medidos y Simulados en el Pozo RE-4A2 56
Figura 4.2e. Niveles de Agua Medidos y Simulados en el Pozo RE-5..... 57
Figura 4.2f. Niveles de Agua Medidos y Simulados en el Pozo RE-16..... 57
Figura 4.2g. Niveles de Agua Medidos y Simulados en el Pozo RE-6..... 58
Figura 4.2h. Niveles de Agua Medidos y Simulados en el Pozo RE-7..... 58
Figura 4.2i. Niveles de Agua Medidos y Simulados en el Pozo RE-8A 59
Figura 4.2j. Niveles de Agua Medidos y Simulados en el Pozo RE-9..... 59
Figura 4.2k. Niveles de Agua Medidos y Simulados en el Pozo de Prueba 1 60
Figura 4.2l. Niveles de Agua Medidos y Simulados en el Pozo RE-14..... 60
Figura 4.2m. Niveles de Agua Medidos y Simulados en el Pozo RE-11B 61
Figura 4.2n. Niveles de Agua Medidos y Simulados en el Pozo RE-10..... 61
Figura 4.2o. Niveles de Agua Medidos y Simulados en el Pozo de Prueba 2 62
Figura 4.2p. Niveles de Agua Medidos y Simulados en el Pozo RE-12..... 62
Figura 4.2r. Niveles de Agua Medidos y Simulados en el Pozo RE-17 63
Figura 4.2s. Niveles de Agua Medidos y Simulados en el Pozo BT-4 64
Figura 4.2t. Niveles de Agua Medidos y Simulados en el Pozo NEV-1 64
Figura 4.2u. Niveles de Agua Medidos y Simulados en el Pozo NEV-2 65
Figura 4.2v. Niveles de Agua Medidos y Simulados en el Pozo NEV-3 65
Figura 4.3. Contornos Simulados de Niveles de la Superficie Freática, mes de Abril de 2004.. 66
Figura 4.4. Niveles Medidos y Simulados de agua subterránea, abril de 2005 67
Figura 4.5a. Caudales Medidos y Simulados en NE-4, Abril 2004 – Abril 2005 **Error! Bookmark not defined.**
Figura 4.5b. Caudales Medidos y Simulados en NE-2a, Abril 2004 – Abril 2005 ..... **Error! Bookmark not defined.**
Figura 4.5c. Caudales Medidos y Simulados en NE-5, Abril 2004 – Abril 2005 **Error! Bookmark not defined.**
Figura 5.1. Distribución de Precipitaciones Anuales..... 69
Figura 5.2. Distribuciones de Flujos Medios Anuales en la Estación NE-2a..... 70
Figura 5.3. Distribuciones de Flujos Medios Anuales en la Estación NE-4..... 70
Figura 5.4. Distribuciones de Caudales Mensuales en NE-5 71
Figura 5.5. Distribuciones de Caudales Mensuales en NE-2a 71
Figura 5.6. Distribuciones de Caudales Mensuales en NE-4 72
Figura 6.1. Balance Hídrico Simulado de Nieve y Glaciar de la Cuenca Superior del Río Estrecho (mm de agua) 76
Figura 6.2. Balance Hídrico Simulado de Agua Superficial de la Cuenca Superior del Río Estrecho (l/s) 77
Figura 6.3. Balance Hídrico Simulado de Agua Subterránea de la Cuenca Superior del Río Estrecho (l/s) 77

Figura 7.1. Sistema de Manejo de Agua, Operaciones 82
Figura 7.2. Sistema de Manejo de Agua, Cierre 83
Figura 7.3. Caudales Afluente al Sistema de Manejo de Aguas 84
Figura 7.4. Cambios de Caudal 85
Figura 7.5. Cambios del Nivel Piezométrico 87
Figura 7.6. Representación del Rajo 88
Figura 7.7. Balance de Aguas de las Lagunas del Rajo 89
Figura 7.8. Área y Volumen de Lagunas 90
Figura 8.1. Distribuciones de caudales simulados del sistema de manejo de aguas 92
Figura 8.2. Sensibilidad de los cambios simulados del nivel de agua subterránea 94

1 INTRODUCCIÓN

Este informe presenta un modelo hidrológico de la Cuenca del Río del Estrecho y su aplicación para representar el balance hídrico de la cuenca, considerando el desarrollo del Proyecto Pascua-Lama. Los resultados se usan en el diseño del sistema de manejo de aguas del Proyecto y en la calculación de los impactos hídricos del Proyecto.

La cuenca del Río del Estrecho está encima de la Cordillera de los Andes, en la cabecera del Río Huasco en el Norte de Chile, en la frontera con Argentina. La parte superior de la Cuenca del Estrecho constituye el sector de localización del depósito de estéril y del rajo abierto del Proyecto Pascua Lama.

Se desarrolló el modelo a partir de la información disponible del clima, de la topografía, de la hidrología y de la hidrogeología del período 1981-2005. El dominio del modelo extiende al área de aporte aguas arriba de la estación hidrométrica NE-4, según se muestra en la Figura 1.1a.

El modelo se utiliza durante la realización de un análisis de los movimientos de agua superficial y subterránea en el sector del botadero de estéril Nevada Norte, y en particular para los siguientes fines específicos:

- Diseño del sistema de manejo de aguas asociado con el depósito de estériles: Estimación de caudales para las estructuras de desvío al norte y al sur del botadero, de volúmenes para las estructuras de almacenaje aguas abajo del botadero y de la capacidad de la planta de tratamiento de aguas ácidas. Estimación del nivel futuro de la napa subterránea ubicada por debajo del depósito.
- Estimación de cambios a los caudales de aguas superficiales, aguas abajo del Proyecto. También se entregó los caudales simulados a un modelo de dilución (Barrick, 2005) para evaluar la calidad de agua.
- Estimación de cambios al nivel de la napa subterránea, aguas abajo del proyecto, para estimar el impacto al sistema de humedales.
- Estimación de caudales generados dentro del rajo abierto, y estimación del balance de aguas del rajo en la época de cierre.

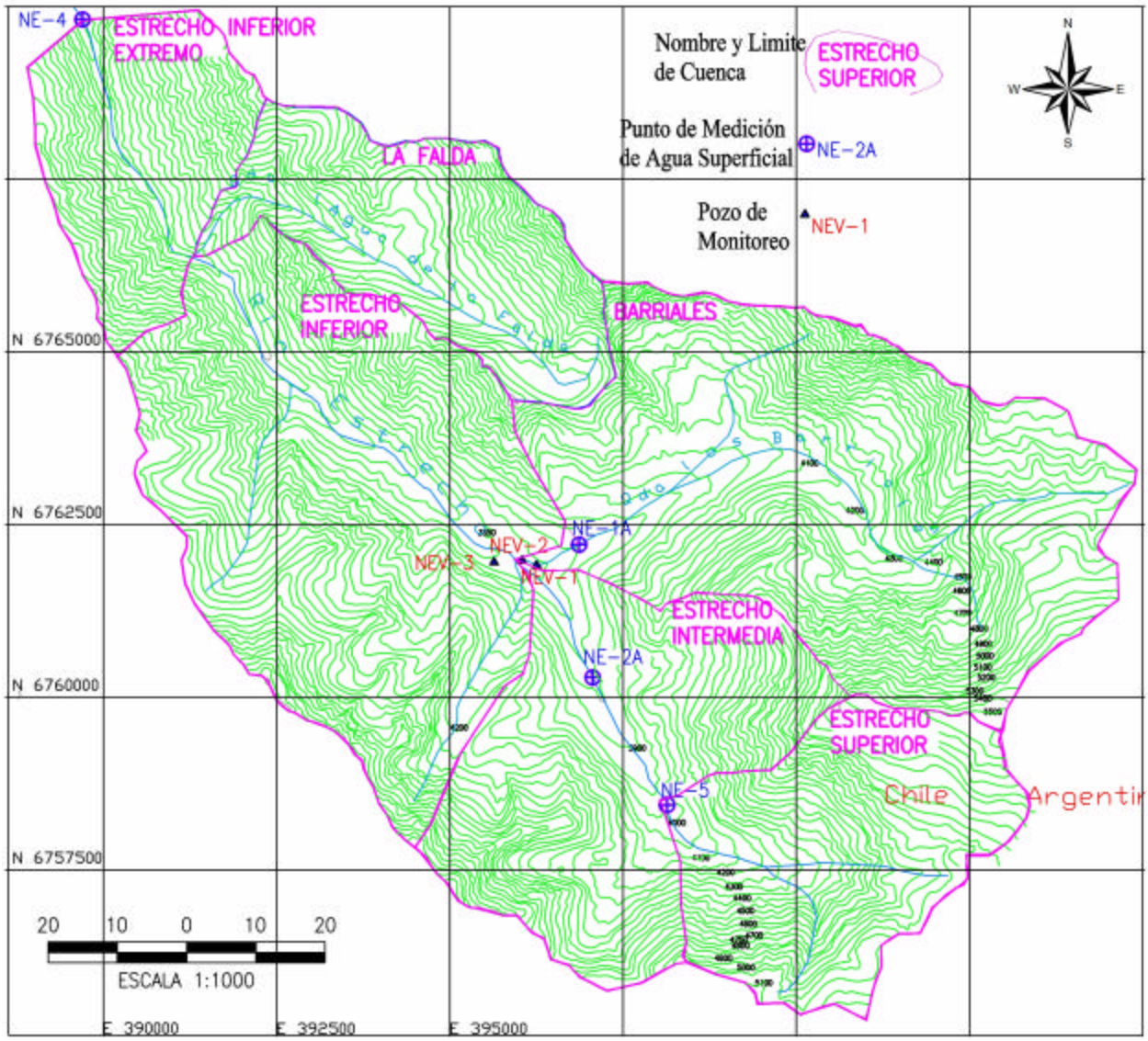
1.1 Area del Estudio

En la Figura 1.1a se muestra la Cuenca del Río Estrecho. Está ubicada en la IIIa Región de Chile a cotas inferiores a la divisora de agua de la Cordillera de los Andes en la frontera con la Provincia de San Juan, Argentina, a una latitud de 29 grados Sur. La cuenca presenta características topográficas abruptas y se desarrolla a una altura de entre los 2.950 y 5.550 metros sobre el nivel medio del mar (snm). El área de estudio incluye la cuenca topográfica del

Río Estrecho aguas arriba de la estación hidrométrica NE-4. Para los fines del presente estudio, esta cuenca de 128 km^2 se ha dividido en las siguientes seis hoyas hidrográficas según se muestran en la Figura 1.1a:

- Hoya Superior del Estrecho (15.5 km^2)
- Hoya Intermedia del Estrecho (20.5 km^2)
- Quebrada Barriales (34.9 km^2)
- Hoya Inferior del Estrecho (33.1 km^2)
- Quebrada Agua de la Falda (13.3 km^2)
- Hoya del Extremo Inferior del Estrecho (10.9 km^2)

Figura 1.1a. Hoyas Geográficas de la Cuenca del Río Estrecho y Puntos de Monitoreo



1.2 Hoya Superior del Estrecho

En la Figura 1.1b se muestra la hoya superior del Estrecho. En el sector aguas arriba del punto de monitoreo NE-5 están ubicados los lugares de emplazamiento propuestos para el Botadero de Estéril Nevada Norte y la parte del rajo de la mina Pascua Lama que estará ubicada en el lado chileno. Cabe notar que los trabajos de investigación de terreno, de mapeo y de recolección de datos se han concentrado en la hoya superior del Estrecho.

En la Figura 1.2 se muestran las características geomorfológicas de la hoya superior del Estrecho (Golder, 2005). Entre las unidades geomorfológicas principales se incluyen los glaciares, ubicados principalmente en alturas superiores a los 5.000 m, además de glaciares de roca y sectores con permafrost, ubicados también en las cotas más altas. Se observan en las laderas, fuertemente inclinadas por encima del valle, afloramientos de roca sólida y roca sólida cubierta por material coluvial. El fondo del valle está cubierto con sedimentos de origen glacial.

Para los fines de análisis, la hoya superior del Estrecho se ha dividido en seis unidades hidrológicas sobre la base de altura, orientación al sol, exposición al viento y localización de las instalaciones mineras. Se presenta los seis unidades en la Figura 1.3.

1. La Unidad de Canal Norte representa el sector afluente al Canal de Desvío Norte que ha sido propuesto para llevar una parte del escurrimiento superficial alrededor del botadero de estéril. Esta unidad consiste en la ladera de la cuenca con exposición hacia el sur, en su parte ubicada a mayor altura y representa la mayor fuente de agua de la cuenca. En esta área de 5.5 km^2 se incluyen unos 2.0 km^2 de glaciares.

2. La Unidad de Canal Sur representa el sector afluente al Canal de Desvío Sur que ha sido propuesto para llevar otra parte del escurrimiento superficial alrededor del botadero de estéril. Esta área de 2.0 km^2 consiste en la ladera de la cuenca con exposición hacia el norte, en donde las acumulaciones de nieve son de tamaños menores en comparación a las ubicadas en las laderas con exposición hacia el sur.

3. La Unidad de Rajo consiste en el sector de la Cuenca del Estrecho dentro de los últimos límites del rajo abierto propuesto. Esta área de 2.2 km^2 está constituida de una ladera seca con exposición hacia al norte.

4. La Unidad de Botadero consiste en el área del botadero de estéril propuesto. Esta área de 3.3 km^2 está ubicada a lo largo del eje del valle entre las laderas húmedas, con exposición hacia el sur, y las laderas secas, con exposición hacia el norte.

5. La Unidad de Aguas Abajo consiste en el sector aguas abajo de la Unidad de Botadero, ubicado también a lo largo del eje del valle. Cubre un área de 2.0 km^2.

6. La Unidad de Aguas Arriba consiste en el sector aguas arriba de la Unidad de Botadero y es de 1.4 km^2 de extensión. La unidad se sitúa en un sector de silla en la cumbre entre la Cuenca del Estrecho y la cuenca vecina del Río Turbio en Argentina. Debido a la topografía se presentan vientos de alta velocidad en este sector, que resultan en acumulaciones de nieve relativamente menores.

Figura 1.1b. Puntos de Monitoreo en la Hoya Superior del Estrecho

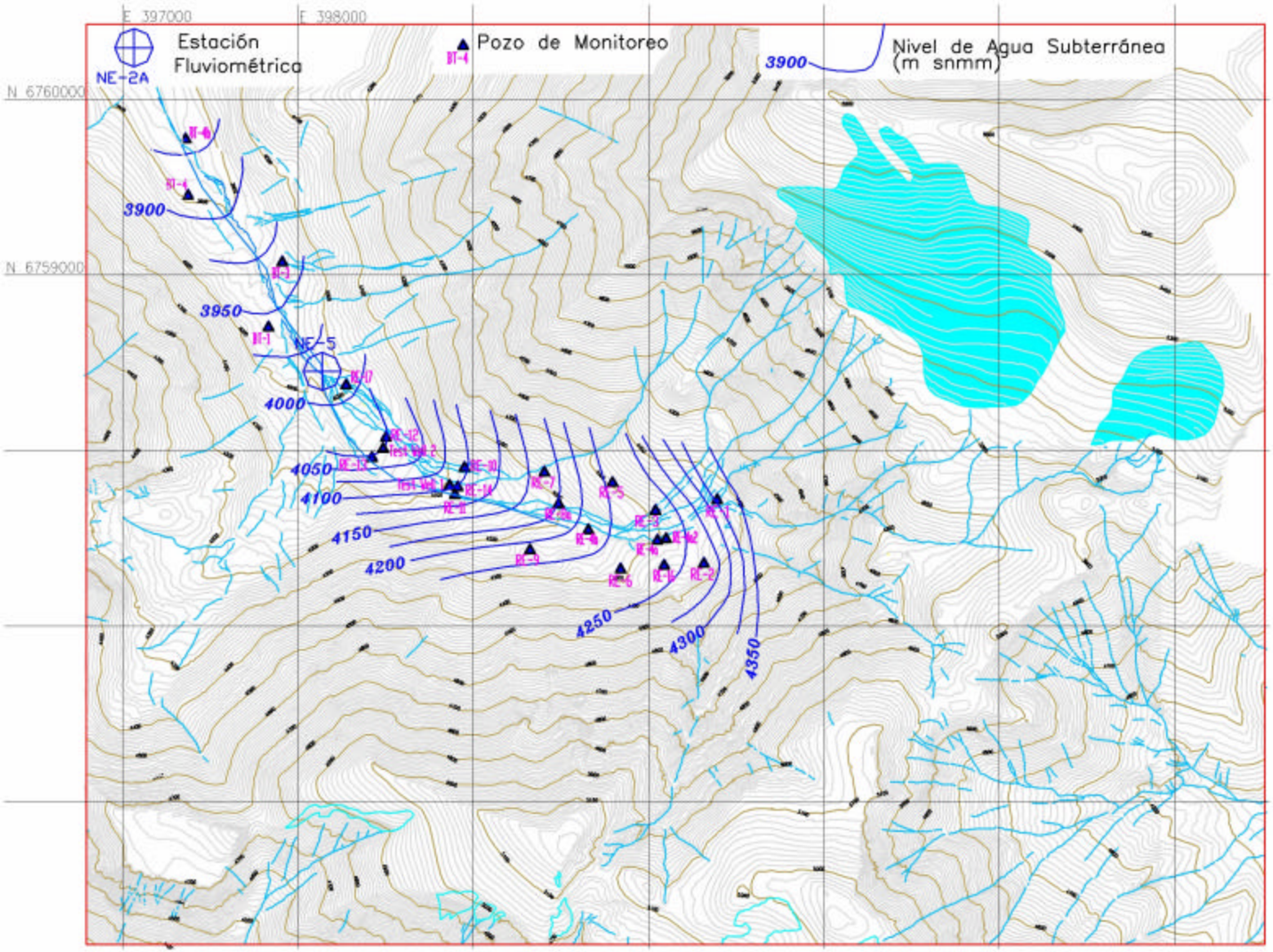


Figura 1.2. Características Geomorfológicas de la Hoya Superior del Estrecho

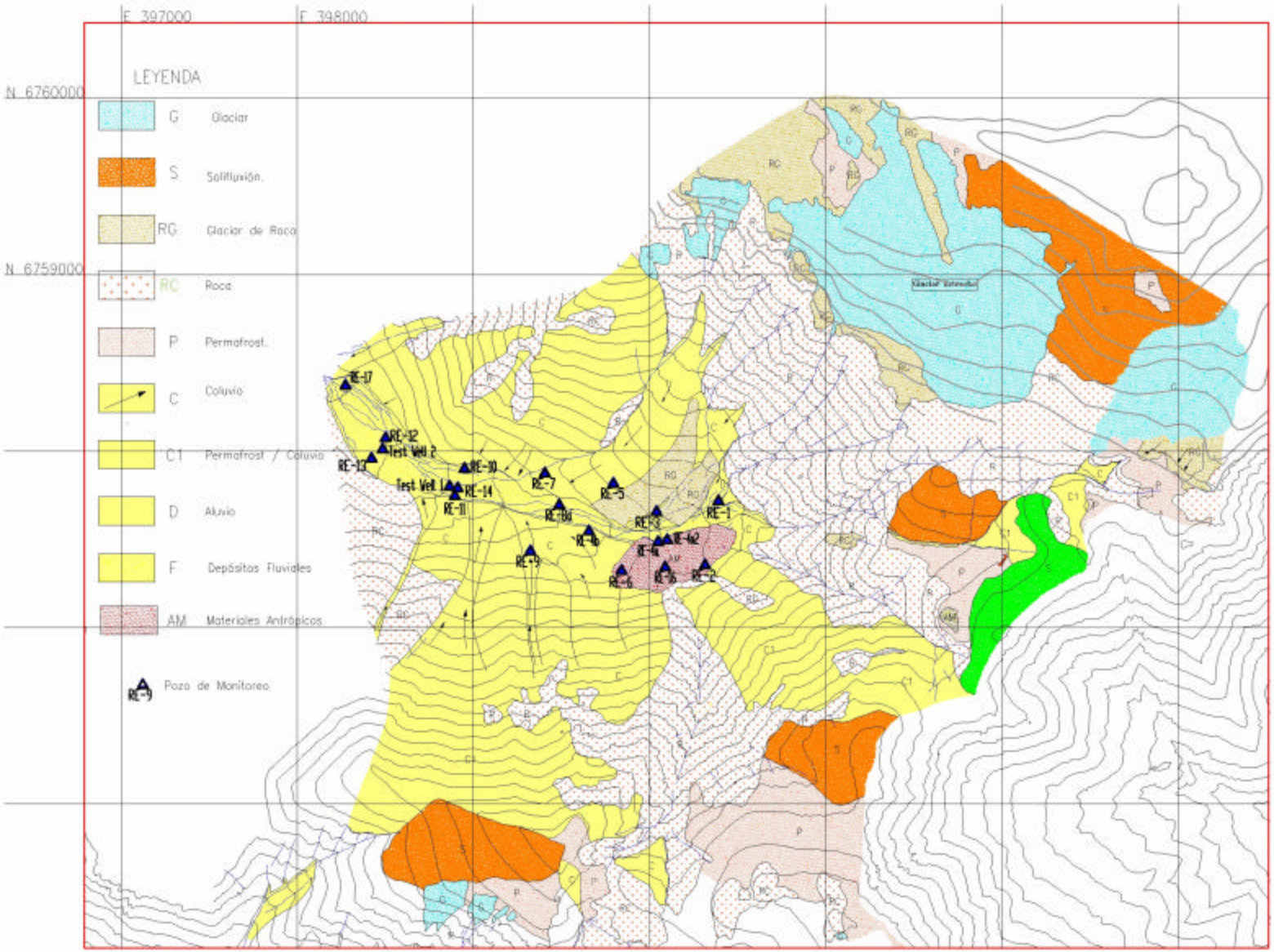
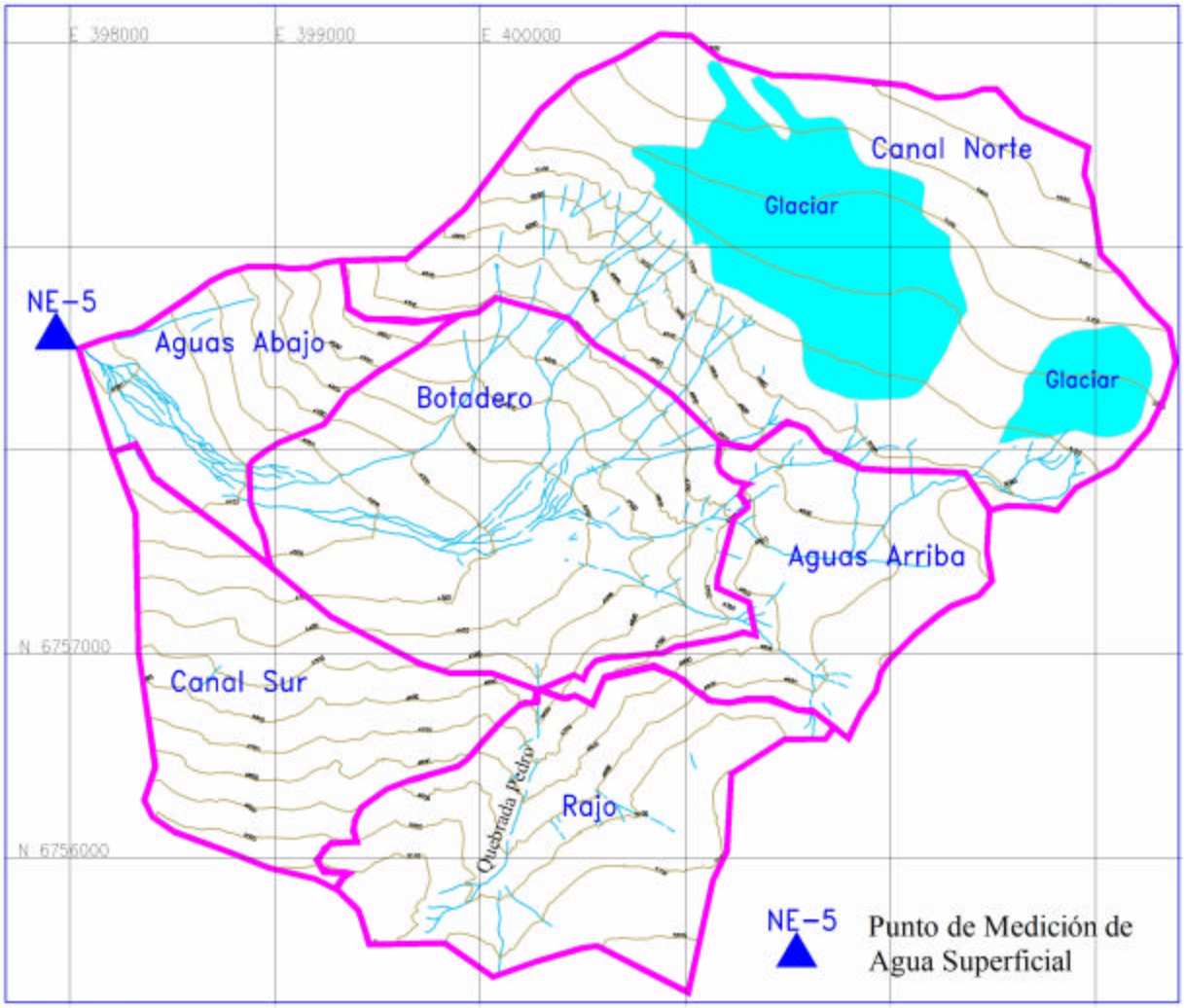


Figura 1.3. Unidades Hidrológicas de la Hoya Superior del Estrecho



1.3 Puntos de Monitoreo

En la Tabla 1.1 se presentan los detalles de los puntos de monitoreo, incluso las estaciones hidrométricas, pozos de monitoreo de agua subterránea y estaciones meteorológicas.

Tabla 1.1. Puntos de Monitoreo

Nombre	Tipo de Monitoreo	Dato-loger	UTM Este	UTM Norte	Nivel de punto de medición (m snm)	Período de medición	No. de muestras de calidad
NE-1A	Hidrométrica	Geokon	396907	6762154	3750	2001 - 2005	37
NE-2A	Hidrométrica	Geokon	397040	6760275	3825	1981 - 2005	37
NE-4	Hidrométrica	Geokon	389672	6769819	2969	1981 - 2005	187
NE-5	Hidrométrica	Geokon	398061	6758496	3978	1996 - 2005	137
BT-1	Piezómetro		397854	6758650	3959	2000 - 2000	81
BT-3	Piezómetro		397910	6759069	3936	2000 - 2000	84
BT-4	Piezómetro		397370	6759461	3890	2000 - 2004	14
NEV-1	Piezómetro		396250	6761921	3693	1998 - 2002	13
NEV-2	Piezómetro		396041	6761987	3679	1998 - 2002	9
NEV-3	Piezómetro		395642	6761970	3662	1998 - 2004	46
RE-10P	Piezómetro	Geokon	398950	6757899	4115	2000 - 2005	
RE-10S	Piezómetro	Geokon	398950	6757899	4115	2000 - 2005	
RE-11BS	Piezómetro		398895	6757745	4111	2000 - 2001	
RE-12P	Piezómetro	Geokon	398501	6758071	4041	2000 - 2005	
RE-12S	Piezómetro	Geokon	398501	6758071	4041	2000 - 2005	
RE-13P	Piezómetro		398422	6757955	4042	2000 - 2001	1
RE-13S	Piezómetro		398422	6757955	4042	2000 - 2001	1
RE-14P	Piezómetro		398865	6757797	4103	2000 - 2001	2
RE-14S	Piezómetro		398865	6757797	4103	2000 - 2001	
RE-16	Piezómetro	Geokon	400080	6757340	4338	2000 - 2005	
RE-17P	Piezómetro	Geokon	398270	6758370	3996	2000 - 2005	
RE-17S	Piezómetro	Geokon	398270	6758370	3996	2000 - 2005	
RE-1P	Piezómetro	Geokon	400390	6757715	4371	2000 - 2005	
RE-2P	Piezómetro	Geokon	400315	6757353	4352	2000 - 2005	1
RE-3P	Piezómetro		400039	6757653	4310	2000 - 2001	1
RE-4A1S	Piezómetro		400100	6757495	4307	2000 - 2000	
RE-4A2P	Piezómetro	Geokon	400105	6757497	4307	2000 - 2005	
RE-4BS	Piezómetro		399656	6757551	4231	2000 - 2001	
RE-5P	Piezómetro	Geokon	399794	6757813	4305	2000 - 2005	1
RE-6P	Piezómetro		399840	6757320	4290	2000 - 2004	11
RE-7P	Piezómetro	Geokon	399405	6757872	4223	2000 - 2005	
RE-7S	Piezómetro	Geokon	399405	6757872	4223	2000 - 2005	
RE-8AP	Piezómetro	Geokon	399486	6757692	4199	2000 - 2005	
RE-8AS	Piezómetro	Geokon	399486	6757692	4199	2000 - 2005	
RE-9P	Piezómetro	Geokon	399324	6757430	4245	2000 - 2005	
WELL-1	Piezómetro		398911	6757788	4110	2000 - 2001	
WELL-2	Piezómetro		398487	6758007	4044	2000 - 2001	
El Indio	Meteorológico		406716	6708870	3869	1981 - 2004	
Pascua	Meteorológico		396355	6763845	3700	2001 - 2004	
La Olla	Meteorológico		397267	6758661	3700	2000 - 2005	
El Toro	Meteorológico		392653	6754823	3950	1999 - 2005	
Frontera	Meteorológico		401775	6757024	4927	1999 - 2005	
Lama	Meteorológico		407238	6754708	3958	2000 - 2003	
Veladero	Meteorológico		413491	6746586	3860	2001 - 2002	
Potrerillos	Meteorológico		410036	6747533	4200	2001 - 2003	

2 MARCO HIDROLÓGICO

El clima de la Cuenca del Estrecho es de características frías y áridas. Las precipitaciones se producen principalmente en la estación de invierno y en la forma de nieve. Los ciclos de precipitaciones se caracterizan por una secuencia de años secos, interrumpidos por años húmedos (Golder, noviembre de 2005b) que ocurren, por promedio, una vez cada 5 años.

La sublimación representa una parte sustancial del balance de nieve, con pérdida de agua mayor a la mitad de la nieve caída. La sublimación consiste en agua devuelta a la atmósfera, sin participar en los balances de agua superficial y subterránea.

El caudal afluente a las aguas superficiales y subterráneas de la cuenca consistente en agua de deshielo, proveniente de la acumulación anual de nieve y de los glaciares perennes ubicados en las mayores alturas.

El deshielo de nieve comienza en el mes de Septiembre y alcanza su expresión máxima entre Octubre y Diciembre, dependiendo en la cantidad de nieve acumulada. En los años secos hay poca aporta, y el período de deshielo es de duración corta. En los años húmedos los caudales son mayores y el período de escurrimiento se prolonga.

Los deshielos de origen glacial comienzan en el mes de Diciembre y alcanzan una máxima expresión en el mes de Febrero. La cantidad de deshielo de glaciar es relativamente uniforme de año en año. El deshielo de glaciar representa una parte significativa del escurrimiento de la hoya superior del Estrecho.

El efluente de la cuenca consiste principalmente de agua superficial, con componentes secundarios de egreso en la forma de agua subterránea y de evapotranspiración.

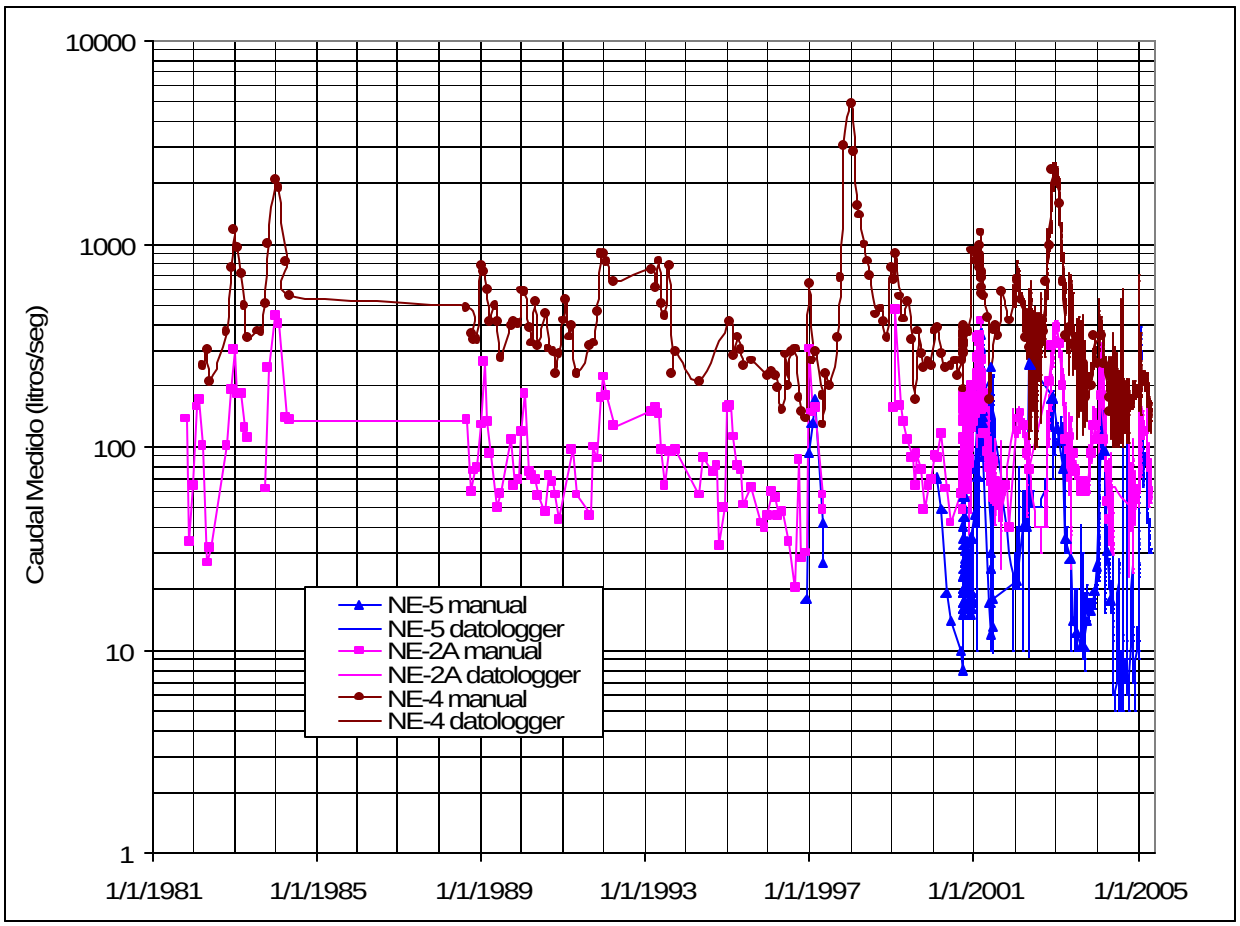
A continuación se presenta los datos y analices en que se ha basado el balance hídrico de la Cuenca del Río del Estrecho.

2.1 Caudales Superficiales

Los datos más importantes para el desarrollo del balance hídrico de la Cuenca del Río del Estrecho son los flujos en cursos de agua superficial, que se miden en los puntos indicados en la Figura 1.1a.

Existen registros de caudales, medidos en base regular, desde los principios de la década de 1980 en las estaciones fluviométricas NE-2a y NE-4 en el Río del Estrecho y en la estación NE-1/NE-1a ubicada en la Quebrada Barriales. Asimismo, se han medido en forma regular desde los finales de 1996 los caudales del Río del Estrecho en la estación NE-5, ubicada en la hoya superior del Estrecho. Se presentan los caudales medidos en la Figura 2.1.

Figura 2.1. Caudales Medidos



Los caudales registrados presentan cotas máximas en los períodos de deshielo, declinando posteriormente hasta alcanzar su mínima expresión en la estación de invierno. Los caudales de invierno consisten en la descarga de agua subterránea (flujo de base) a los cursos superficiales. Se presenta un resumen de los caudales en la Tabla 2.1[1].

[1] Nota que los caudales de la Tabla 2.1 representan promedias de las mediciones de caudal, y que son distintas de los caudales promedios estimados (Golder, noviembre de 2005b), que consideran, además de los caudales medidos, las correlaciones con otros datos regionales.

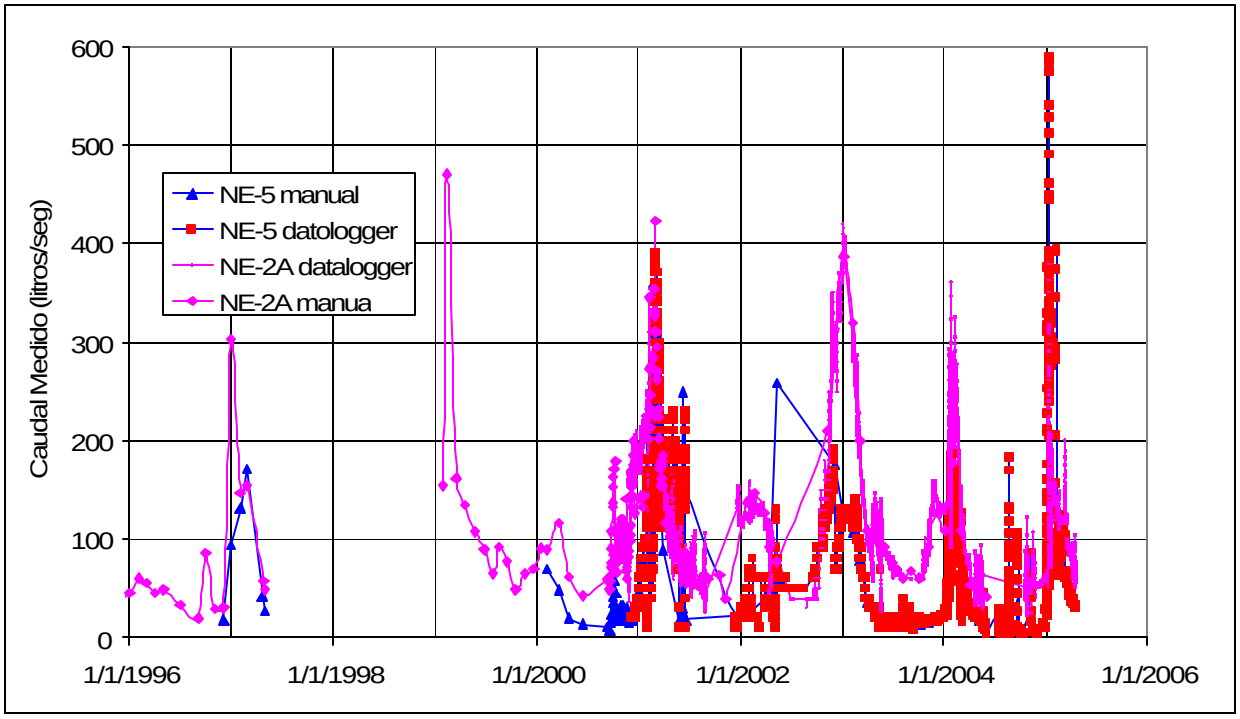
Tabla 2.1. Resumen de Caudales Medidos

	Caudal Promedio Medido (l/seg)		
mes	NE-5	NE-2a	NE-4
ene	61	182	1152
feb	135	205	788
mar	128	129	492
abr	43	96	408
may	62	81	405
jun	39	69	321
jul	25	59	291
ago	20	62	358
sep	25	65	316
oct	39	89	432
nov	49	130	755
dic	37	137	1126
anual	**55**	**109**	**570**
Area de Cuenca (km^2)	15.6	33.6	128.3
Caudal Específico (mm/año)	**112**	**102**	**140**

Según la Tabla 2.1, las cuencas del Río del Estrecho aportan un promedio entre 102 y 140 mm/año de escurrimiento. Se compara al 50 mm/año que estima el Balance Hídrico de Chile (DGA, 1987) para la región. Se atribuye la diferencia a la altura de la cuenca y a la influencia de los glaciares.

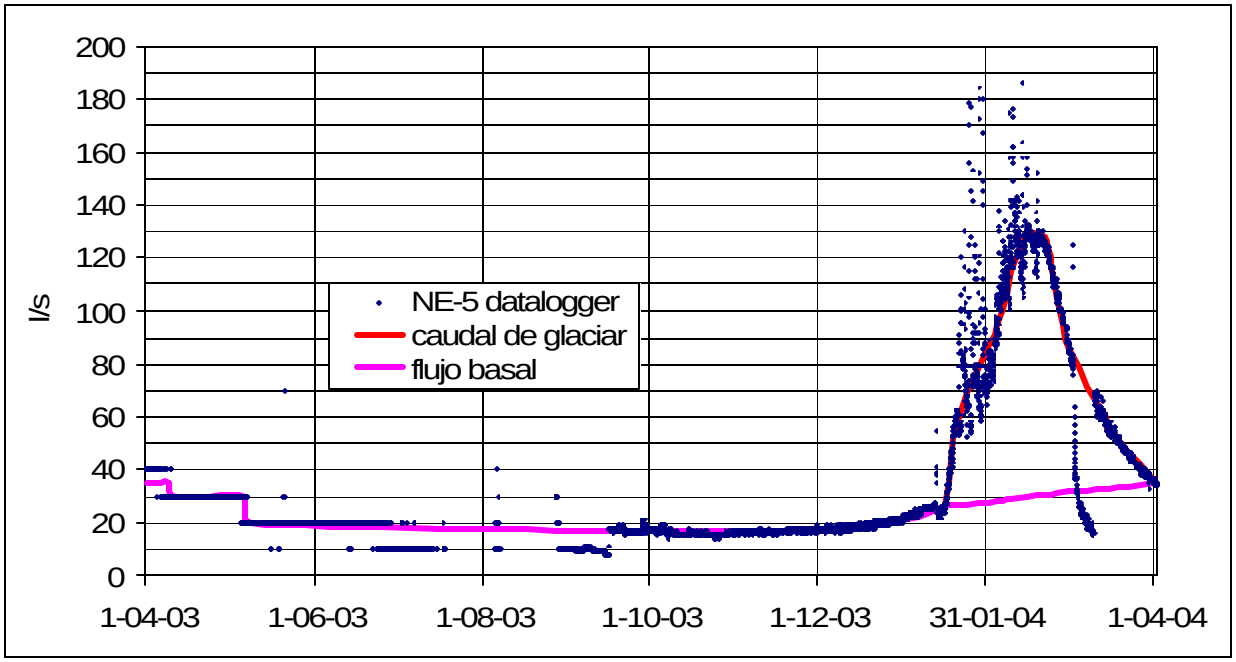
En la Figura 2.2a se presentan de nuevo los caudales medidos, con el propósito de estimar el caudal del glaciar Estrecho. En la figura se ve que los caudales de NE-2a siempre son mayores a los de NE-5, salvo el período enero-marzo, cuando los dos caudales son parecidos (ver los años 1997, 2001, 2004). En dicho período la cuenca superior aporta la mayoría del caudal de la cuenca de NE-2a. El período ocurre después de la desaparición de la nieve del invierno pasado, y se estima que el caudal representa el aporte glaciar.

Figura 2.2a Caudales Medidos, Estaciones NE-2a y NE-5.



En la Figura 2.2b se presentan los caudales de NE-5 medidos en el período de 1abr2003 – 1abr2004, que representa un año seco extremo y que se considera mostrar bien el caudal del glaciar.

Figura 2.2b Caudales Medidos, Estaciones NE-5, 2003-2004.



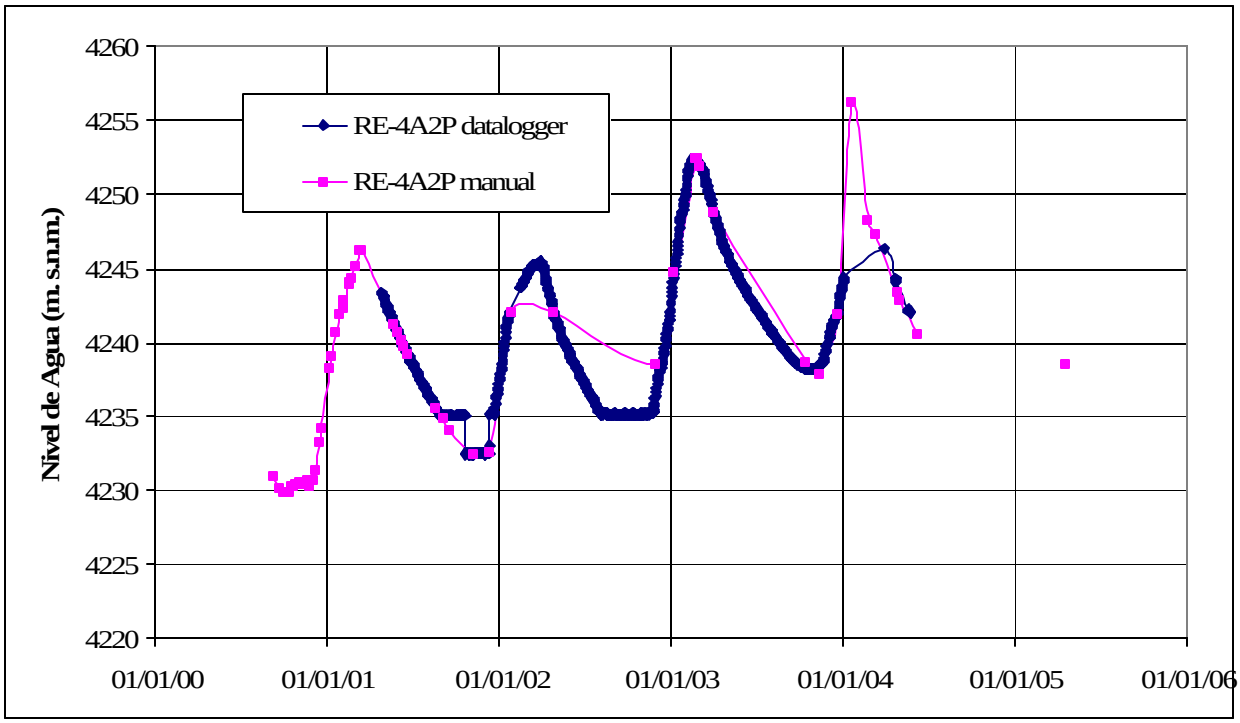
El aporte glaciar al caudal superficial también incluye la infiltración del deshielo glaciar al sistema de agua subterránea, que sostiene el flujo de base. Los datos subterráneos, que se presentan en la sección 2.2, indican que la mayor parte del flujo de base de NE-5 origina como deshielo glaciar infiltrado.

2.2 Agua Subterránea

Se han medido en forma regular desde el año 1998 los niveles de agua subterránea en los tres puntos indicados en la Figura 1.1a. Asimismo, los niveles de agua subterránea se han medido desde el año 2000 en los 22 puntos indicados en la Figura 1.1b. Los niveles medidos varían desde 3660 m snm en el pozo NEV-3 (Figura 1.1a) hasta un promedio de 4350 m snm en el pozo RE-1P en la cuenca superior (Figura 1.1b).

Agua de deshielo infiltra al acuífero de roca fracturada en la parte superior de la cuenca, como se muestra en la Figura 2.3a, que presentan los niveles de agua medidos en el pozo RE-4a2 (Figura 1.1b). Los niveles de agua subterránea suben y bajan en forma estacional, con una fluctuación estacional del orden de 15m, alcanzando a su máximo en febrero-marzo y a su mínimo en octubre-noviembre.

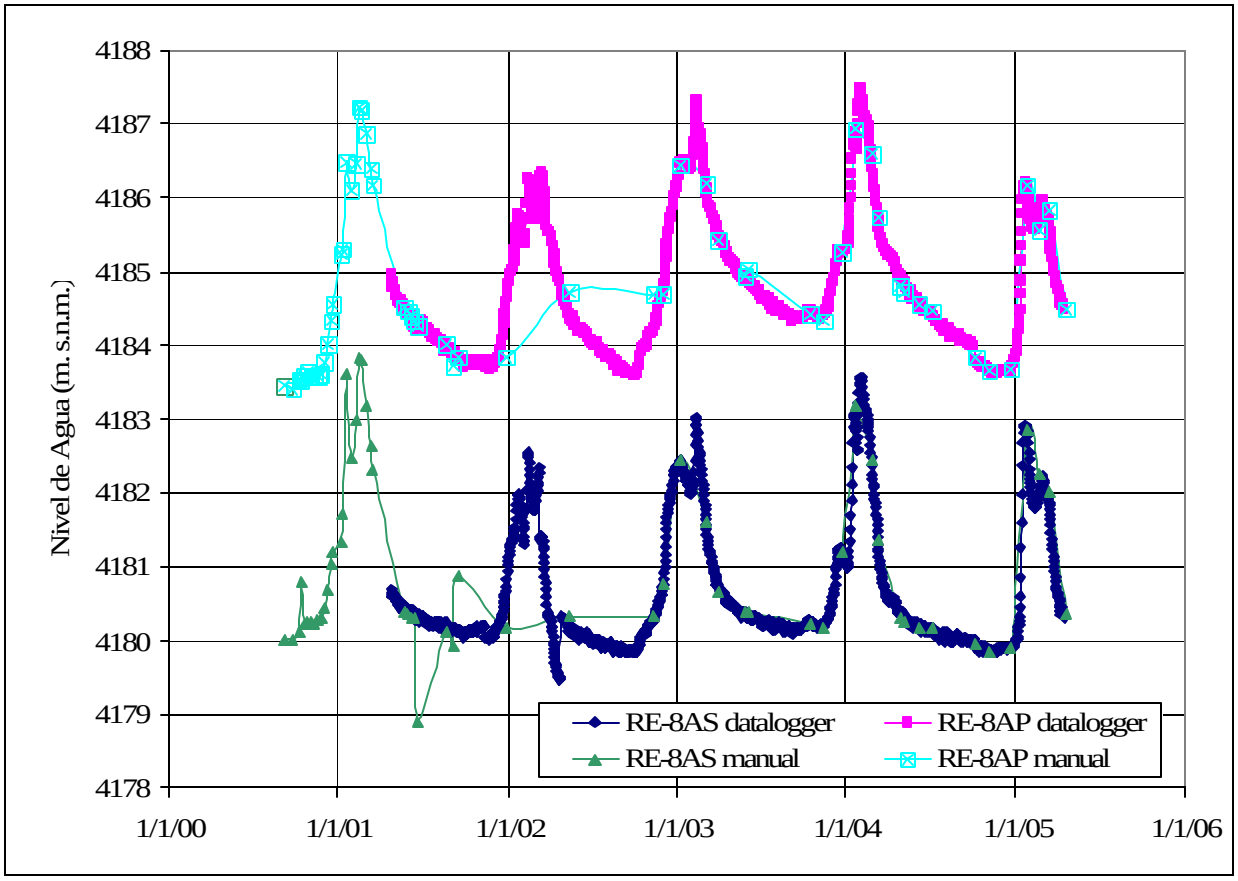
Figura 2.3a. Niveles Medidos de Agua en Pozo RE-4a2



El agua infiltrada fluye hacia aguas abajo, desde la roca fracturada hasta un acuífero aluvial permeable. En la Figura 2.3b se presenta los niveles de agua medidos en el pozo RE-8a (Figura 1.1b), que muestran el gradiente hidráulica hacia arriba, con agua fluyendo de la roca fracturada al acuífero aluvial.

Agua fluye al parte inferior del acuífero aluvial y aflora aguas arriba de NE-5 (Figura 1.1b). En este sector el pozo RE-17 (Figura 1.1b) está surgente por parte del año. Aguas abajo de NE-5 el sistema subterráneo tiene poca permeabilidad (Golder, noviembre de 2005a).

Figura 2.3b. Niveles Medidos de Agua en Pozo RE-8a

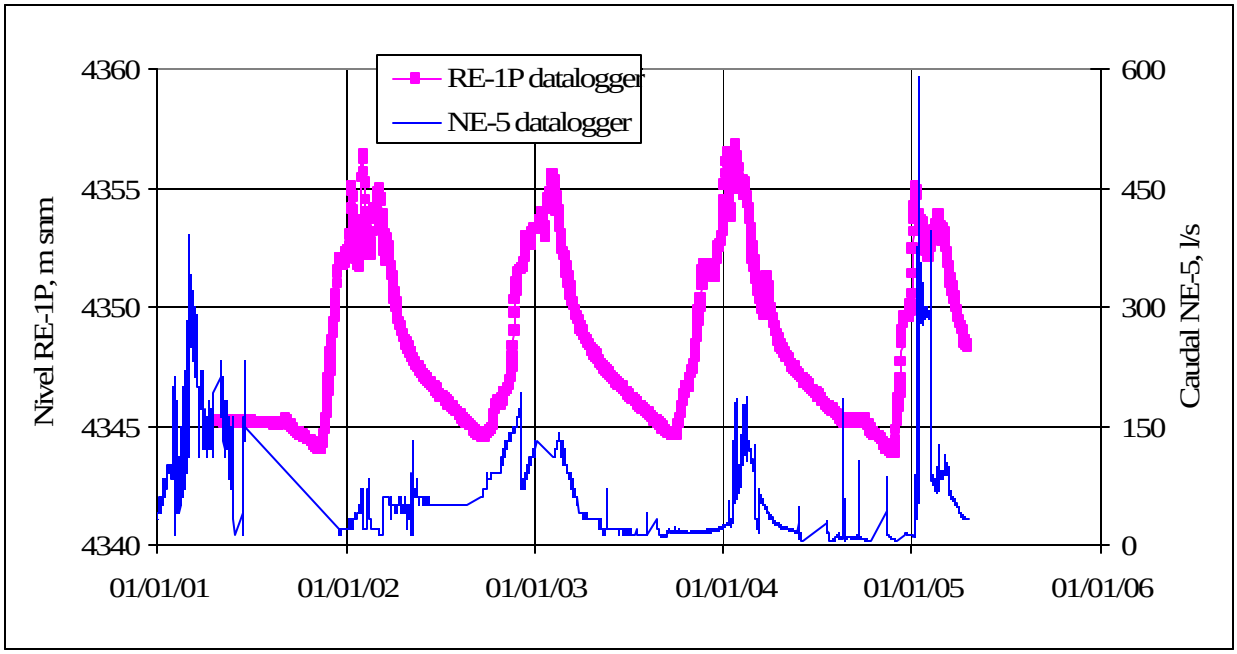


2.2.1 Cuenca Superior

En la Figura 2.4 se presentan los niveles medidos de RE-1P con los caudales de la estación NE-5. El pozo RE-1P está ubicado en la quebrada principal de la cuenca superior, inmediatamente aguas abajo del glaciar (Figura 1.1b). El nivel de RE-1P indica una regulación por el deshielo glaciar, nota la poca diferencia entre el año húmedo de 2002-03 y los otros, secos, años.

Los niveles de RE-1P empiezan a subir en octubre-noviembre, alcanzando a su máximo de 4355 m snm en enero. Los caudales de NE-5, en los años secos, empiezan a subir en enero, coincidente con los niveles máximos de RE-1P, nota los años de 2003-04 y 2004-05 en la Figura 2.4. Parece que, antes de enero, todo el deshielo glaciar infiltra al acuífero de roca fracturada de la cuenca superior. Cuando el acuífero llegue a su capacidad, identificada con el nivel de 4355 m snm en RE-1P, el deshielo glaciar aparece como escurrimiento en NE-5.

Figura 2.4. Niveles de agua de RE-1P con caudales de NE-5.



2.2.2 Pruebas de Acuífero

Los resultados de investigaciones hidrogeológicos son presentados en la Línea Base Hidrogeológico (Golder, noviembre de 2005a). Se resume en la Tabla 2.2 los resultados de las pruebas de bombeo que se han hecho.

Tabla 2.2. Resumen de Resultados de Pruebas de Acuíferos

Fuente	Pozo de Bombeo	Pozo de Observación	Caudal de Bombeo (l/s)	Duración de Bombeo (hr)	Abatamiento (m)	Transmisividad (m^2/dy)	Conductividad Hidráulica (cm/s)
(Terramatrix, 1995)	NEV-1		1.2	1.2	41.0	0.9	4.E-05
	NEV-2		1.2	24.0	12.6	4.8	1.E-04
	NEV-3		2.0	24.0	9.8	10.6	5.E-04
(LBG-Guyton, 2000)	Test Well 1		5.3	2.0	19.0	30.5	9.E-04
		RE-10S			0.6	53.7	
		RE-11B			10.2	27.0	
		RE-10D			2.5	17.6	
		RE-14S			4.0	15.4	

Además de los resultados de la Tabla 2.2, habían analices de sedimentos y pruebas de calicatas de infiltración (Golder, noviembre de 2005a) que indicaron valores más altos de conductividad hidráulica, hasta 1.e-2 cm/s.

2.3 Precipitación

Se ha basado el análisis de precipitaciones en el área del proyecto en las siguientes:

- El Balance Hídrico de Chile (DGA, 1987) estima una precipitación promedia entre 300 y 350 mm/año, basado en la extrapolación de precipitaciones medidas a menores alturas.

- Existe un registro de 24 años de precipitación en la estación de El Indio[2], a una altura de 3869m, 50 km al sur, con un promedio de 173 mm/año. El registro mensual se presenta en la Tabla 2.3.

Tabla 2.3. Precipitaciones Registradas en El Indio

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual (mm)
1981	0.0	0.0	0.0	3.9	0.0	0.3	2.7	20.2	0.0	0.0	0.0	0.0	**27**
1982	0.5	0.5	1.7	0.0	1.8	32.0	45.5	2.0	26.5	3.4	0.0	0.0	**114**
1983	0.0	10.4	0.0	17.2	8.3	22.3	46.5	36.8	0.0	3.2	2.9	10.5	**158**
1984	5.0	5.6	4.0	0.0	3.2	114.7	241.9	26.3	12.4	0.0	1.0	0.0	**414**
1985	0.0	0.0	0.0	0.0	6.2	21.1	49.1	1.6	3.1	18.7	0.0	0.0	**100**
1986	0.0	3.7	1.8	5.1	79.6	29.1	55.2	112.4	0.0	50.7	1.7	0.0	**339**
1987	3.8	2.7	20.9	12.7	146.0	34.4	264.4	201.9	34.9	32.6	0.0	0.0	**754**
1988	0.0	0.9	0.0	0.0	55.8	3.5	2.1	2.6	13.7	0.0	0.0	0.0	**79**
1989	9.8	0.0	0.0	0.0	33.8	4.2	20.0	49.4	1.2	0.0	5.0	4.6	**128**
1990	0.0	0.0	0.0	7.6	1.7	3.8	22.2	7.6	66.1	3.5	0.0	5.5	**118**
1991	0.0	0.0	0.0	2.2	12.9	52.2	20.2	5.6	9.5	0.0	0.0	0.0	**103**
1992	6.0	0.0	11.1	20.0	27.8	94.6	12.7	2.0	0.0	1.7	9.2	0.0	**185**
1993	0.0	0.0	0.0	7.0	40.3	1.4	3.4	10.4	0.0	0.0	0.0	0.0	**63**
1994	0.0	0.0	10.0	1.1	0.2	6.8	49.3	13.1	0.5	0.0	0.0	0.0	**81**
1995	2.8	0.0	0.6	5.8	1.7	0.0	6.1	0.0	29.0	5.5	0.0	13.3	**65**
1996	0.0	0.0	0.8	3.9	0.0	7.1	5.5	23.7	0.0	0.0	0.0	0.0	**41**
1997	0.0	0.0	5.6	0.8	9.9	179.4	34.1	109.0	32.6	7.5	0.0	0.0	**379**
1998	0.0	0.0	4.2	5.2	8.8	32.0	13.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	**64**
1999	0.0	0.0	3.0	5.0	9.9	11.6	0.5	0.0	24.6	18.5	0.0	0.0	**73**
2000	2.5	1.0	0.0	10.3	15.1	53.3	41.4	0.0	10.3	0.0	0.0	0.0	**134**
2001	0.0	4.5	10.2	13.7	13.7	7.2	40.5	46.0	8.2	6.9	0.0	4.8	**156**
2002	0.0	0.0	0.0	4.7	126.3	43.6	187.5	41.9	21.0	0.0	0.0	1.5	**426**
2003	0.0	2.0	0.0	0.9	37.5	10.3	35.7	9.7	0.0	0.0	0.0	0.0	**96**
2004	0.3	2.1	3.0	0.0	2.4	1.2	33.3	3.3	1.8	0.6	12.1	0.0	**60**
promedio	1.3	1.4	3.2	5.3	26.8	31.9	51.4	30.2	12.3	6.4	1.3	1.7	**173**

[2] El registro de 23 años, 1981-2003 (Golder, noviembre de 2005b) fue extendido con los datos de 2004, usando la misma metodología.

- Existe un registro de 4 años en la estación del campamento Pascua, a una altura de 3700m, en la Cuenca del Estrecho. Basado en los pocos datos, se ha estimado (Golder, noviembre de 2005b) una precipitación promedia anual de 212 mm para la estación Pascua.

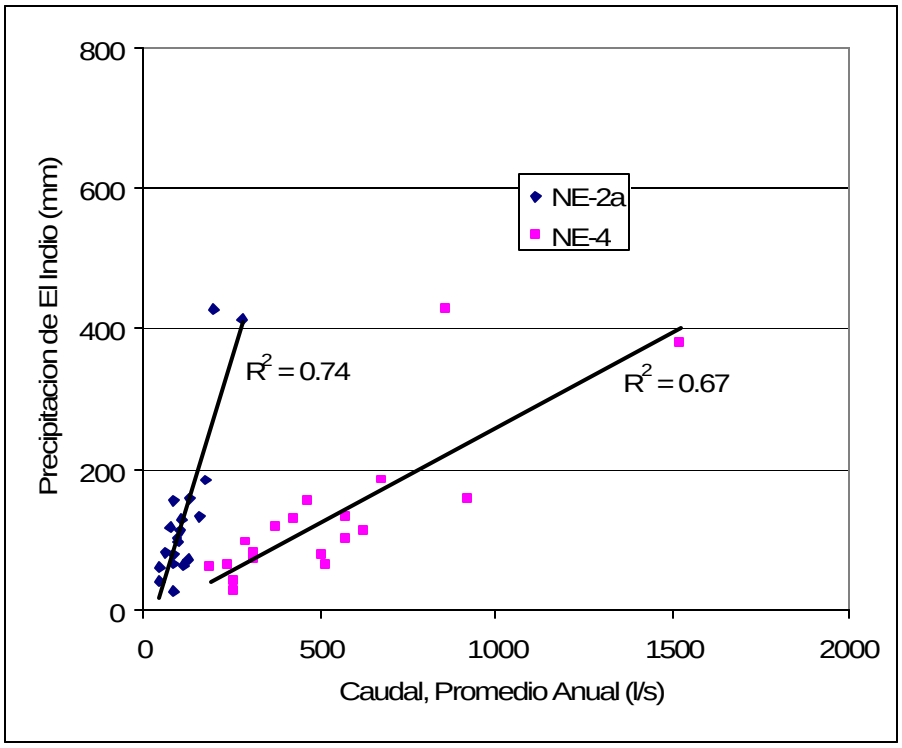
Empleando la pendiente regional del aumento de precipitación con altura (Golder, noviembre de 2005b), se ha extrapolado los datos de la estación Pascua para estimar una precipitación promedia de 258 mm/año para la Hoya Superior del Estrecho, con altura promedia de 4829 m.

2.3.1 Representabilidad del Registro de la Estación El Indio

Dada la corta distancia del área del estudio, y el marco andino similar, la estación de El Indio es considerada un sustituto apropiado para representar el patrón de precipitaciones en la Cuenca del Estrecho. El registro incluye tanto un periodo húmedo prolongado (1983-87), como uno seco (1988-1996).

En la Figura 2.5 se presenta las correlaciones de la precipitación anual de El Indio con los caudales medidos en el Río del Estrecho. Son correlaciones buenas, dado las limitaciones e incertidumbre que presentan este tipo de datos.

Figura 2.5. Correlación de Precipitación Anual de El Indio con Caudal del Río Estrecho

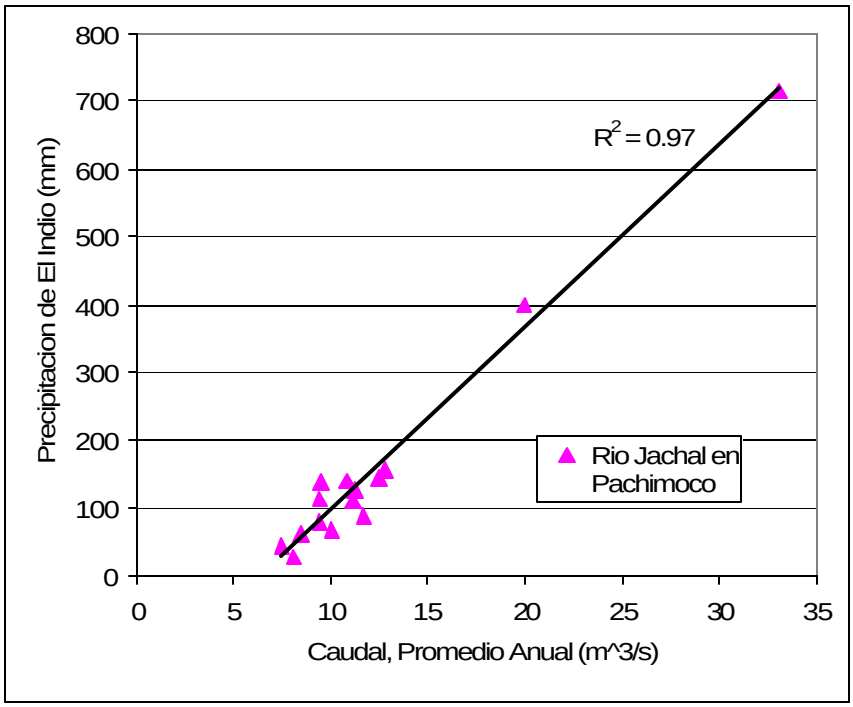


Más que la correlación con los caudales del Río Estrecho, existe una correlación regional entre caudales de agua superficial y la precipitación de la estación El Indio, señalando que existe un patrón regional de precipitación. Se lo puede ver, por ejemplo, en el Balance Hídrico del Río El Toro (Jones, noviembre de 2005), que presenta una correlación buena entre la historia del

balance de masa del glaciar Echaurren (Escobar y Garin, 2005) y la historia de los glaciares del Río El Toro, simulada usando el registro de El Indio.

Por otro ejemplo, en la Figura 2.6 se presenta la correlación de la precipitación de El Indio con el caudal de la estación Pachimoco, ubicado en el Río Jachal aguas abajo del área Argentino del Proyecto. Por lo tanto, se usó el registro de El Indio para caracterizar la precipitación en el modelo hidrológico de las cuencas del lado Argentino (Jones, mayo de 2004).

Figura 2.6. Correlación de Precipitación Anual de El Indio con Caudal del Río Jachal

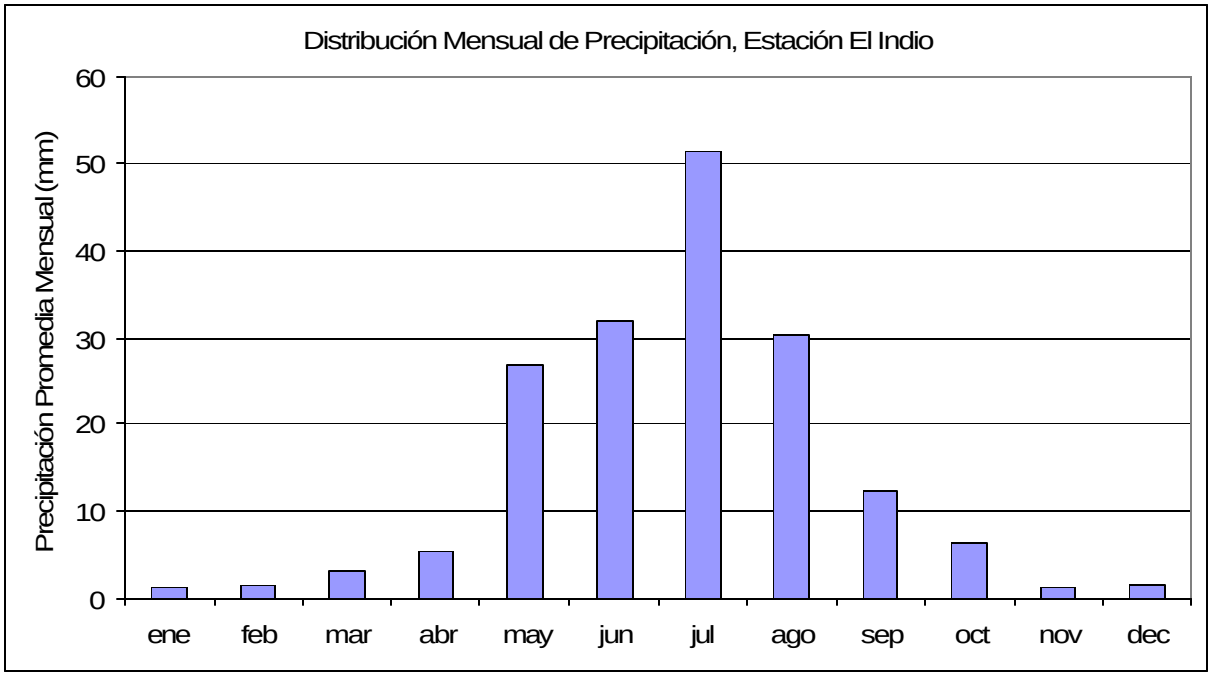


2.3.2 Patrones Temporales de Precipitación

Se presenta los datos de la estación El Indio para caracterizar los patrones de variabilidad estacional y anual de la precipitación regional.

Las precipitaciones en el área del estudio se producen casi en su totalidad en la forma de nieve invernal, como se ve en la Figura 2.7; por lo tanto, el aporte de aguas lluvias al balance hídrico del área de estudio se considera insignificante.

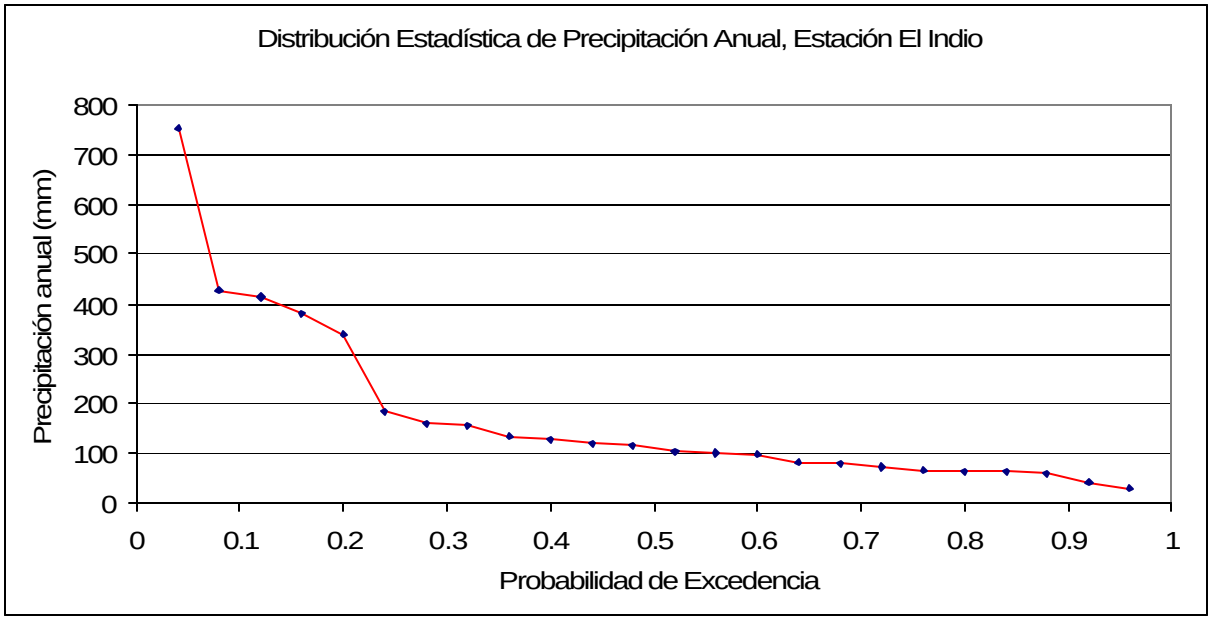
Figura 2.7. Distribución Estacional de la Precipitación.



La precipitación se caracteriza por una secuencia de años secos, interrumpidos por años húmedos (Golder, noviembre de 2005b) que ocurren, por promedio, una vez cada 5 años. Con los datos de la Tabla 2.3 se identifican como húmedos, por ejemplo, los años 1987, 1997 y 2002, con un año medio húmedo en 1992.

En la figura 2.8 se presenta la distribución de la precipitación anual de El Indio. Se muestra un grupo de 19 años secos, con precipitación menor a los 190 mm, y un grupo de 5 años húmedos, con precipitación mayor a los 340 mm. En el registro no hay año intermedio, con precipitación entre los 190 mm y 340 mm.

Figura 2.8. Distribución de la Precipitación Anual.



2.3.3 Modelación de la Precipitación

Para desarrollar el balance hídrico se usó el registro de El Indio como índice para representar la variabilidad temporal de precipitación. Se ajustaron los datos mensuales de El Indio para obtener el promedio anual estimado para cada parte del área del estudio. Estos promedios se estimaron considerando los caudales medidos (Sección 2.1), la variación de precipitación con altura y la variación con aspecto.

Se reconoce que la precipitación aumenta con la altura. Se ha estimado la siguiente relación, desarrollada a partir de datos de precipitaciones regionales (Golder, noviembre de 2005b):

$$\text{Precipitación Media Anual} = 0{,}041 * \text{Altura} + 30 \text{ mm} \qquad (1)$$

Usando la altura promedia de cada parte, con la ecuación (1) se ha calculado la Precipitación Media Anual (PMA) de las hoyas de la Cuenca del Estrecho (Figura 1.1a) y de las unidades hidrológicas de la hoya del Estrecho Superior (Figura 1.3). Las PMA calculadas a partir de la ecuación (1) se presenta en la Tabla 2.4, tanto como las razones de PMA con PMA de El Indio.

Se ajustaron las razones de PMA para representar la variabilidad espacial en la acumulación de nieve, debido a los efectos de sol y viento. Se describe a continuación los ajustamientos a las razones de PMA para las unidades hidrológicas de la hoya del Estrecho Superior (Figura 1.3) que se identifican como relativamente secos o húmedos.

2.3.4 Nieve acumulada en el glaciar

Los sectores de glaciares representan lugares preferentes para la acumulación de nieve (Golder, noviembre de 2005c). En consecuencia, la razón calculada para el valor de PMA correspondiente al sector del glaciar se ajustó durante el desarrollo del modelo, para obtener un

nivel de precipitación que concuerde con el aporte glaciar observado (Figura 2.2b) y con una pérdida de masa de hielo razonable por el período 1981-2004, considerando datos de otros glaciares regionales (Ginot et al, 2001, Escobar y Garin, 2005) y los glaciares de la cuenca vecina del Río El Toro (Golder, noviembre de 2005c).

Cabe señalar que no existen actualmente datos para uso en la elaboración de una estimación más detallada del balance hídrico del glaciar Estrecho. No obstante, el valor de PMA no influye la simulación de los caudales que aporta el glaciar, solo de la acumulación y pérdida de masa de hielo almacenado (Sección 3.1, ecuación 1).

2.3.5 Partes Secas de la Cuenca

La Unidad de Canal Sur (Figura 1.3) está conformada de una ladera con exposición hacia el norte en donde las acumulaciones de nieve se producen en cantidades mucho menores que en otras laderas con exposición orientada hacia el sur.

La Unidad de Rajo (Figura 1.3) también consiste en una ladera con exposición hacia el norte, en donde las acumulaciones de nieve se producen en cantidades mucho menores que en otras laderas con exposición orientada hacia el sur.

La Unidad de Aguas Arriba (Figura 1.3) abarca una silla ubicada en la divisora internacional, en donde la nieve acumula en cantidades reducidas por el efecto del viento.

En consecuencia, se disminuyó la razón de PMA para los casos de las Unidades de Canal Sur, Rajo y Aguas Arriba, con el fin de simular el contraste observado entre los sectores más húmedos y los más secos dentro de la cuenca. Dado que el contraste no está cuantificado, se especificó una disminución razonable, que represente un contraste, pero conservador, que asume un aporte significativo de los áreas secos. También se guió la especificación realizando una calibración con los caudales medidos de agua superficial y con los niveles medidos de agua subterránea. En el modelo calibrado se especificó una disminución de 1/3, como se presenta en la Tabla 2.4.

2.3.6 Precipitación Concluida

En la Tabla 2.4 se presentan las razones de PMA ajustadas. Se obtuvo como resultado una razón de PMA para la Cuenca Superior del Estrecho en forma global equivalente a 1,5 veces los valores de precipitaciones registrados en El Indio, esto es, en un nivel de 283 mm/año.

Tabla 2.4. Precipitaciones Estimadas para las Hoyas Hidrográficas del Área de Estudio

Cuenca/Subcuenca	Altura Promedia (m snm)	Precipitación Anual Promedia (Ecuación 1) (mm)	Area (km^2)	Razón de PMA con El Indio (Ecuación 1)	Razón de PMA, (Ajustada)
El Indio	3869	189		1.00	1.00
Estrecho Superior					
Canal Norte (Glaciar)	5200	243	2.0	1.3	4.5
Canal Norte (No Glaciada)	5200	243	3.5	1.3	1.3
Canal Sur	4600	219	2.0	1.2	0.8
Rajo	5000	235	2.2	1.2	0.8
Aguas Arriba	4800	227	1.4	1.2	0.8
Botadero	4450	212	3.3	1.1	1.1
Aguas Abajo	4300	206	1.2	1.1	1.1
Promedio, Estrecho Superior			15.5	1.2	1.5
Estrecho en Medio	4300	206		1.1	1.1
Barriales	4550	217		1.1	1.1
Estrecho Inferior	4000	194		1.0	1.0
La Falda	4200	202		1.1	1.1
Estrecho Más Inferior	3350	167		0.9	0.9

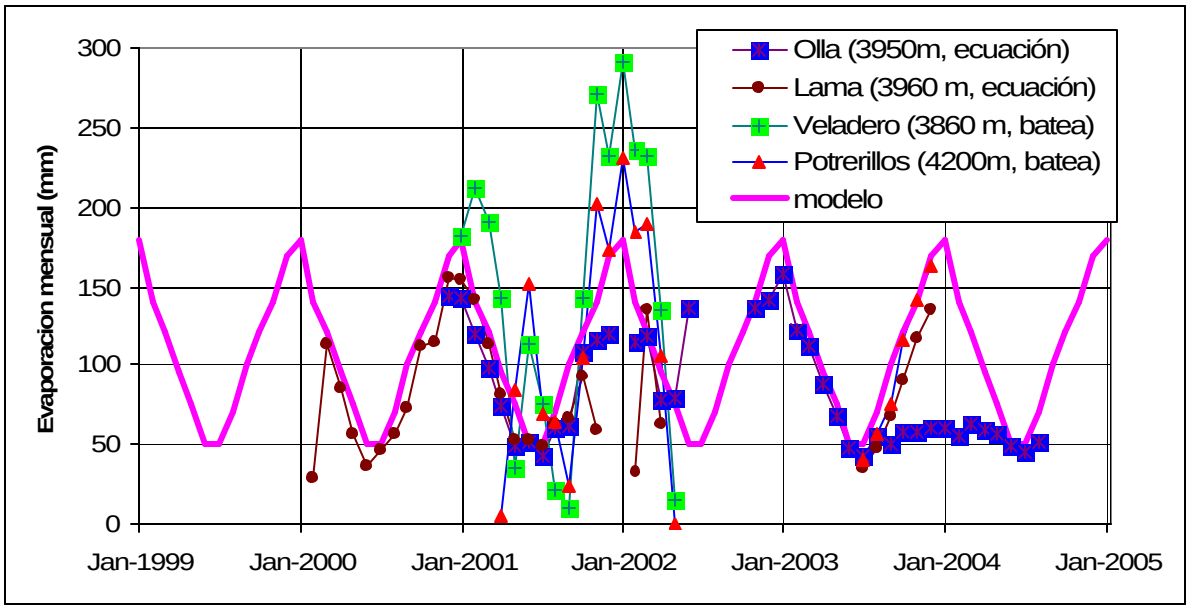
2.4 Evaporación y Sublimación

Se ha calculado el potencial de evaporación en base de los parámetros meteorológicos medidos en la Cuenca del Estrecho desde el año 1999 en la estación meteorológico La Olla. Además, se han realizado los mismos cálculos en base de las mediciones de la estación Lama, ubicada en la cuenca vecina del Río de Las Taguas en Argentina.

Se ha medido directamente la evaporación de batea en las estaciones Veladero y Potrerillos en la cuenca vecina del Río de Las Taguas en Argentina (KP, 2002). Es considerado que la evaporación de batea sobre-estima la evaporación potencial, del orden de 20-30% (Farnsworth and Thompson, 1982). Los datos de evaporación se presentan en la Figura 2.9.

En base de las mediciones de evaporación se ha estimado un promedio mensual que también se presenta en la Figura 2.9. La estimación (modelo) del promedio mensual, alcanzando al máximo de 175 mm/mes en Diciembre-Enero y al mínimo de 50 mm/mes en Junio-Julio, con un total de 1.310 mm/año, comporta bien con los datos medidos. Se usa el modelo de evaporación potencial para la computación de la sublimación.

Figura 2.9. Evaporación Potencial Medido y Modelado



La sublimación se define como la evaporación de nieve en forma directa. Se ha estimado un ritmo máximo de sublimación del orden de un 35% de los valores de evaporación potencial, sobre la base de las siguientes consideraciones:

1. Las pérdidas por procesos de sublimación se midieron sobre un período de 6 días a mediados del mes de Febrero del año 1999 en el glaciar Tapado, ubicado a unos 90 km al sur del área del Proyecto (Ginot et al, 2001). Los resultados indicaron una sublimación de 1.9 mm/día en promedio, o 53 mm/mes, lo que es el equivalente a un 38% del ritmo de evaporación potencial para el mes de Febrero (140 mm) indicado en la Figura 2.9.

2. En un estudio posterior de modelación (Kull et al, 2002), se estimaron los valores de sublimación del glaciar Tapado, por el período de Septiembre de 1998 a Febrero 1999, a un nivel de 320 mm. Esto es un 38% de la evaporación potencial del mismo periodo (850 mm) indicado en la Figura 2.9.

3. Se ha simulado el valor de sublimación en bancos de nieve ubicados en la cuenca vecina del Arroyo Canito en Argentina en un 33% del nivel correspondiente de evaporación potencial (Zhan, 2002).

Los valores de sublimación real se simularon con 35% de la evaporación potencial de la Figura 2.9 (y la Tabla 3.1b), ajustándola para reproducir la variabilidad de sublimación con cobertura de nieve.

Para acumulaciones grandes de nieve, se estimó la sublimación a un 35% de la evaporación potencial. Para acumulaciones menores, se redujo el porcentaje, considerando que los niveles de acumulación de nieve no son uniformes en todas partes y que en el caso de las acumulaciones menores se presenta una cobertura parcial de nieve, con las mayores acumulaciones en los lugares más abrigados del viento y más protegidos de la exposición al sol.

Los detalles específicos de los aspectos incorporados en el modelo de sublimación se determinaron a partir de calibración a los valores medidos de descarga desde la cuenca, dando como resultado las siguientes especificaciones:

- Para las hoyas presentadas en la Figura 1.1a, como también para las unidades hidrológicas (Figura 1.3) de Canal Norte, Botadero y Aguas Abajo, se especificó un nivel máximo de 35% de la evaporación potencial, para acumulaciones de nieve superiores a los 400 mm de agua equivalente. Para acumulaciones menores se especificó un valor menor, proporcional a la acumulación de nieve, desde 35% con 400 mm de agua equivalente, tendiendo a un valor mínimo de 5% de evaporación potencial.

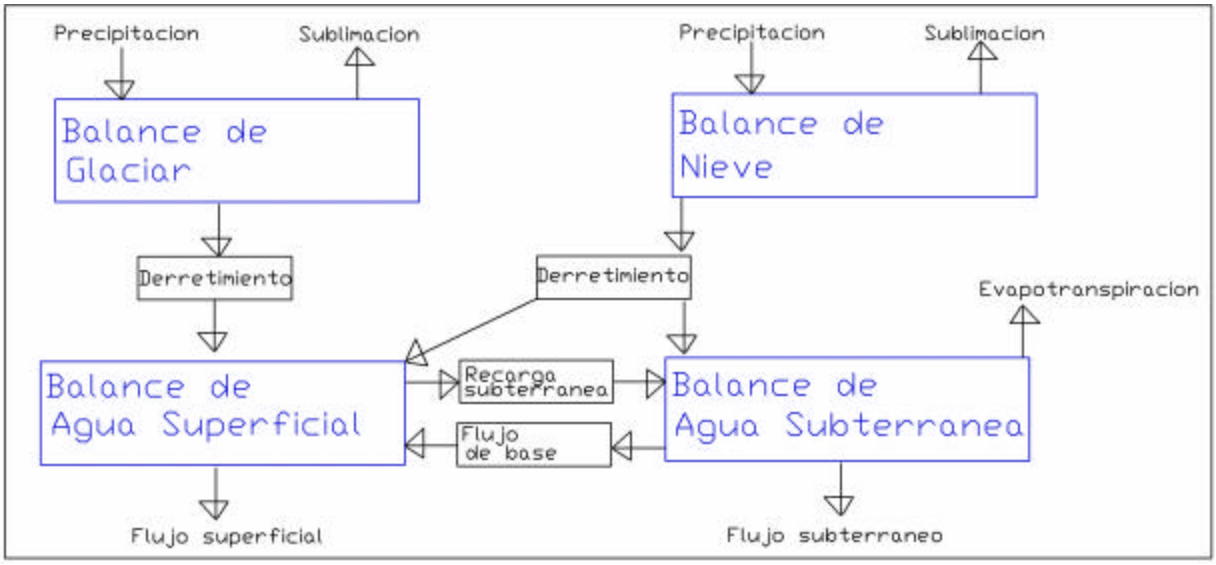
- Para el caso de las unidades más expuestas al sol y viento, (Figura 1.3), incluyendo las Unidades de Canal Sur, Rajo y Aguas Arriba, se especificó un nivel máximo de 35% de la evaporación potencial, para acumulaciones de nieve superiores a los 400 mm de agua equivalente. Para acumulaciones menores se especificó un valor proporcional a la acumulación, desde 35% con 400 mm de agua equivalente, tendiendo a un valor mínimo de 10% de evaporación potencial.

Los valores de sublimación mínima (5% y 10% de evaporación potencial) fueron especificados para producir un modelo que, en las partes secas de la cuenca, simule una sublimación más fuerte, con un aporte de agua menor, que en las partes más húmedas. Con los valores especificados, las 3 sub-cuencas secas del Estrecho Superior aportan un promedio anual de 43 mm de fusión, con un promedio de 100 mm de sublimación. Las otras partes de la cuenca aportan un promedio anual de 95 mm de fusión, con un promedio de 96 mm de sublimación.

3 ESTRUCTURA Y DESARROLLO DEL MODELO

El modelo hidrológico se compone de diversos balances hídricos diferentes que están relacionados entre sí según se muestra en la Figura 3.1. Los balances de nieve reflejan los procesos de acumulación, sublimación y fusión de las precipitaciones en diferentes partes de la cuenca. El balance hídrico del glaciar refleja los mismos componentes más uno de almacenaje de hielo. Finalmente, los balances hídricos de aguas superficiales y de aguas subterráneas reflejan los escurrimientos de agua de deshielo a través de la Cuenca del Estrecho hasta sus sectores de descarga.

Figura 3.1. Diagrama Esquemático de Balances Hídricos



Los balances hídricos se han desarrollado mediante uso de un grupo de planillas de cálculo, apoyado por un modelo numérico que ha sido elaborado mediante uso del programa en lenguaje Fortran denominado MODFLOW (McDonald y Harbaugh, 1988). Los componentes de fusión calculados para los balances hídricos de nieve y de glaciares se alimentan al modelo numérico, que se emplea luego para calcular los demás componentes de los balances hídricos de aguas superficiales y de aguas subterráneas.

Se elaboraron balances hídricos para cada uno de las seis hoyas hidrográficas de la Cuenca del Estrecho definidas en la Figura 1a. Adicionalmente, en relación con la Hoya Superior del Estrecho, se confeccionaron balances de nieve por separado para el caso de cada uno de las seis unidades hidrológicas mostradas en la Figura 1.3, además de un balance hídrico

correspondiente al glaciar Estrecho. Se describen a continuación los parámetros utilizados para el desarrollo de los balances hídricos correspondientes a nieve, glaciares, aguas superficiales y aguas subterráneas.

3.1 Balances Hídricos de Nieve y Glaciares

El escurrimiento de aguas superficiales y la recarga de aguas subterráneas se han estimado mediante uso de un modelo de acumulación, sublimación y fusión de nieve elaborado en planillas de cálculo. Las interrelaciones entre la acumulación de nieve y los procesos de sublimación y de fusión de nieve se describen por medio de la siguiente ecuación (1):

$$S_k = S_{k-1} + P_k - E_k - M_k \qquad (1)$$

Donde:

S_k = almacenamiento de nieve para el mes k

P_k = precipitaciones

E_k = sublimación

M_k = fusión de nieve. El término M_k se utiliza para generar una entrada al modelo numérico, el cual calcula los balances hídricos de aguas superficiales y aguas subterráneas.

La Ecuación (1) se ha empleado para describir el balance mensual de nieve para cada una de las unidades hidrográficas mostradas en la Tabla 2.4.

Cabe notar que los balances hídricos de nieve y de los glaciares presentan características similares, salvo que las acumulaciones de precipitación son mayores en los glaciares, y los deshielos son regulados por el almacenamiento de hielo. Los balances de nieve representan la acumulación y fusión de la precipitación anual, mientras el balance de hielo representa la acumulación y ablación del recurso perenne de hielo almacenado.

Se calculó los balances en base de los analices de precipitación y sublimación que se presentó anteriormente en el Capitulo 2. A continuación se presenta el modelo de fusión, que se permite unir los componentes de la ecuación (1) y calcular los caudales que alimentan a los sistemas de aguas superficiales y subterráneas.

3.1.1 Agua de Deshielo

El agua de deshielo se estima como una fracción del valor potencial de agua de fusión, ajustado por los niveles de cobertura de nieve presente, acotado en todo caso por un límite impuesto por la cantidad disponible de agua sólida para fundir.

Se utilizó una formula relativamente simplificada para representar el proceso de derretimiento, promediado sobre cada parte de la cuenca. El valor potencial de fusión se estimó a partir de los datos de temperatura, radiación solar, cobertura de nubes y albedo haciendo uso del componente de onda total de radiación correspondiente a la ecuación generalizada para fusión de nieve (U.S. Army Corps of Engineers, 1998), según la siguiente expresión:

$$M = (3.08*Rad)*(1-A) + [(1-N)* (0.969*T - 21.34) + N*(1.33*T)] \qquad (2)$$

Donde:

M = ritmo potencial de fusión de nieve (mm/día)

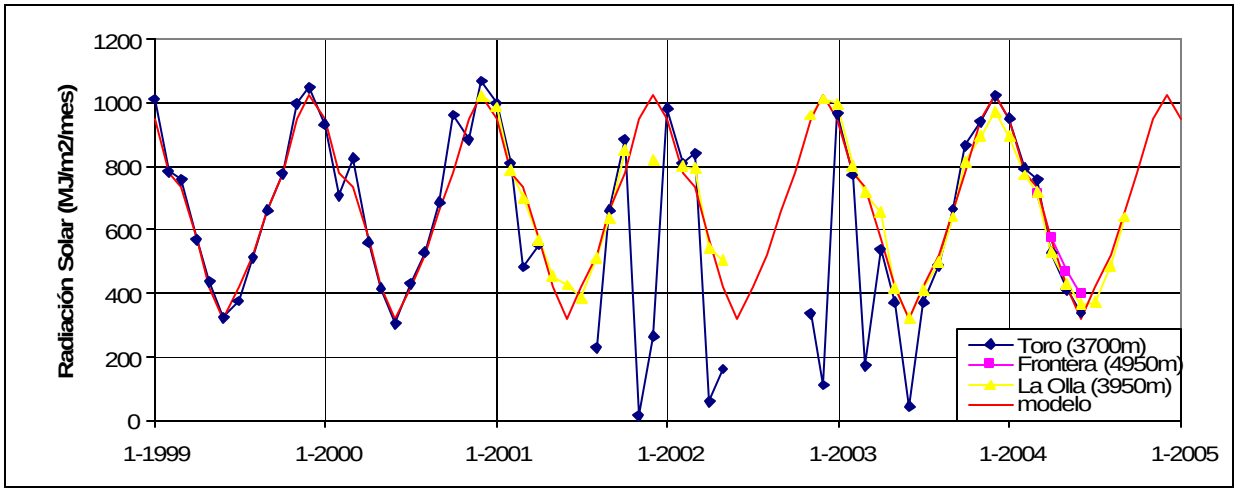
Rad = radiación solar (MJ/m^2/día)

A = albedo, expresado como fracción decimal
N = cobertura de nubes, expresada como fracción decimal
T = temperatura del aire (^{o}C)

Los parámetros de radiación solar y temperatura fueron representados con valores promedios mensuales obtenidos de los datos meteorológicos. Se calibró el parámetro de albedo para reproducir los meses y las cantidades en que se observan los deshielos anuales.

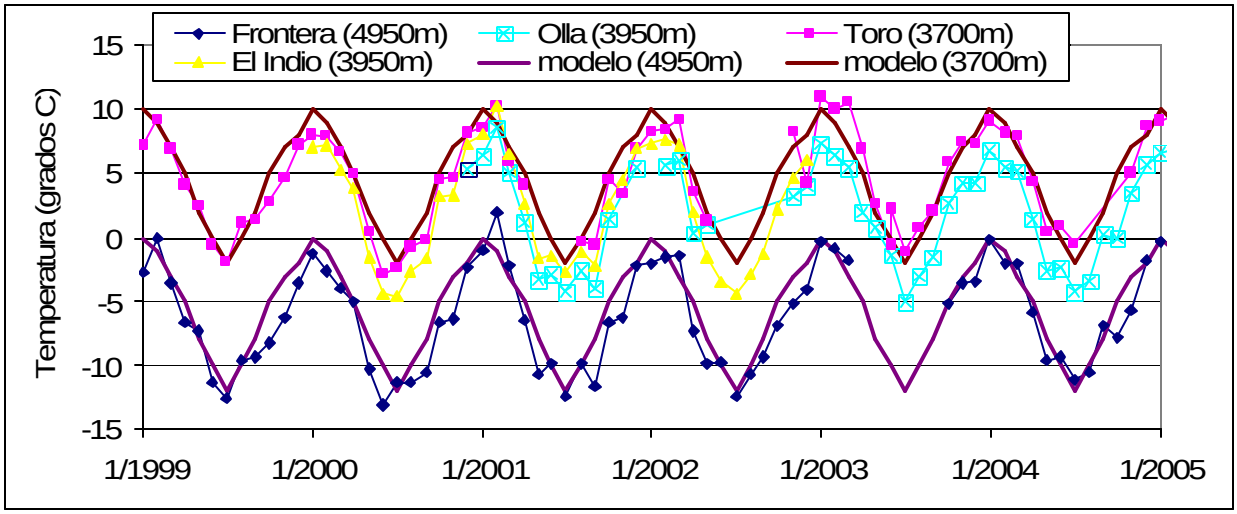
Se han medido la radiación solar en la Cuenca del Estrecho desde el año 1999 en las estaciones Frontera y La Olla, y en la estación El Toro ubicada en la cuenca contigua del Río El Toro. Se presentan los datos en la Figura 3.2 junto con la promedia estimada, que se entrega al modelo. Cabe indicar que los valores modelados de radiación solar mostrados en la Figura 3.2 se presentan también en la Tabla 3.1a a continuación.

Figura 3.2. Valores Medidos y Modelados de Radiación Solar



Los valores mensuales de temperatura se estimaron a partir de valores medidos en las estaciones meteorológicas, según se muestran en la Figura 3.3. Cabe destacar que la temperatura se estimó en función de la altura, con disminuciones de 8,15°C por cada aumento de 1.000 m de altura. Se presentan las temperaturas promedios mensuales estimados, por cada parte de la cuenca del estudio, en la Tabla 3.1b.

Figura 3.3. Valores Medidos y Modelados de Temperatura



Los valores mensuales de albedo se estimaron mediante aplicación de valores razonables, establecidos para que fueran concordantes con el esquema temporal observado en los ciclos de crecida y estiaje registrados en los cursos de agua medidos, con el valor mínimo de albedo presente en el verano y el valor máximo en el invierno. Los valores modelados para este parámetro se presentan en la Tabla 3.1a.

Los valores estimados de cobertura de nubes se consideraron en niveles de un 25% en los meses de verano y un 35% en los meses de invierno, según lo indicado en la Tabla 3.1a.

En la Tabla 3.1b se presenta los valores potenciales de fusión, calculados para las hoyas hidrográficas del área de estudio.

Tabla 3.1a. Parámetros Climáticos Modelados

Mes	Evaporación Potencial (mm/mes)	Radiación Solar (MJ/m^2/mes)	Albedo ()	Nubosidad ()
may	75	420	0.84	0.35
jun	50	320	0.84	0.35
jul	50	420	0.84	0.35
ago	70	520	0.84	0.35
sep	100	660	0.84	0.30
oct	120	780	0.84	0.25
nov	140	950	0.84	0.25
dic	170	1020	0.75	0.25
ene	180	950	0.60	0.25
feb	140	780	0.50	0.25
mar	120	730	0.66	0.25
abr	95	570	0.80	0.25
Anual	1310	8120		

Tabla 3.1b. Valores Modelados de Temperatura y Fusión Potencial

	Estrecho Superior											
	Canal Norte		Canal Sur		Rajo		Aguas Arriba		Botadero		Aguas Abajo	
	Altura (m)	5200	Altura (m)	4600	Altura (m)	5000	Altura (m)	4800	Altura (m)	4450	Altura (m)	4300
Mes	temperatura (grados C)	deshielo potencial (mm)	temperatura (grados C)	deshielo potencial (mm)	temperatura (grados C)	deshielo potencial (mm)	temperatura (grados C)	deshielo potencial (mm)	temperatura (grados C)	deshielo potencial (mm)	temperatura (grados C)	deshielo potencial (mm)
may	-10	0	-5	0	-9	0	-7	0	-4	0	-3	0
jun	-12	0	-7	0	-11	0	-9	0	-6	0	-5	0
jul	-14	0	-9	0	-13	0	-11	0	-8	0	-7	0
ago	-12	0	-7	0	-11	0	-9	0	-6	0	-5	0
sep	-10	0	-5	0	-9	0	-7	0	-4	0	-3	23
oct	-7	0	-2	134	-6	11	-4	72	-1	180	0	226
nov	-5	109	0	293	-4	170	-2	232	1	339	2	385
dic	-4	306	1	648	-3	368	-1	587	2	537	3	740
ene	-2	924	3	816	-1	986	1	754	4	1155	5	908
feb	-3	917	2	1102	-2	979	0	1040	3	1148	4	1194
mar	-5	405	0	589	-4	466	-2	528	1	636	2	682
abr	-7	0	-2	101	-6	0	-4	39	-1	147	0	193

	Estrecho Intermedio		**Barriales**		**Estrecho Inferior**		**La Falda**		**Estrecho Inferior Extremo**	
	Altura (m)	4300	Altura (m)	4550	Altura (m)	4000	Altura (m)	4200	Altura (m)	4000
Mes	temperatura (grados C)	deshielo potencial (mm)	temperatura (grados C)	deshielo potencial (mm)	temperatura (grados C)	deshielo potencial (mm)	temperatura (grados C)	deshielo potencial (mm)	temperatura (grados C)	deshielo potencial (mm)
may	-3	0	-5	0	0	0	-2	0	0	0
jun	-5	0	-7	0	-2	0	-4	0	-2	0
jul	-7	0	-9	0	-4	0	-6	0	-4	0
ago	-5	0	-7	0	-2	0	-4	0	-2	0
sep	-3	23	-5	0	0	114	-2	53	0	114
oct	0	226	-2	149	3	318	1	257	3	318
nov	2	385	0	308	5	478	3	416	5	478
dic	3	740	1	506	6	833	4	771	6	833
ene	5	908	3	1124	8	1001	6	939	8	1001
feb	4	1194	2	1117	7	1286	5	1225	7	1286
mar	2	682	0	605	5	774	3	712	5	774
abr	0	193	-2	116	3	285	1	224	3	285

Los valores de fusión real se simularon con la fusión potencial de la Tabla 3.1b, ajustándola para reproducir la variabilidad de fusión con cobertura de nieve y calibrándola para reproducir los caudales medidos y su distribución estadística (Golder, noviembre de 2005b).

Tratándose de las acumulaciones mayores de nieve, el valor de fusión actual se estimó en un 20% de los valores potenciales de fusión presentados en la Tabla 3.1b. Esta formula reproduce la magnitud de caudales que indican los datos y la Línea Base Hidrológico (Golder, noviembre de 2005b).

Para acumulaciones menores de nieve, se estima un valor de fusión menor, considerando que los niveles de acumulación de nieve no son uniformes en todas partes y que en el caso de las acumulaciones menores se presenta una cobertura parcial de nieve, con las mayores acumulaciones en los lugares más protegidos de la exposición al sol.

Se especificó un nivel máximo de 20% de la fusión potencial, para acumulaciones de nieve superiores a los 400 mm de agua equivalente. Para acumulaciones menores se especificó un valor proporcional a la acumulación, desde 20% con 400 mm de agua equivalente, tendiendo a cero.

3.1.2 Calibración del Balance

La información disponible para la calibración del modelo de fusión es la magnitud y variación estacional de los caudales superficiales, considerando los componentes de flujo basal y escurrimiento. El caudal de escurrimiento consiste en la parte variable, que aporta la nieve anual, y la parte regulada, que aporta el hielo almacenado. En esta cuenca tan pequeña y precipitosa, los caudales de fusión entran rápidamente al río y corresponden fuertemente con los caudales medidos.

La calibración del modelo de fusión involucró los parámetros de precipitación (Tabla 2.4), de sublimación (parte final de Sección 2.4), de albedo (Tabla 3.1a) y de derretimiento (parte final de Sección 3.1.1). El balance de nieve y hielo no pretende de cuantificar con precisión los varios parámetros, que representan valores para toda la cuenca y no representan en detalle los procesos físicos. El balance reproduce el comportamiento neto observado en la cuenca.

El producto final de los balances de nieve y glaciar es una serie de caudales que forman las condiciones de borde del modelo numérico. Los caudales simulados tiene el rango, probabilidades de ocurrencia y distribución estacional similares a las mismas características de los caudales medidos. En el Capítulo 5 se compararán las distribuciones de los caudales simulados con las distribuciones estimadas en la Línea Base Hidrológico (Golder, noviembre de 2005b).

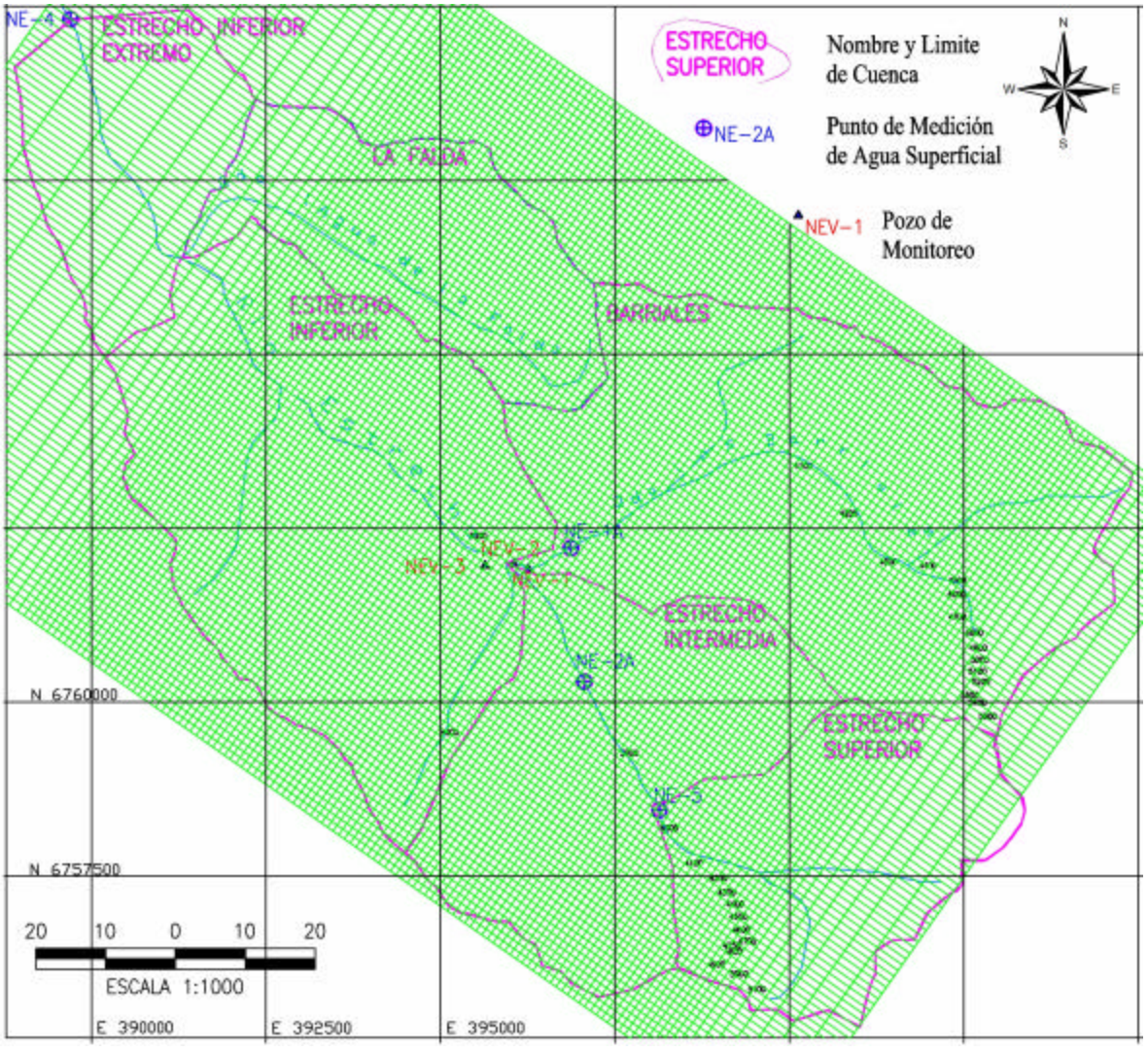
El propósito del balance de nieve y glaciar es presentar un mecanismo razonable para calcular los caudales de deshielo, para entregar al modelo numérico. Los resultados del modelo dependen en los simulados caudales de fusión y no en los simulados niveles de precipitación y sublimación. Por lo tanto, en el Capítulo 8 se examina la sensibilidad de los resultados del modelo a los caudales entregados como condiciones de borde, sin preocuparse con los detalles de precipitación y sublimación.

3.2 Modelo Numérico

Se han simulado los flujos de aguas superficiales y subterráneas mediante uso del modelo numérico que se describe a continuación. Los procesos hidrológicos del área de estudio se representan mediante uso de una malla de celdas rectangulares, según se muestra en la Figura 3.4. Esta malla está dispuesta con 109 filas, 132 columnas y 3 niveles. Las dimensiones de cada celda en el sentido horizontal van desde los 100 m en la cercanía de las instalaciones mineras hasta los 900 m en los sectores más alejados.

El nivel 1 representa los sedimentos saturados, con el fondo del nivel definido por la superficie de roca indicado en los datos de perforación. La potencia del nivel 1 varía entonces desde cero hasta unos 10's de m. El nivel 2 representa la parte superior de la roca, que es más fracturada que la parte inferior, el nivel 3. Los niveles 2 y 3 son definidos sin la especificación de potencia. Se considera una potencia nominal de los niveles 2 y 3 del orden de 50 m y 200 m, respectivamente.

Figura 3.4. Malla del Modelo



El programa computacional utilizado con el modelo numérico es una versión del programa Modular MODFLOW en Tres Dimensiones para Simulación de Flujos de Agua Subterránea mediante la Técnica de Diferencias Finitas del Servicio Geológico del Gobierno de Estados Unidos (U.S. Geological Survey Modular Three-Dimensional Finite Difference Ground-Water Flow Model, MODFLOW) (McDonald y Harbaugh, 1988). Asimismo, Jones (1998a, 1998b, 1999) ha documentado modificaciones al programa MODFLOW original. Entre las entradas al modelo hay dos tipos: (1) los parámetros hidráulicos que controlan el flujo del agua dentro de los confines del dominio del modelo, y (2) las condiciones de borde que controlan los aportes y salidas de agua hacia y desde dicho dominio.

Se ingresan al modelo numérico los respectivos valores de deshielos derivados de los balances hídricos de nieve y glaciar. Acto seguido, el modelo se utiliza para representar los siguientes componentes del sistema hidrológico:

- Flujo y almacenamiento de aguas subterráneas dentro del área de estudio
- Escurrimiento y caudal de aguas superficiales y caudales de flujo entre aguas superficiales y subterráneas
- Recargas de aguas subterráneas
- Evapotranspiración de aguas subterráneas

Se han representado en el modelo los procesos de flujo y de almacenamiento de aguas subterráneas mediante uso del módulo de MODFLOW denominado Flujos Centrados en Bloques - BCF (sigla por Block Centered Flow) (McDonald y Harbaugh, 1988). El módulo BCF emplea un algoritmo de diferencias finitas para resolver ecuaciones descriptivas de flujo de aguas subterráneas. Las entradas necesarias para el módulo BCF consisten en parámetros de acuífero, incluyendo valores de conductividad hidráulica y/o de transmisividad, de rendimiento específico y/o coeficiente de almacenamiento y de anisotropía vertical.

Los escurrimientos y caudales de aguas superficiales como también los flujos entre cuerpos de aguas superficiales y subterráneas se han representado en el modelo mediante uso del módulo Rivers 2 (RIV2) (Miller, 1989 y Jones, 1998a). La red fluvial en el área de estudio se representa como un conjunto de nodos fluviales ensamblados para conformar tramos de río. Los tramos se vinculan entre sí en orden sucesiva hacia aguas abajo. Los parámetros de nodo fluvial que deben especificarse son los de cota de curso de agua, conductancia de lecho fluvial y ritmo máximo de infiltración por el lecho fluvial. El escurrimiento afluente a cada tramo de río se estima mediante los balances hídricos de nieve y glaciar, descrito más arriba, y el resultado es ingresado al modelo numérico.

La recarga de agua subterránea se ha representado en el modelo mediante uso del módulo Recarga (RCH – sigla por Recharge) (McDonald y Harbaugh, 1988). Se incluye en el concepto de recargas de aguas subterráneas tanto la infiltración de agua por efectos de precipitaciones y de deshielo directamente, como la infiltración de escurrimientos de aguas superficiales desde cursos de agua menores de tipos que no se han representado explícitamente en el modelo. El volumen de recarga se estima mediante los balances hídricos de nieve descrito más arriba, ingresándose el resultado al modelo numérico.

La evapotranspiración (ET) de aguas subterráneas desde sectores de vegas y otros lugares que presentan aguas subterráneas a poca profundidad se ha representado en el modelo haciendo uso del módulo Evapotranspiración (EVT – sigla por Evapotranspiration) (McDonald y Harbaugh, 1988). Los valores de ET simulados son proporcionales a la profundidad a la napa

desde la superficie del terreno. Para aquellos casos en que la cota de la superficie de la napa se encuentra a una cota igual o superior a la de la superficie del terreno, los valores adoptados para ET se aumentan al ritmo máximo. Cuando la superficie de la napa se encuentra a una cota inferior a la de la superficie del terreno, en cambio, los valores de ET se disminuyen en forma lineal hasta alcanzar un valor de cero a la profundidad de extinción del fenómeno. Al encontrarse la superficie de la napa a una cota inferior a la profundidad de extinción, el valor correspondiente de ET relejado es de cero. Entre los parámetros de entrada necesarios se incluyen los valores de nivel de la superficie, de la tasa máxima de ET (evaporación potencial) y de la profundidad de extinción del fenómeno de ET, correspondiente a cada nodo empleado en el módulo EVT.

3.2.1 Flujos de Aguas Subterráneas y Características de Acuíferos

Para los fines de especificar los parámetros de acuífero en los niveles 1 y 2 del modelo, el área abarcada por el modelo se divide en zonas, según se muestran en las Figuras 3.5a y 3.5b, de manera de representar las unidades de material aluvial, roca sólida y roca fracturada. Los parámetros de acuífero correspondiente al nivel 3 del modelo se especifican de manera uniforme a través de todo el nivel, de modo de representar una unidad de roca sólida de baja permeabilidad. Los parámetros de acuífero se especifican para cada zona, según se muestran en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2. Parámetros de Acuífero Modelados

Unidades Hidrogeológicos	Trans-misividad (m2/dy)	Conduc-tividad Hidráulica (cm/s)	Anisotropía Vertical ()	Rendi-miento Específico ()	Coeficiente de Almacenaje ()
Nivel 1					
inactivo					
Bloque de Montañ	0.05	1.2E-06	1	0.01	
aluvio de conductividad baja		1.2E-04	0.1	0.15	
aluvio de conductividad intermedia		3.5E-04	0.1	0.15	
aluvio de conductividad alta		3.5E-03	0.1	0.10	
Nivel 2					
Bloque de Montañ	0.05		1	0.01	0.0005
roca fracturada, cubierto con coluvio	1.50		1	0.05	0.0005
roca fracturada, cubierto con aluvio	2.75		1	.02 / .10 [1]	
roca fracturada de transmisividad intermedia	5		1	0.01	0.0005
roca fracturada de alta transmisividad	50		1	0.03	0.0005
Nivel 3					
roca	0.2		1		0.0004

(1) Valor chico cuando el nivel de agua esté en la roca, otro valor cuando esté en el aluvio

Figura 3.5a. Zonas Hidrogeológicos en el Nivel 1

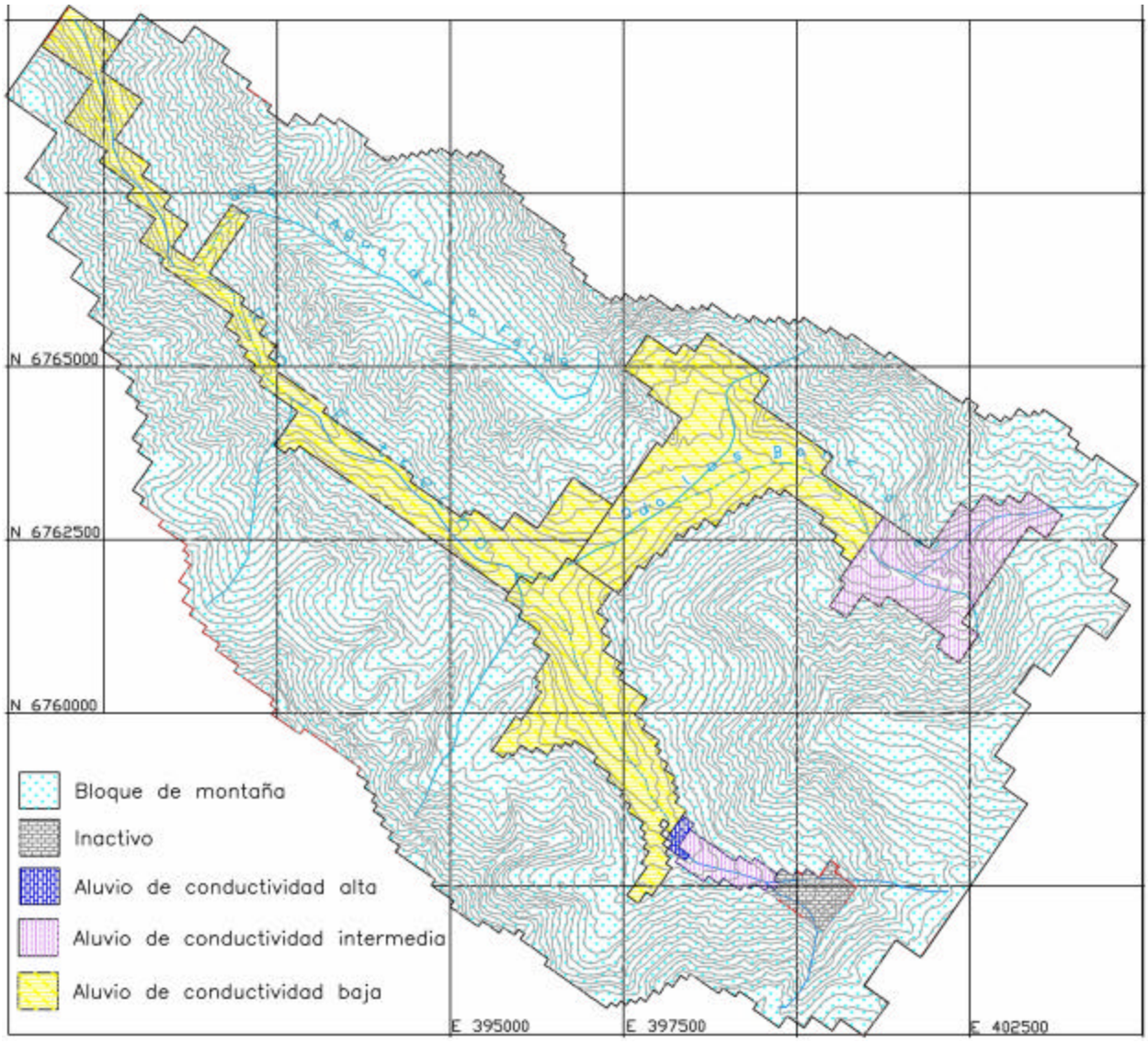
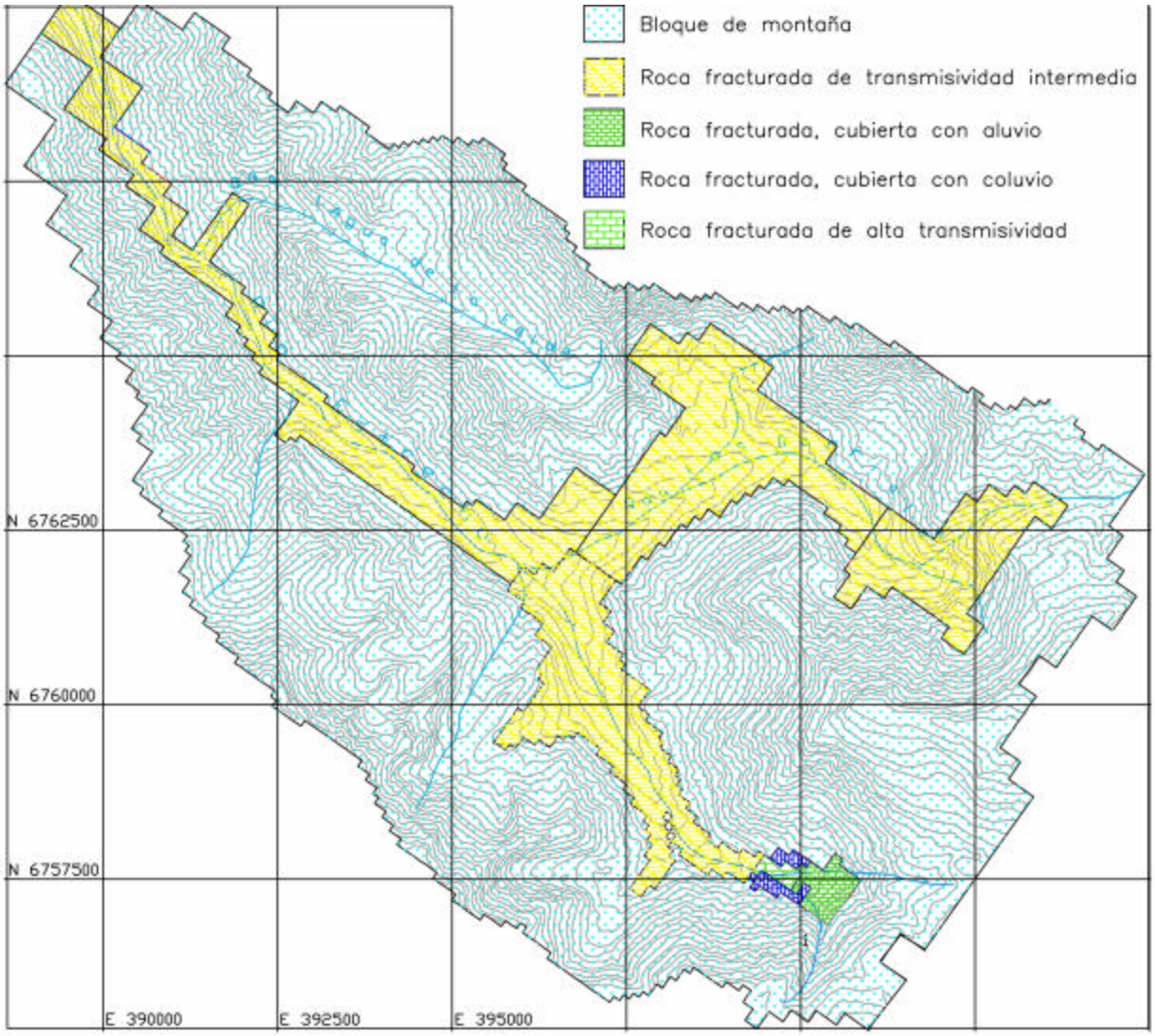


Figura 3.5b. Zonas Hidrogeológicos en el Nivel 2



3.2.2 Condiciones de Borde

Los valores de fusión de nieve y de hielo, calculados en los balances hídricos de nieve y glaciares, se ingresan como entradas al modelo numérico con el fin de poder calcular los flujos de aguas subterráneas y de aguas superficiales. Los valores de fusión se ingresan al modelo numérico como escurrimiento hacia cauces de aguas superficiales o bien como recarga directa a la napa de aguas subterráneas. Se permite dentro del modelo que el agua superficial infiltre hacia la napa y que la recarga de agua subterránea se aflore a los cauces superficiales.

Para el caso de las unidades hidrológicas de la Hoya Superior del Estrecho mostradas en la Figura 1.3, los valores de fusión de nieve se ingresaron al modelo numérico según se detalla a continuación.

1. El deshielo desde los sectores con y sin glaciares de la Unidad Canal Norte se ha ingresado como escurrimiento superficial hacia los tramos de cursos de agua que nacen dentro de la Unidad. El escurrimiento se distribuye entre los tramos modelados según se describe en la sección 3.2.3 a continuación.

2. El deshielo desde la Unidad Canal Sur se ha ingresado como escurrimiento superficial hacia los cauces de cursos de agua ubicados a lo largo del borde sur de la cuenca.

3. El deshielo desde la Unidad Rajo se ha ingresado como escurrimiento superficial hacia la Quebrada Pedro (Figura 1.3), que infiltra desde ahí hacia los conos de material aluvial que están situados en el sector alto de la cuenca.

4. El deshielo desde la Unidad Aguas Arriba se ha ingresado como escurrimiento superficial hacia la Quebrada Amarillo (Figura 1.3), que infiltra desde ahí hacia los conos de material aluvial que están situados en el sector alto de la cuenca.

5. El deshielo desde la Unidad Botadero, en cantidades de hasta un máximo de 16 mm/mes, se ha ingresado como recarga de aguas subterráneas desde la base de los conos de material aluvial a lo largo de los bordes norte y sur de la cuenca aluvial, en el período desde Noviembre hasta Febrero. Los caudales de deshielo en exceso de los 16 mm se han ingresado en la forma de escurrimiento hacia los cauces de río ubicados en el fondo del valle.

6. El deshielo desde la Unidad Aguas Abajo se ha ingresado como escurrimiento hacia los cauces de río ubicados a las cotas más bajas, inmediatamente aguas arriba de la estación NE-5.

La distribución del agua de deshielo en componentes de escurrimiento de aguas superficiales y de recarga directa a la napa de aguas subterráneas es cuestión en parte de la discretización del modelo, dado que la recarga directa puede representar también la infiltración de escurrimiento a través de los lechos de causes menores que no están explícitamente incorporados en el modelo. Para dar un ejemplo, en la Hoya Superior del Estrecho los cauces de cursos de agua principales y menores están simulados todos en su conjunto en el modelo y el agua de deshielo ha sido ingresada casi en su totalidad en calidad de escurrimiento.

En cambio, el cauce principal del Río Estrecho en la Hoya Intermedia del Estrecho es el único que ha sido representado explícitamente en el modelo. Por lo tanto, la infiltración de escurrimiento de la quebrada La Olla (Figura 1.1b) y los otros tributarios de la Hoya Intermedia se representa como recarga directa. Guiado por la calibración del modelo, todo el agua de deshielo correspondiente a la Hoya Intermedia del Estrecho hasta un máximo de 57 mm/mes se ha ingresado al modelo en calidad de recarga directa por los conos aluviales y por el fondo del valle. El agua de deshielo en exceso de 57 mm/mes se entrega como escurrimiento por los cauces de cursos de aguas superficiales.

Para los casos de las demás hoyas hidrográficas mostradas en la Figura 1.1a, toda el agua de deshielo hasta una cantidad máxima de 20 mm/mes se ha ingresado al modelo en calidad de recarga directa por los conos aluviales y los fondos de valle. El agua de deshielo en exceso de los 20 mm/mes, en cambio, se ha ingresado en calidad de escurrimiento por los cauces de aguas superficiales.

3.2.3 Caudales Superficiales y Flujos entre las Aguas Superficiales y Subterráneas

Las hoyas hidrográficas del área de estudio se han dividido en 23 tramos de cursos de agua, los que están representados en el modelo mediante el uso de 404 nodos fluviales.

Cada tramo está representado por un grupo de nodos fluviales que están conectados hidráulicamente al sistema de aguas subterráneas. El afluente a cada tramo se calcula como la suma de los siguientes aportes:

- El escurrimiento afluente al tramo, estimado mediante los balances hídricos de nieve y glaciar,
- El caudal afluente desde tramos ubicados aguas arriba, y
- La ganancia o pérdida de flujo de aguas subterráneas a lo largo del tramo, calculado como la suma del flujo de agua subterránea hacia o desde cada nodo fluvial.

El efluente de cada tramo es contabilizado como afluente para el tramo ubicado inmediatamente aguas abajo. Los tramos analizados se detallan en la Tabla 3.3 y se muestran en la Figura 3.6a.

Se considera que los bordes de los sectores afluentes para los 17 tramos en que está dividida la Hoya Superior del Estrecho, según se muestran en la Figura 3.6b, tienen carácter de aproximados, ya que los cauces en el fondo del valle se desplazan en forma relevante mostrando una gran variabilidad con la marcha de las estaciones. Además, no se tienen conocimientos ciertos de muchos aspectos relevantes de las redes de drenaje de los glaciares. El aporte de los glaciares se suma al caudal de aquellos tramos superiores que tienen sectores con presencia de éstos. El aporte de fusión de nieve se suma al caudal de todos los tramos.

Los parámetros de nodo fluvial que se han especificado son los de cota del curso de agua, conductancia del lecho fluvial y tasa máxima de infiltración. Al respecto, las cotas de cursos de agua se estimaron a partir de mapas topográficos. Asimismo, los valores de conductancia de lecho fluvial se especificaron en un valor de 0,1 m^3/día por metro lineal de cauce fluvial, tratándose de cauces fuertemente inclinados sobre roca sólida y ubicaciones a cotas bastante por encima del nivel de la napa freática. En cambio, se especificó un valor de conductancia de lecho fluvial equivalente a 20 m^3/día/m para el caso de cauces ubicados en los fondos de valle. Finalmente, para los casos de cauces ubicados en conos aluviales y entre éstos o a cotas

superiores de los mismos, como también en la parte superior del Valle del Río Estrecho, se especificó un valor de conductancia de lecho fluvial equivalente a 5 m^3/día/m sobre la base del resultado arrojado por el modelo después de su calibración. Se asignó una tasa máxima de infiltración por el lecho fluvial igual a su respectivo valor de conductancia multiplicado por un factor de 0,2 metros.

Tabla 3.3. Tramos de Río Modelados

No. de Tramo	Nombre	Descripción	No. de Nodos	Tramo Aguas Abajo	Area Aportante (km^2)	Conductividad del Cauce (m^3/dy/m)
1	A1	Estrecho Superior	11	A3	2.1	0.1
2	A2		8	A3	1.4	0.1
3	A3		10	E1	0.4	0.1 - 5.0
4	QA		3		1.1	0.1
5	QP		2	E1	2.0	5.0
6	B1		9	B3	1.0	0.1
7	B2		10	B3	0.5	0.1
8	B3		5	E1	0.1	0.1
9	C1		8	C3	0.4	0.1
10	C2		9	C3	0.6	0.1
11	C3		10	E1	0.3	0.1
12	D1		7	D3	0.5	0.1
13	D2		4	D3	0.2	0.1
14	D3		16	D3a	0.8	0.1
15	D3a		10	E1b	0.5	5.0
16	E1		15	E1a	2.7	5.0
17	E1a		9	E1b	0.6	20
18	E1b		1	E2	0.4	20
19	E2	Estrecho Intermedio	37	E4	20.5	20
20	E3	Qda. Barriales	77	E4	34.9	0.1 - 20.0
21	E4	Estrecho Inferior	59	E6	33.1	20
22	E5	Qda Agua la Falda	61	E6	13.3	0.1 - 20.0
23	E6	Estrecho Extremo Inf.	23		10.9	20

Figura 3.6a. Nodos Fluviales y Sectores Afluentes Modelados

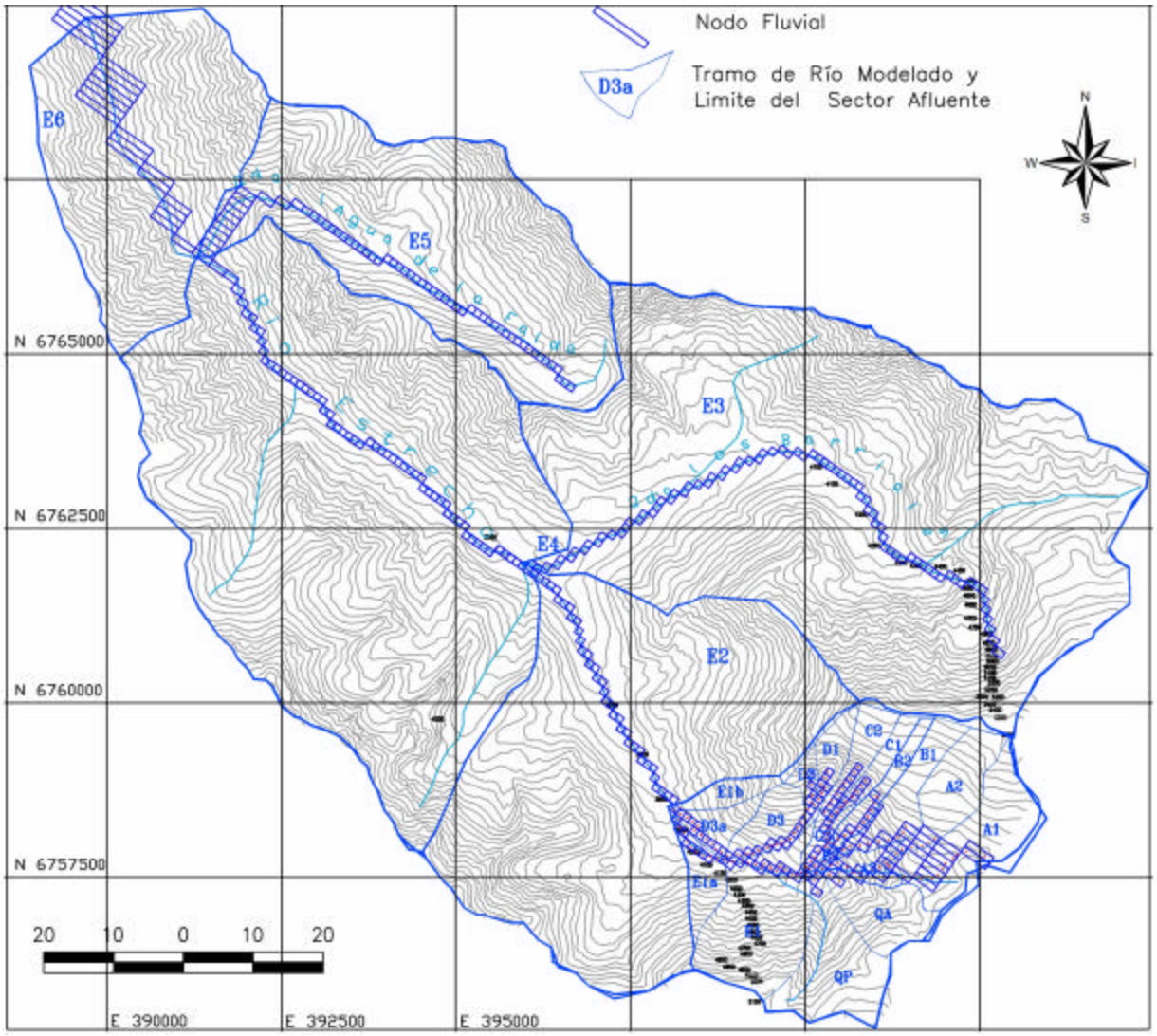
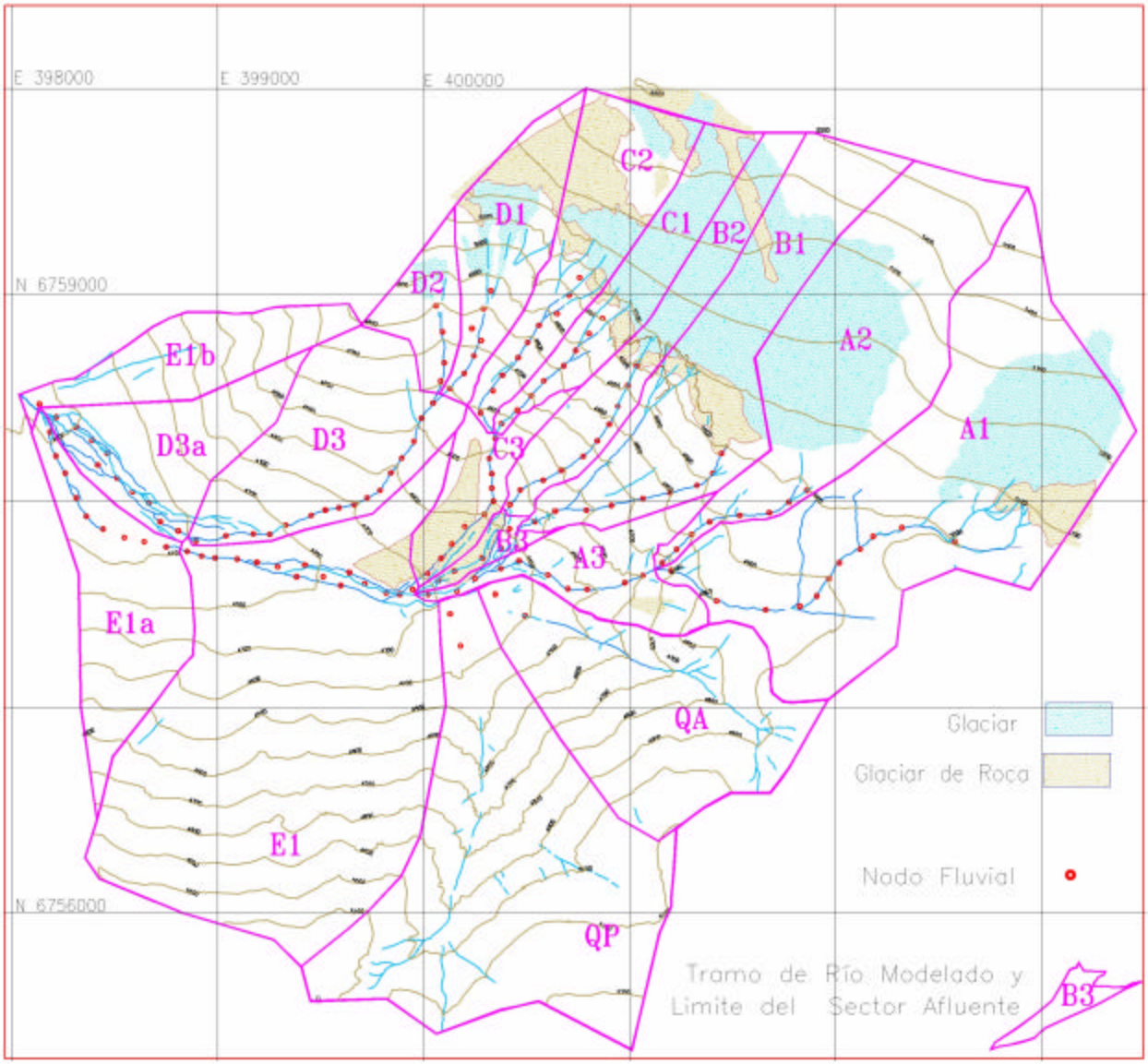


Figura 3.6b. Nodos Fluviales y Sectores Afluentes Modelados – Hoya Superior del Estrecho



3.2.4 Recargas de Aguas Subterráneas

Entre las diversas formas de recarga de aguas subterráneas se incluye la infiltración directa de agua de precipitaciones y deshielo, como también la infiltración de escurrimientos hacia la napa por los cauces de cursos de agua menores que no están representados en el modelo. Los valores de recarga de aguas subterráneas se calculo para cada sector estudiado de la manera descrita más arriba en la sección 3.2.2, aplicados a los conos aluviales y a los fondos de valle.

3.2.5 Evapotranspiración de Aguas Subterráneas

La ET de aguas subterráneas se produce desde sectores de vegas y otros lugares con cobertura de vegetación, como también desde sectores sin vegetación pero con agua subterránea ubicada a poca profundidad. Para llegar a una representación aproximada de la distribución de ET, cada celda fluvial se ha especificado como celda de ET. Además, se han definido celdas adicionales de ET para cubrir los sectores planos del fondo del valle del Estrecho.

Entre los parámetros de ET considerados se incluyen los de cota de la superficie de terreno, tasa máxima de ET y profundidad en que se extingue el fenómeno. La cota de superficie de terreno en cada celda para los fines de ET se especificó a partir de informaciones topográficas, mientras la tasa máxima de ET se consideró estimativamente igual al valor de la evaporación potencial (Tabla 3.1a). Finalmente, la profundidad en la que se produce la extinción del fenómeno se especificó en 1 m, valor que representa una profundidad somera, dada la ausencia de árboles y otra vegetación con sistemas radicales con alcance hasta grandes profundidades.

4 RESULTADOS DE LA CALIBRACIÓN DEL MODELO

El modelo se ha calibrado sobre la base de los niveles de aguas subterráneas y caudales de aguas superficiales medidos. Por la consideración de ambos tipos de datos en la calibración, se minimiza la incertidumbre de los resultados. Se desarrolló una simulación transitoria, del período entre el mes de Mayo de 1981 y el mes de Abril de 2004, para la comparación de los resultados simulados con los medidos.

La simulación reconoce la falta de condiciones estáticas en el sistema físico que representa, como se muestra por ejemplo en la Figuras 2.2, 2.5, 2.6 y 2.7. Para definir las condiciones iniciales de la simulación, se repitió la simulación transitoria varias veces, cada vez usando los resultados, correspondientes a Abril de 2004, como condiciones iniciales para Abril de 1981 de la próxima simulación. Después de varias repeticiones, se desarrolló una simulación transitoria que presenta, en largo plazo, condiciones de semi-equilibrio.

Se compararon los datos simulados, de caudales de aguas superficiales y niveles de aguas subterráneas, con los respectivos valores medidos, ajustándose los parámetros del modelo apropiadamente hasta alcanzar a la concordancia. La calibración tuvo sus distintas partes:

Una parte de la calibración involucró el ajustamiento de los parámetros del balance de nieve y hielo (Sección 3.1), para llegar a las condiciones de borde del modelo numérico que representen el ingreso de agua a los sistemas de agua subterránea/superficial. Los parámetros incluyen:

- Estimación de la precipitación de cada parte del área del estudio, con los resultados presentados en la Tabla 2.4. Se ajustaron las razones de precipitación para reproducir las cantidades de agua que se mide y los contrastos observados en la acumulación de nieve.

- Calibración del modelo de derretimiento, por el ajustamiento de los valores mensuales de albedo, con los resultados presentados en la Tabla 3.1a. Se ajustó los valores como se describió en el balance de hielo y nieve de la Sección 3.1.1, para reproducir el promedio del patrón de deshielo que muestran los caudales superficiales.

- Calibración de los parámetros que describe el modelo linear de la sublimación, que se describe en los últimos párrafos de la Sección 2.4. Se los ajustaron para reproducir los caudales medidos y la distribución estadística que se estimó en la Línea Base Hidrológico (Golder, noviembre de 2005b).

- Calibración de los parámetros que describe el modelo linear de la fusión, que se describe en los últimos párrafos de la Sección 3.1.1. Se los ajustaron para reproducir los caudales medidos y la distribución estadística que se estimó en la Línea Base Hidrológico (Golder, noviembre de 2005b).

El balance de nieve y hielo no pretende de cuantificar con precisión los varios parámetros, que representan valores efectivos de toda la cuenca y no representan en detalle los procesos físicos. El propósito del balance de nieve y glaciar es presentar un mecanismo razonable para calcular los caudales de deshielo para entregar al modelo numérico. En el Capítulo 8 se examina la sensibilidad de los resultados del modelo a los caudales entrados como condiciones de borde, sin preocuparse con los detalles desconocidos de la precipitación y sublimación.

Los parámetros calibrados del balance de nieve y hielo reproducen los componentes de escurrimiento y flujo basal (Figura 2.2b) de los caudales medidos, considerando la parte aportado por el glaciar (Figuras 2.2a, 2.2b y 2.4) y la parte de la nieve anual. El balance considera la variabilidad de la precipitación, combinada con la regulación de caudal por el almacenamiento de agua en forma sólida. Resultan una serie de caudales que forman las condiciones de borde del modelo numérico.

La otra parte de la calibración involucró el ajustamiento de los parámetros del modelo numérico para reproducir los caudales y niveles de agua medidos.

- Calibración de las conductividades hidrológicas que caracterizan la infiltración de agua de deshielo al sistema subterránea (Tabla 3.3). Se las ajustó basado en los niveles de fluctuación de agua subterránea, y en los caudales de flujo basal.

- Calibración de los parámetros hidrogeológicos del modelo numérico (Tabla 3.2). Se los ajustó basado en los niveles de agua y su variación estacional, y en los caudales de flujo basal.

Los resultados de calibración del modelo indican que éste reproduce los caudales de aguas superficiales y de aguas subterráneas con un grado razonable de exactitud. Es más, la estructura del modelo coincide con la información hidrogeológica disponible y entrega simulaciones realistas del sistema hidrológico. Por lo tanto, se considera que el modelo es apto para uso con fines de proyectar los movimientos de aguas superficiales y subterráneas en el sector del botadero de estéril Nevada Norte, como también de proyectar los resultados de las diferentes actividades de manejo de recursos hídricos relacionados con el Proyecto Pascua Lama.

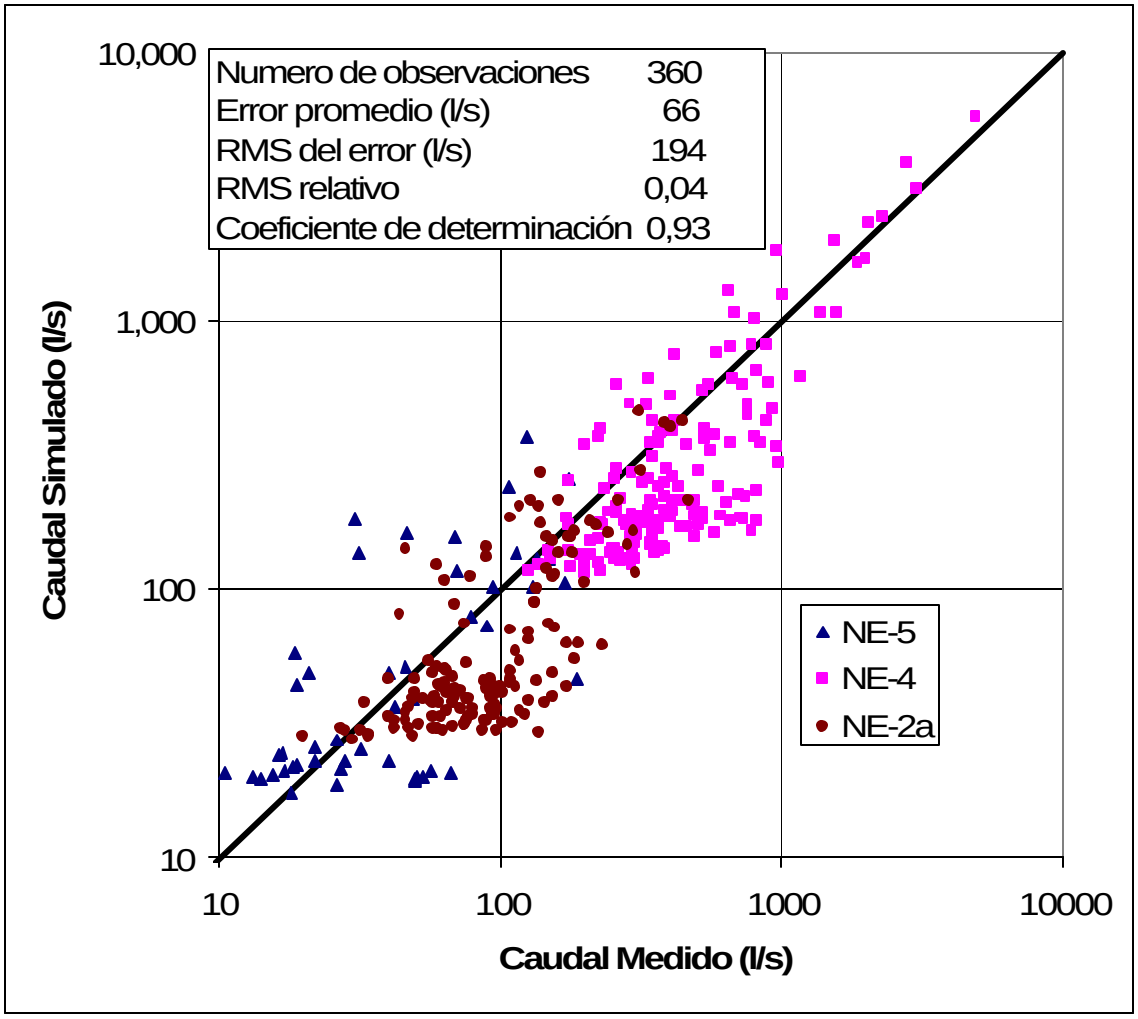
4.1 Resumen de la Calibración

Se comparó los caudales y niveles simulados con los promedios mensuales de las mediciones de caudal y nivel.

Se comparó los caudales simulados con el promedio mensual de los caudales medidos considerando las diferencias entre los caudales del Río del Estrecho y el registro de precipitación de El Indio, con respeto a la ordenación de los años más húmedos. Para mejor representar la distribución estadística de los caudales simulados, dado las diferencias, se

comparó el año 1987-88 de la simulación al año 1997-1998 del registro y se comparó el año 1984-85 de la simulación al año 1983-1984 del registro. Se presenta los resultados en la Tabla 4.1.

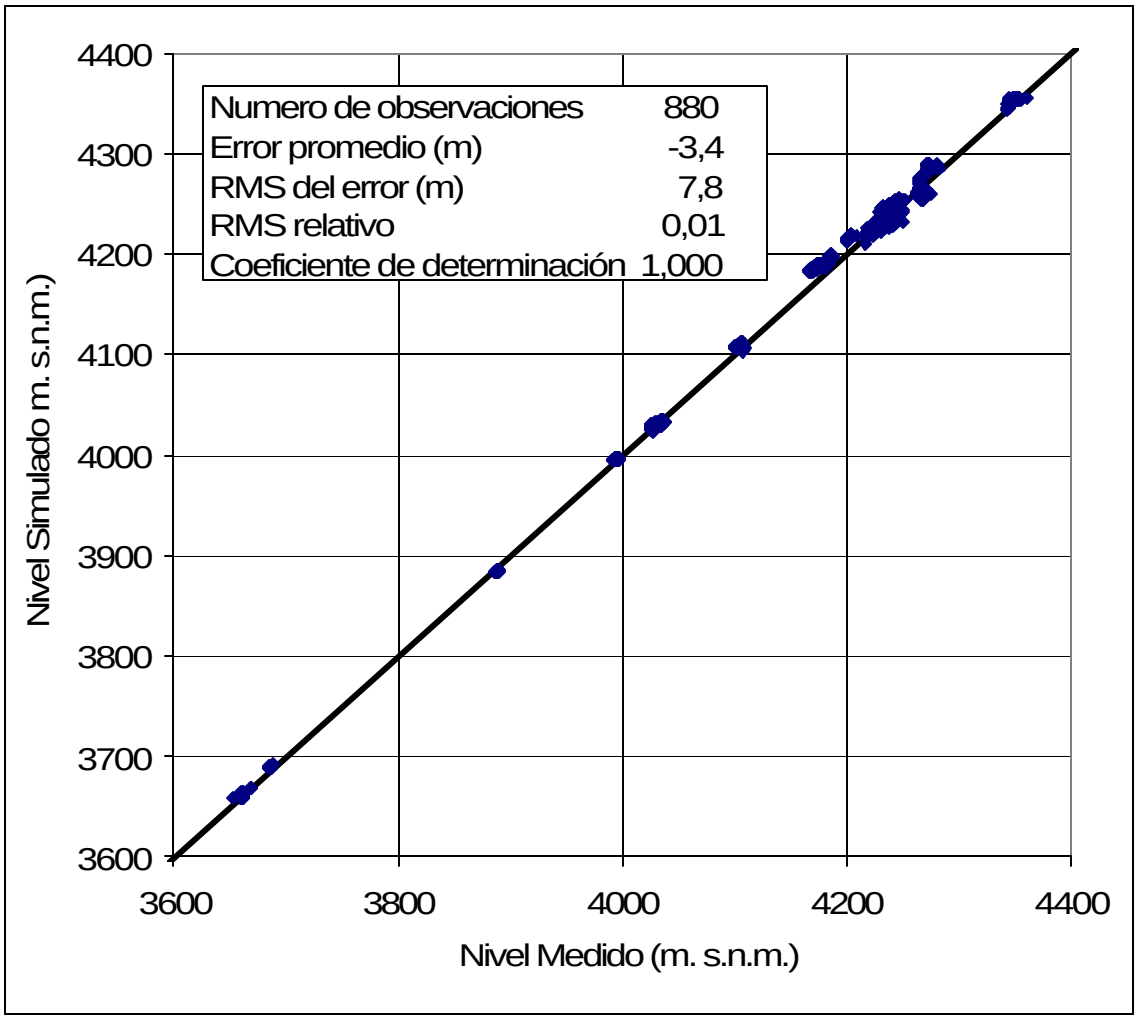
Tabla 4.1. Resumen de la Calibración de Caudales



La correlación de los caudales se considera bien. El objeto de la calibración con respeto a los caudales fue la representación del rango y la ocurrencia de los caudales observados, reconociendo que los caudales superficiales son de carácter más **random** y no son tan predecibles como los niveles de agua subterránea.

Se comparó los niveles simulados de agua subterránea con el promedio mensual de los niveles medidos en la Tabla 4.1. La correlación es apropiada a la resolución de 100m de las celdas del modelo numérico, en que el nivel de agua simulado cambia del orden de 10m de una celda a otra.

Tabla 4.2. Resumen de la Calibración de Niveles



4.2 Agua Superficial

En las Figuras 4.1a a 4.1d se presentan comparaciones de los caudales superficiales medidos con los simulados en las estaciones NE-5, NE-2A, NE-1A y NE-4. La magnitud y el marco temporal de los caudales medidos, los máximos del verano y los mínimos del invierno, se han reproducido exitosamente por el modelo.

Figura 4.1a. Caudales Medidos y Simulados, Hoya Superior del Estrecho, Estación NE-5

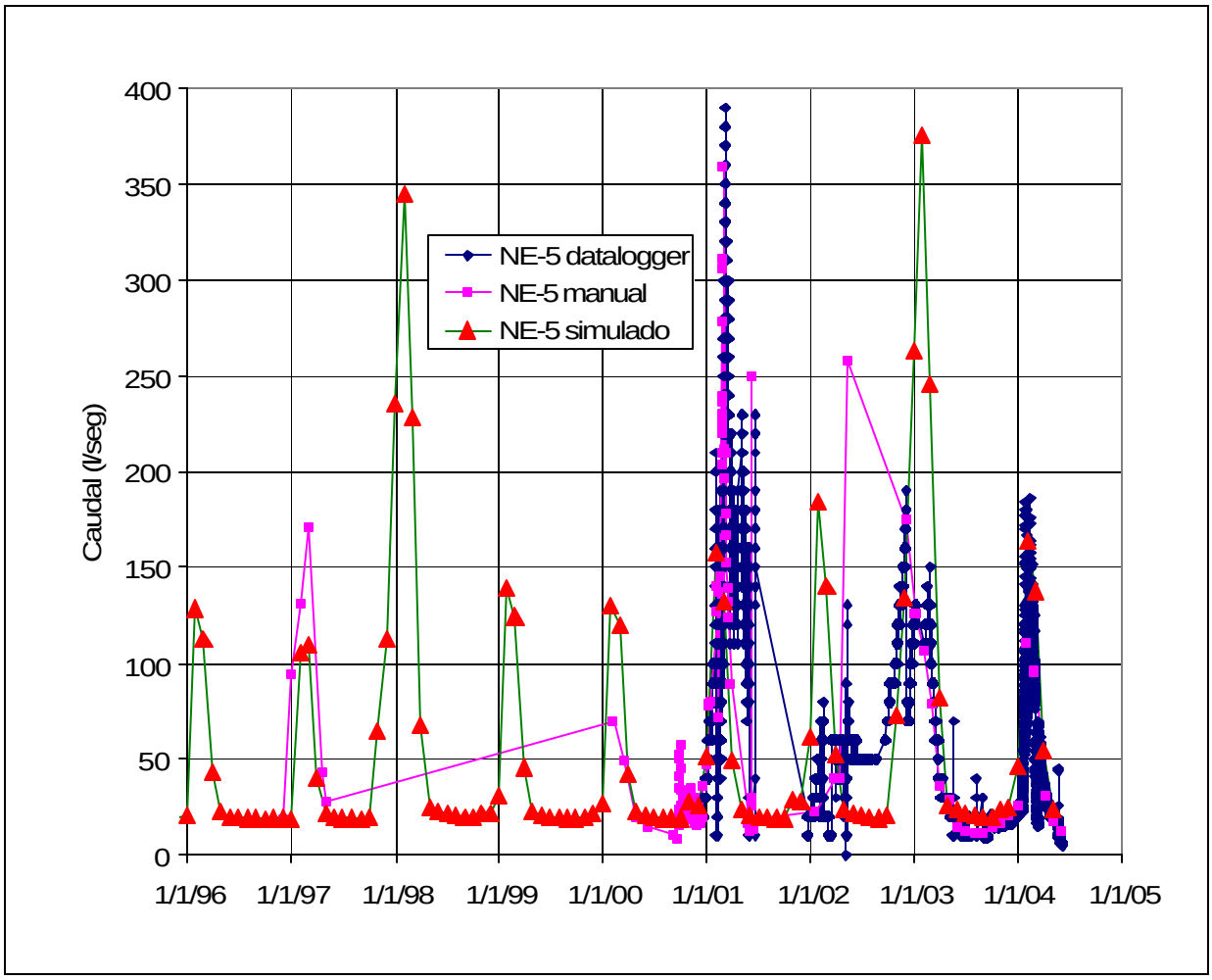


Figura 4.1b. Caudales Medidos y Simulados, Hoya Intermedia del Estrecho, Estación NE-2A

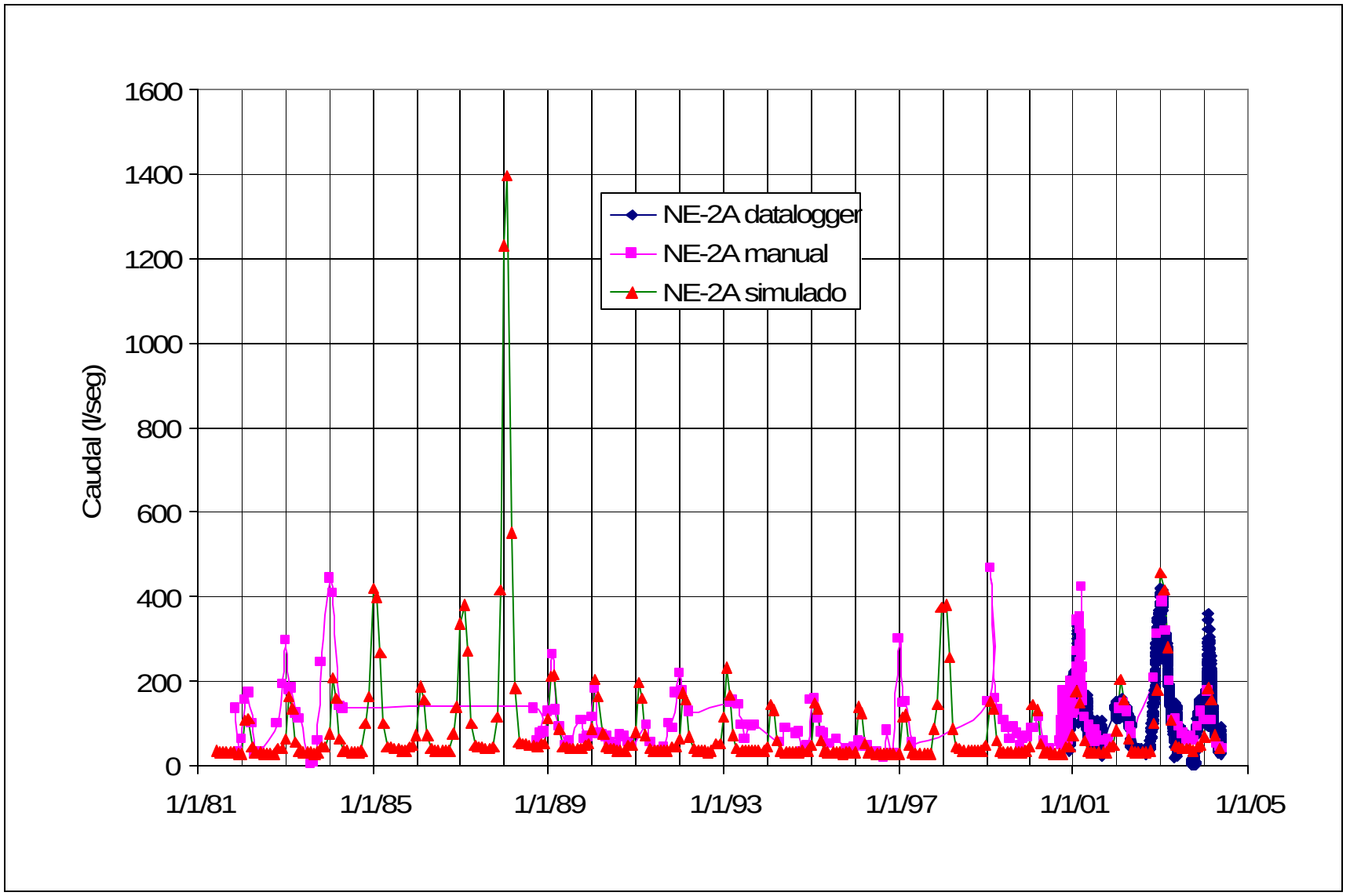


Figura 4.1c. Caudales Medidos y Simulados, Quebrada Barriales, Estación NE-1A

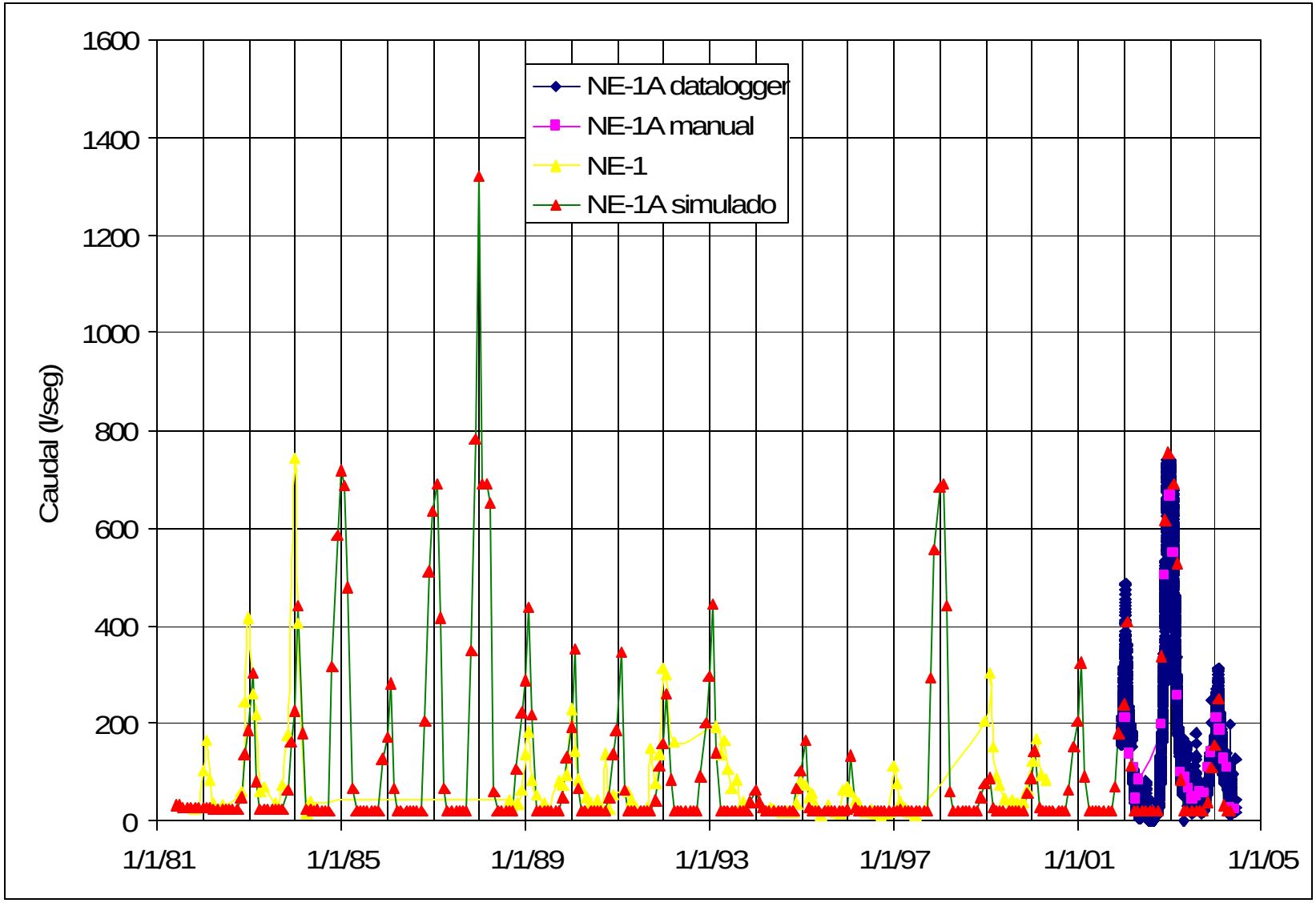
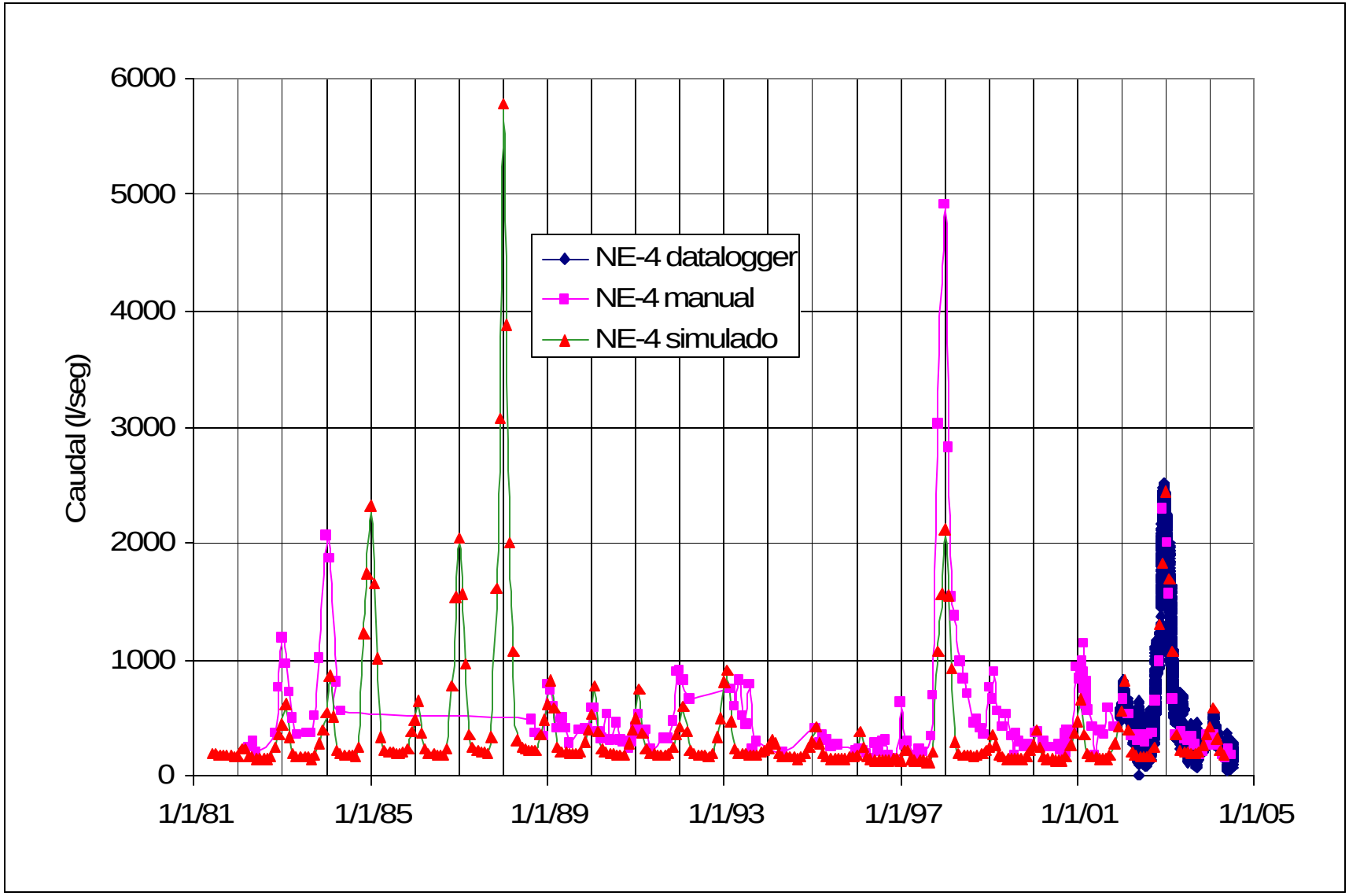


Figura 4.1d. Caudales Medidos y Simulados, Extremo Inferior del Estrecho, Estación NE-4



4.3 Agua Subterránea

Los niveles medidos y simulados de aguas subterráneas se comparan en las Figuras 4.2a a 4.2v. Las magnitudes y el marco temporal de las fluctuaciones anuales de nivel se han reproducido a un grado razonable en cada una de las ubicaciones de pozos de monitoreo. En efecto, los niveles de agua simulados entregados son razonablemente similares a los niveles medidos.

Figura 4.2a. Niveles de Agua Medidos y Simulados en el Pozo RE-1

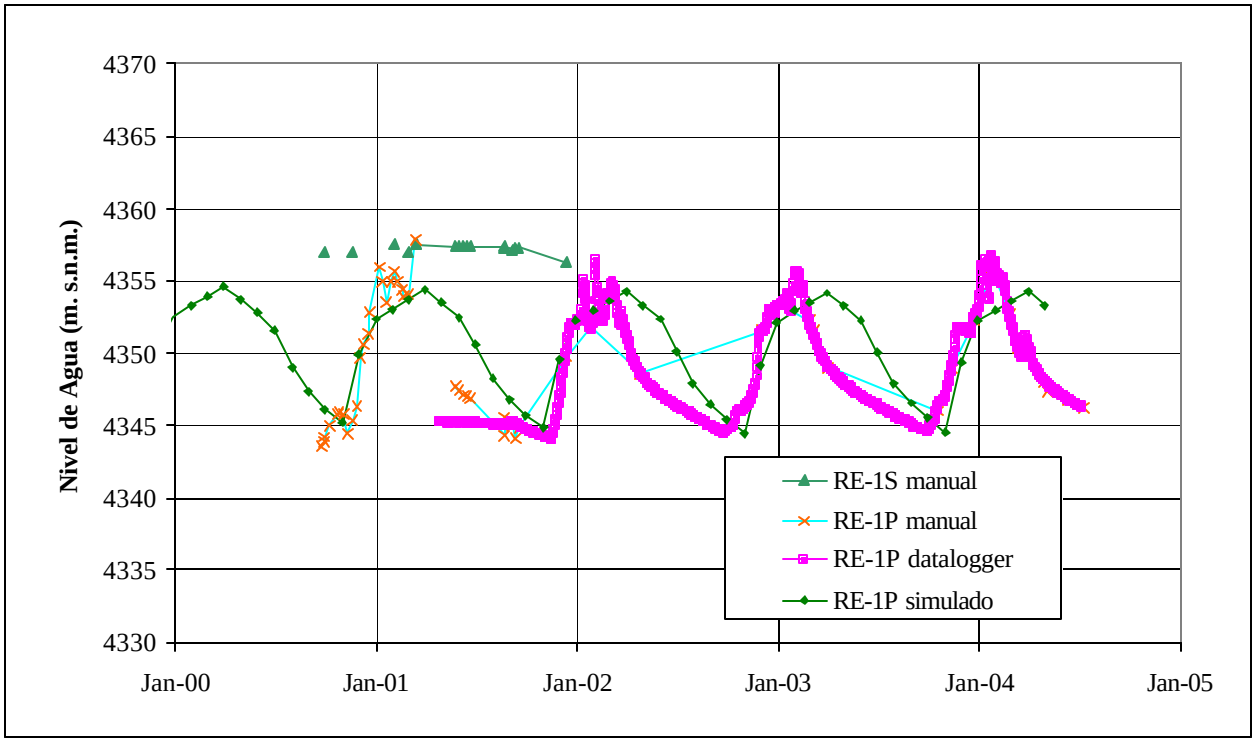


Figura 4.2b. Niveles de Agua Medidos y Simulados en el Pozo RE-2

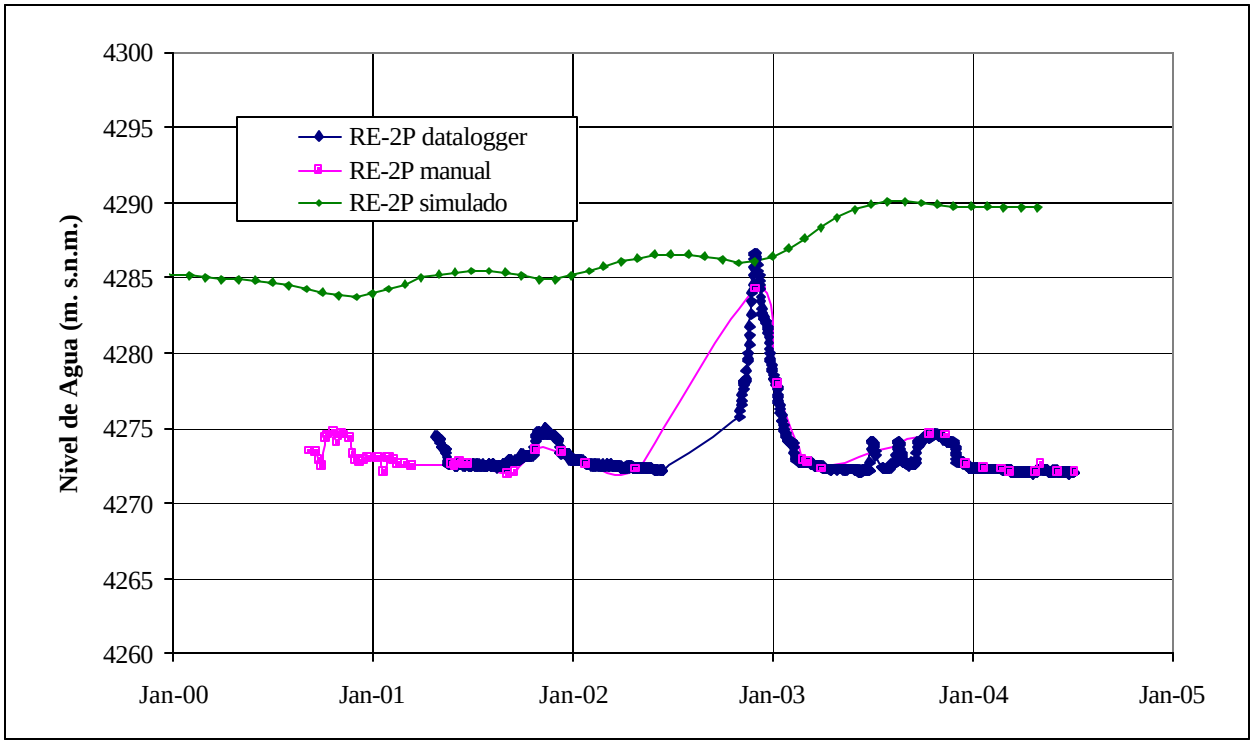


Figura 4.2c. Niveles de Agua Medidos y Simulados en el Pozo RE-3

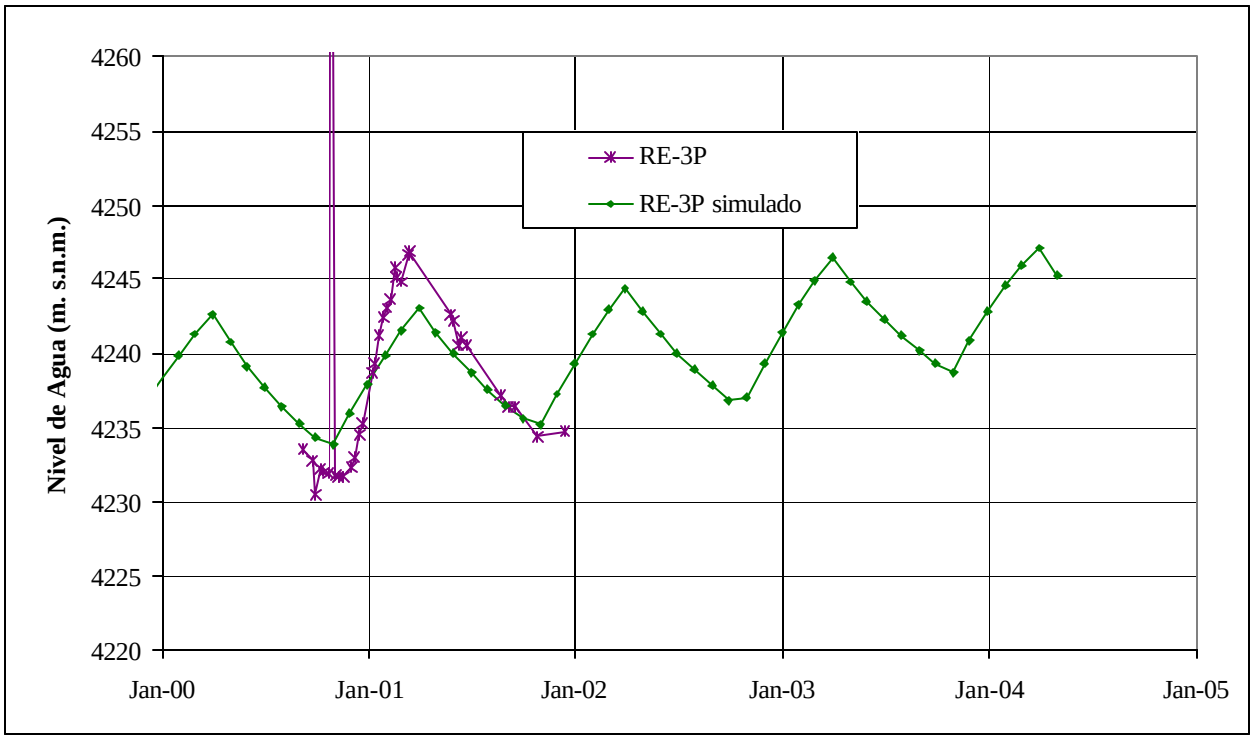


Figura 4.2d. Niveles de Agua Medidos y Simulados en el Pozo RE-4A2

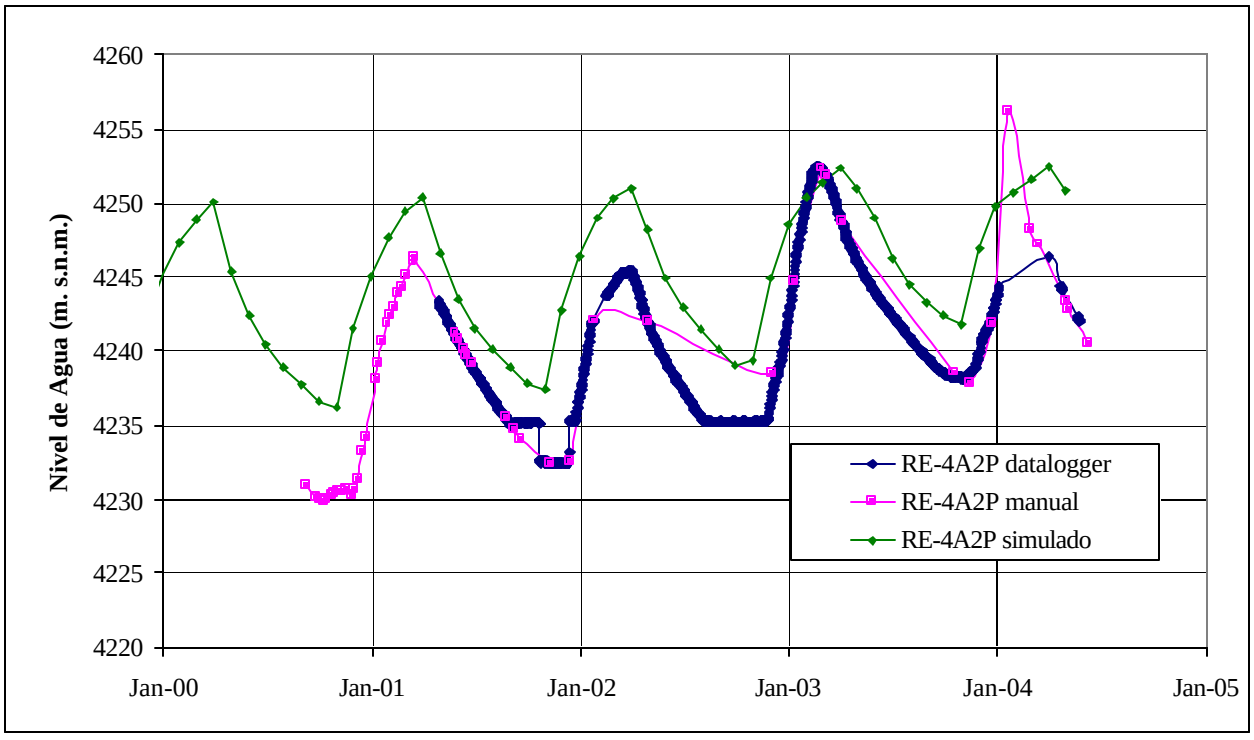


Figura 4.2e. Niveles de Agua Medidos y Simulados en el Pozo RE-5

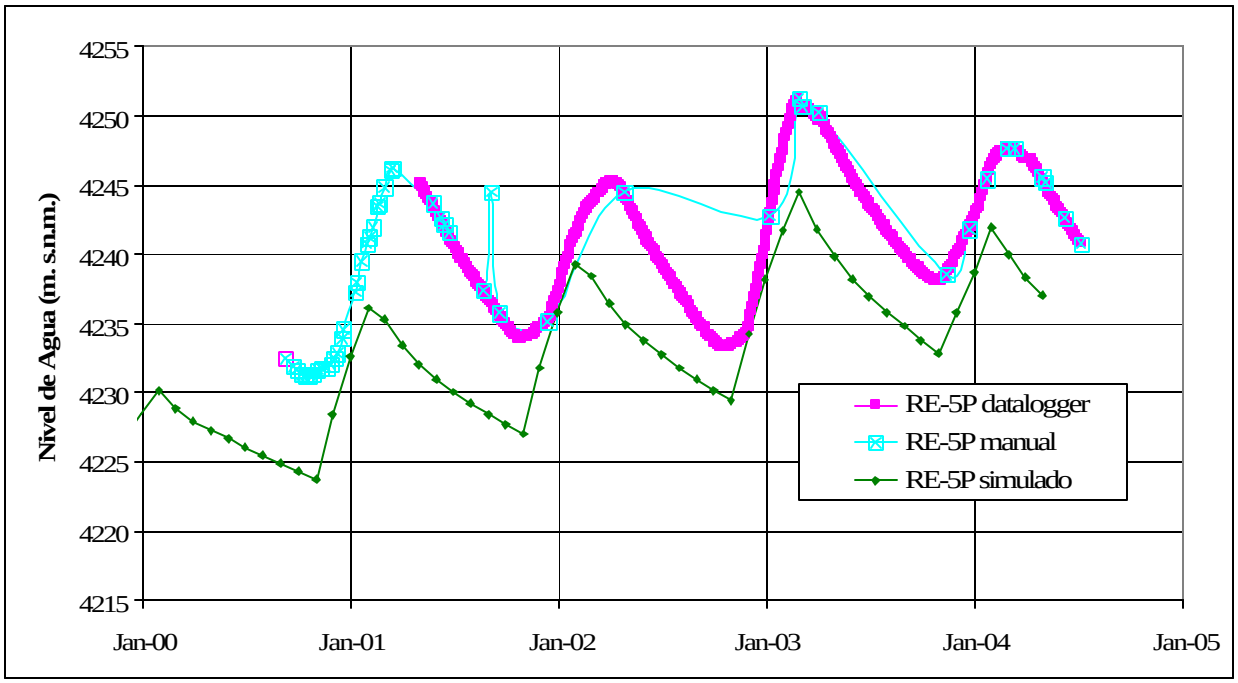


Figura 4.2f. Niveles de Agua Medidos y Simulados en el Pozo RE-16

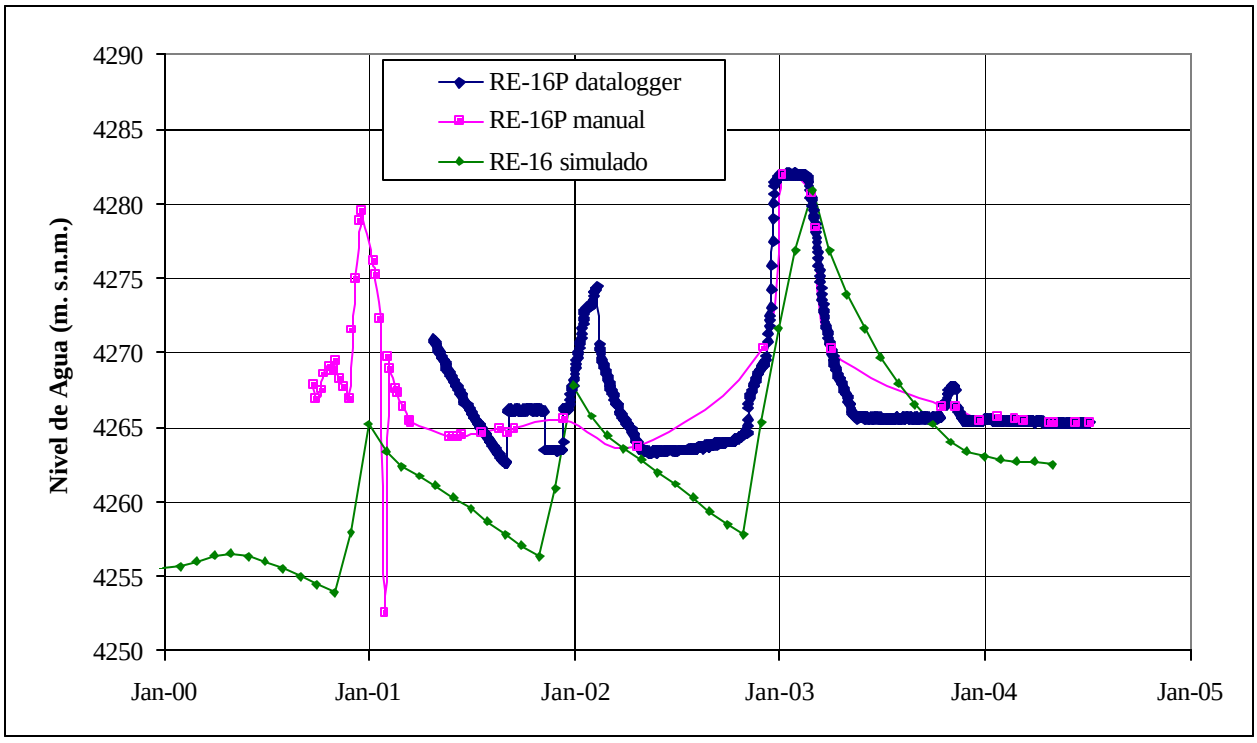


Figura 4.2g. Niveles de Agua Medidos y Simulados en el Pozo RE-6

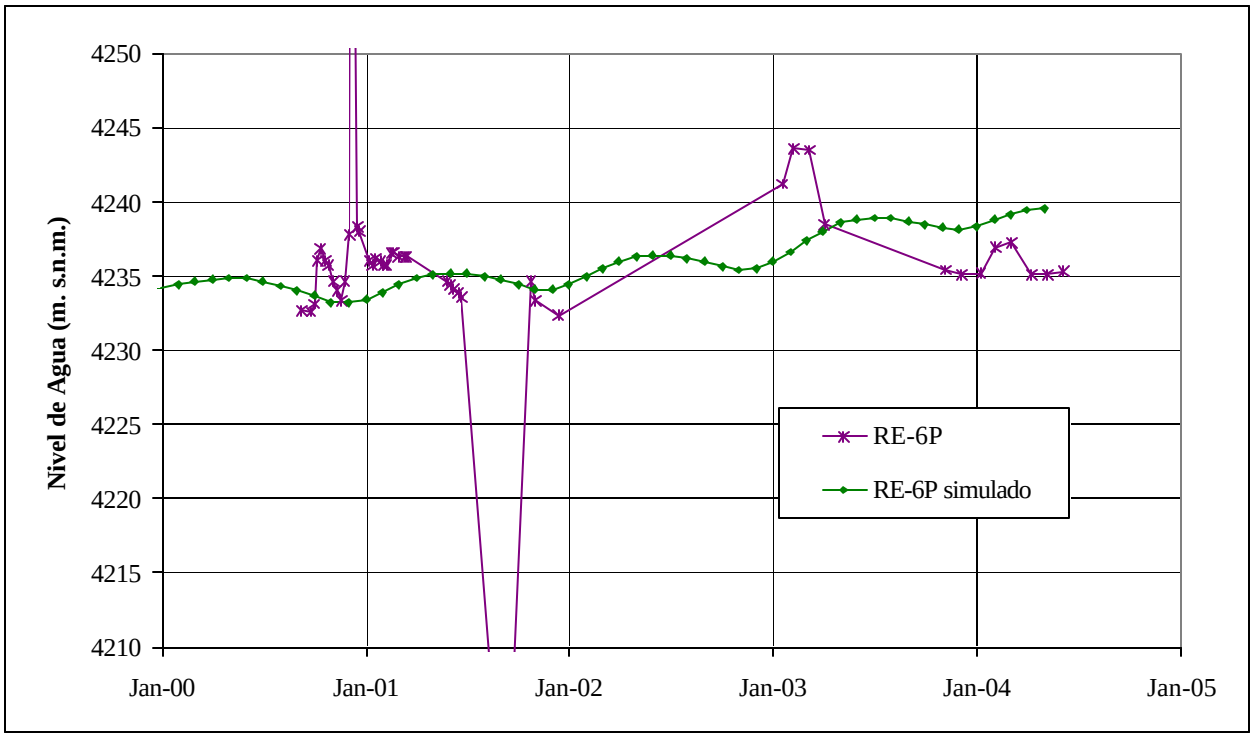


Figura 4.2h. Niveles de Agua Medidos y Simulados en el Pozo RE-7

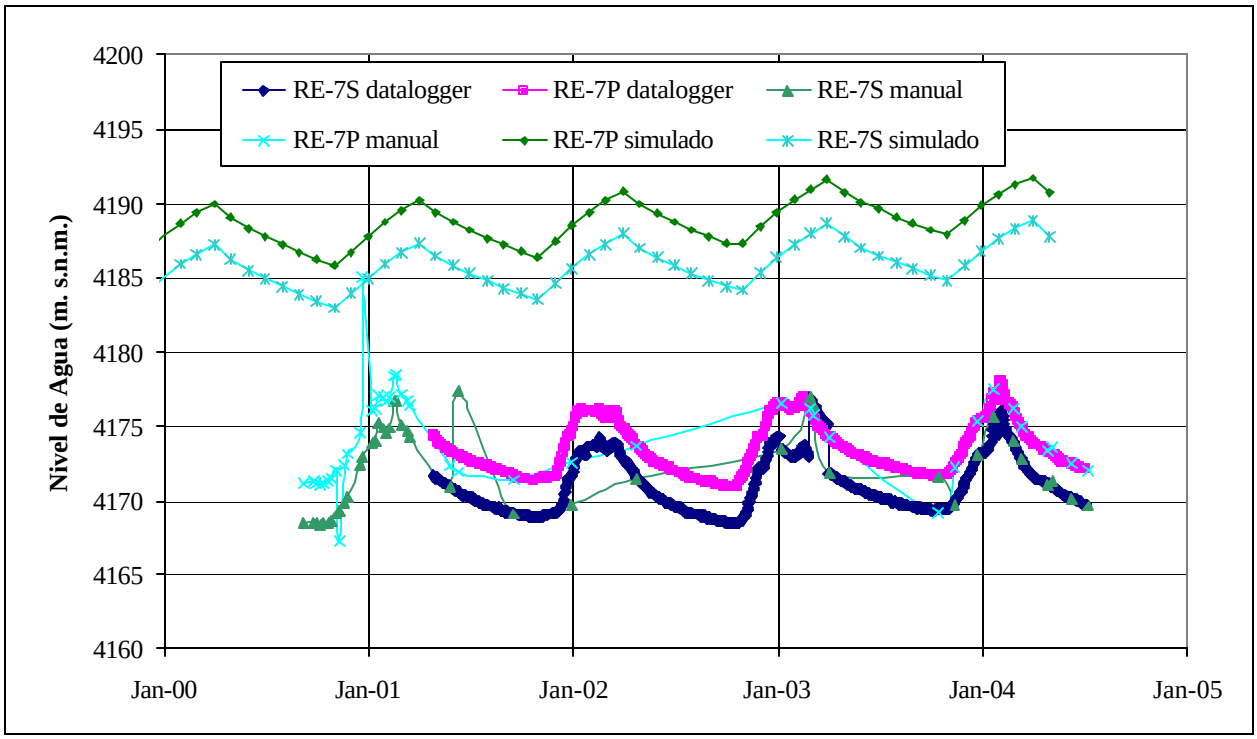


Figura 4.2i. Niveles de Agua Medidos y Simulados en el Pozo RE-8A

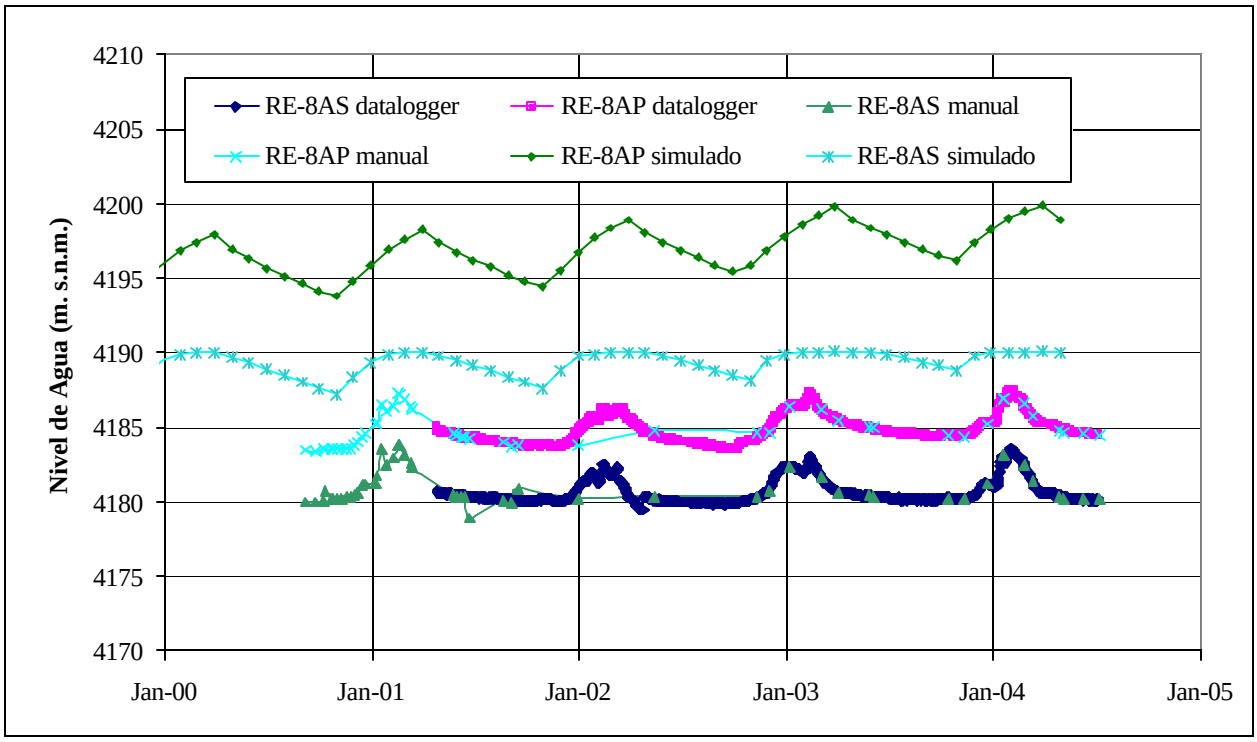


Figura 4.2j. Niveles de Agua Medidos y Simulados en el Pozo RE-9

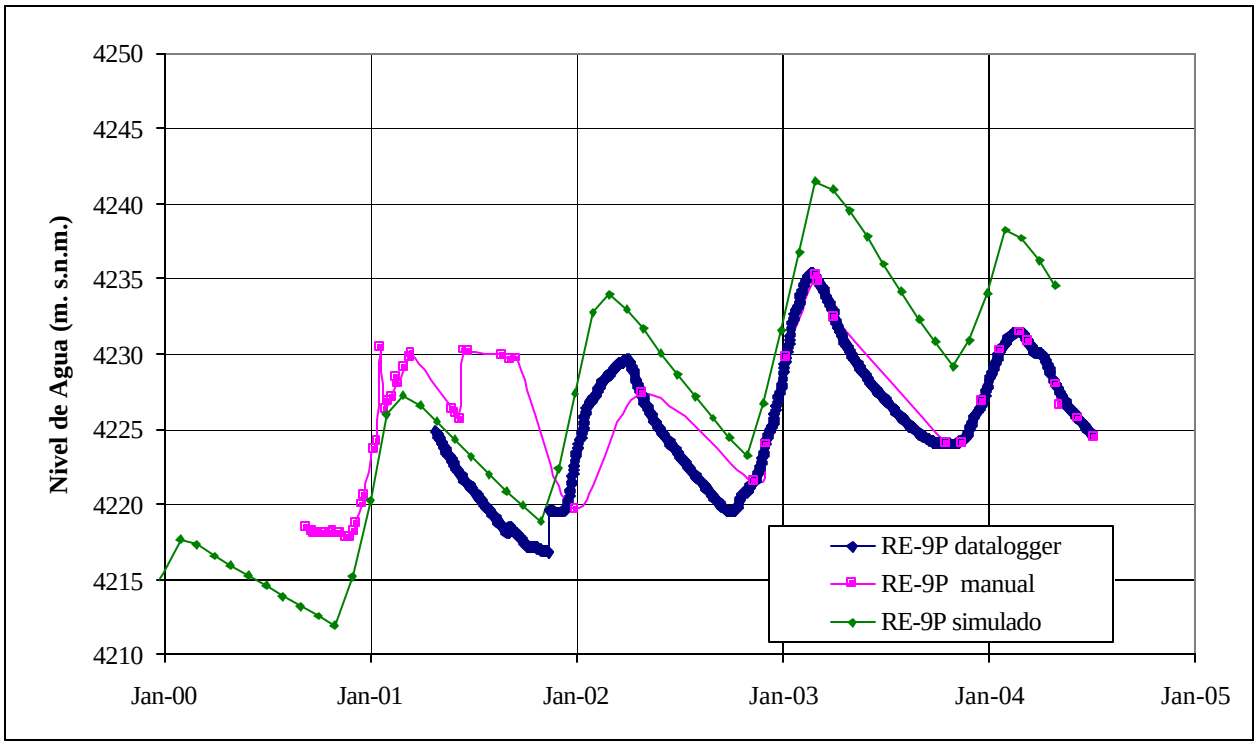


Figura 4.2k. Niveles de Agua Medidos y Simulados en el Pozo de Prueba 1

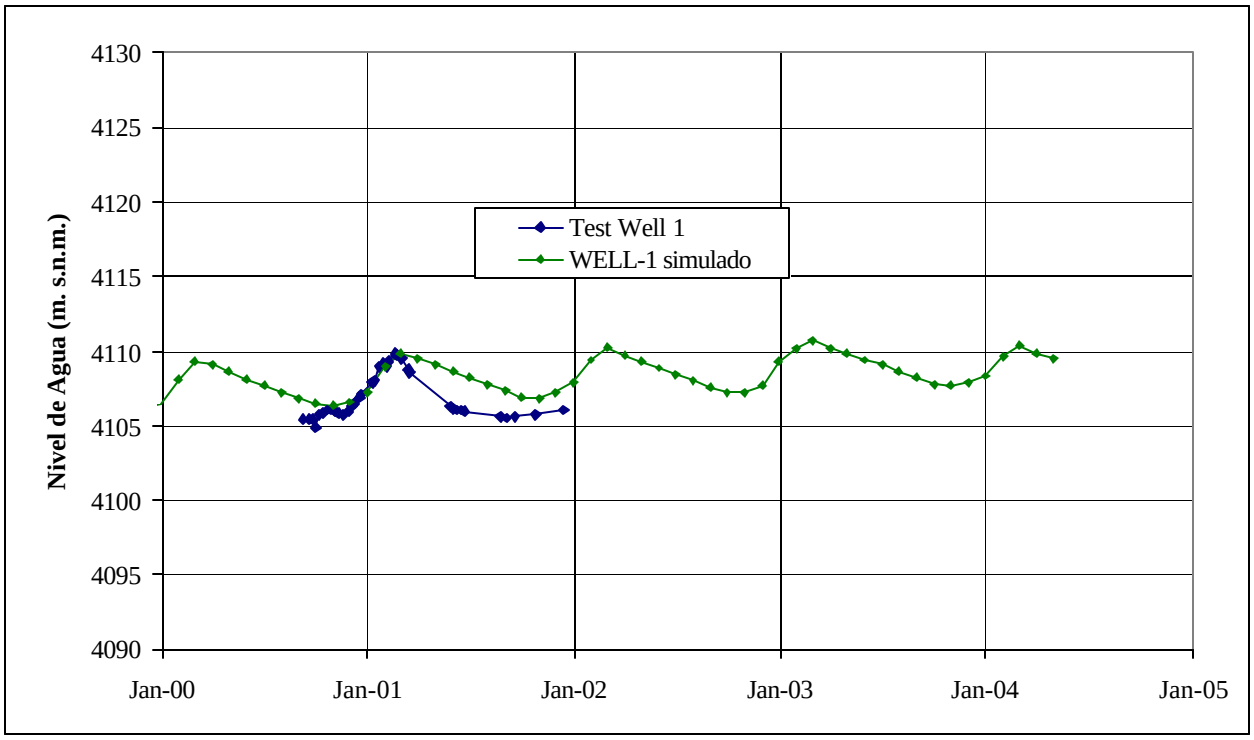


Figura 4.2l. Niveles de Agua Medidos y Simulados en el Pozo RE-14

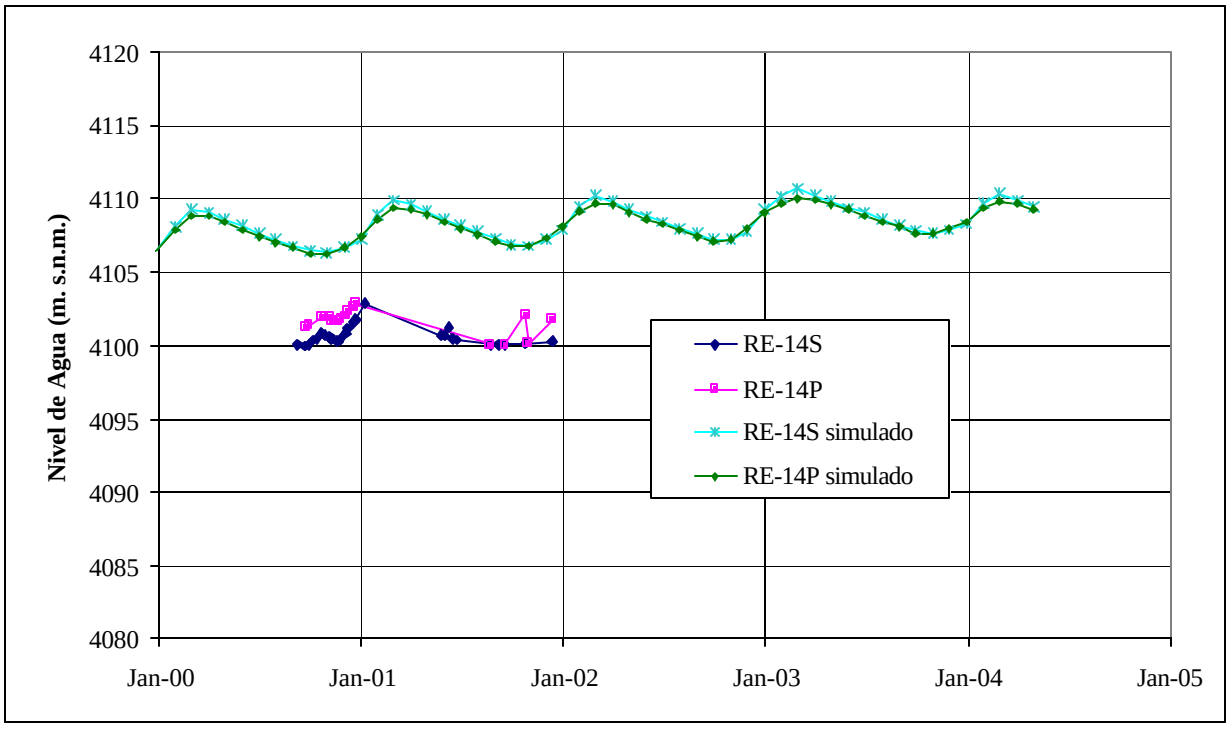


Figura 4.2m. Niveles de Agua Medidos y Simulados en el Pozo RE-11B

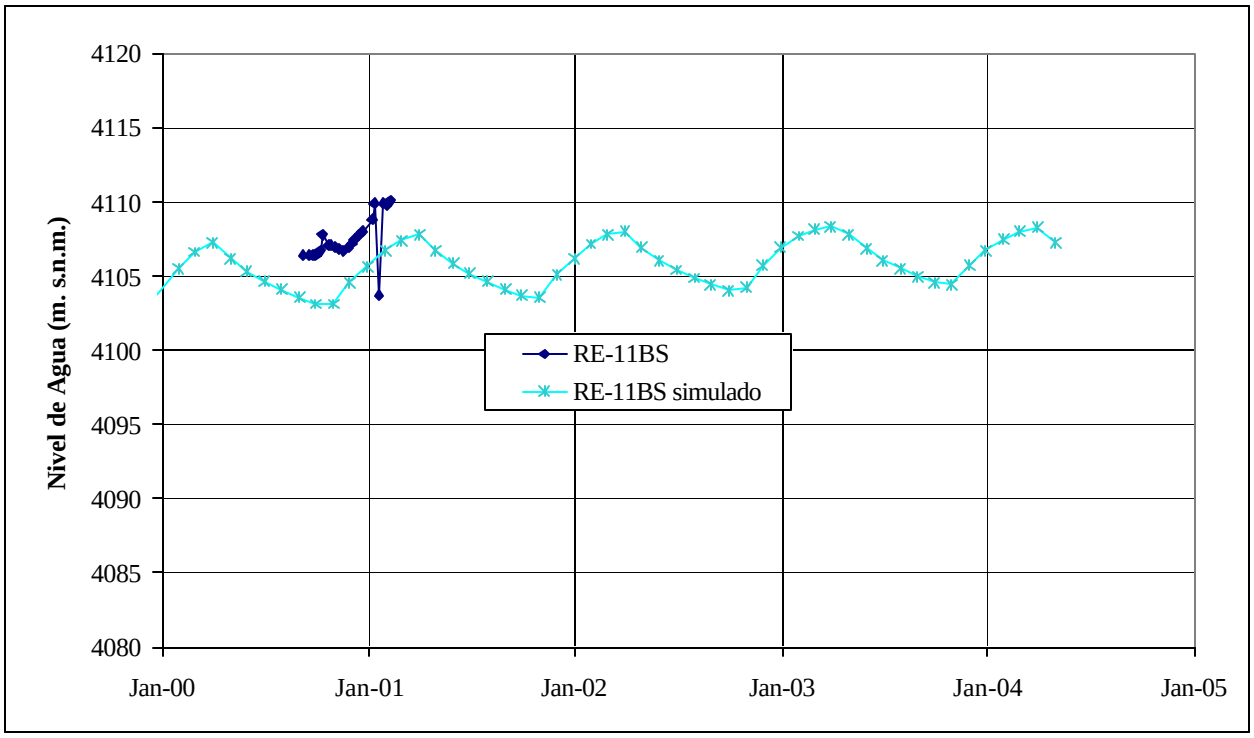


Figura 4.2n. Niveles de Agua Medidos y Simulados en el Pozo RE-10

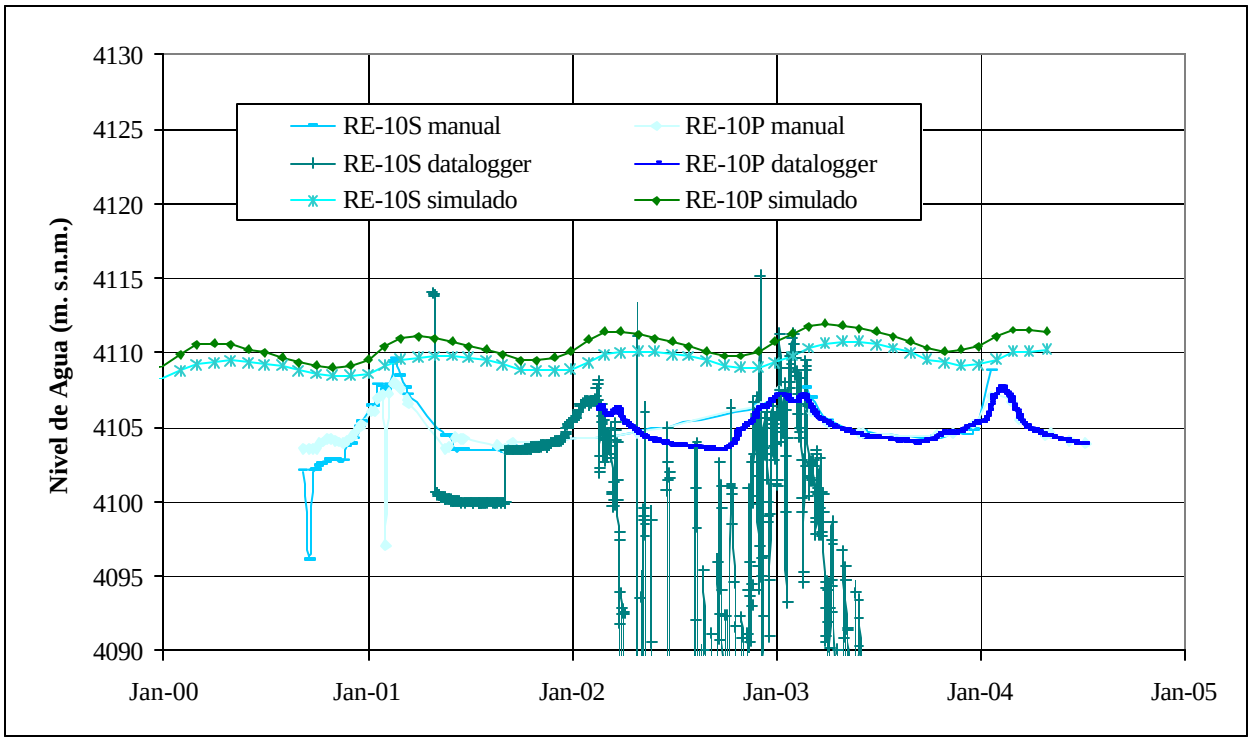


Figura 4.2o. Niveles de Agua Medidos y Simulados en el Pozo de Prueba 2

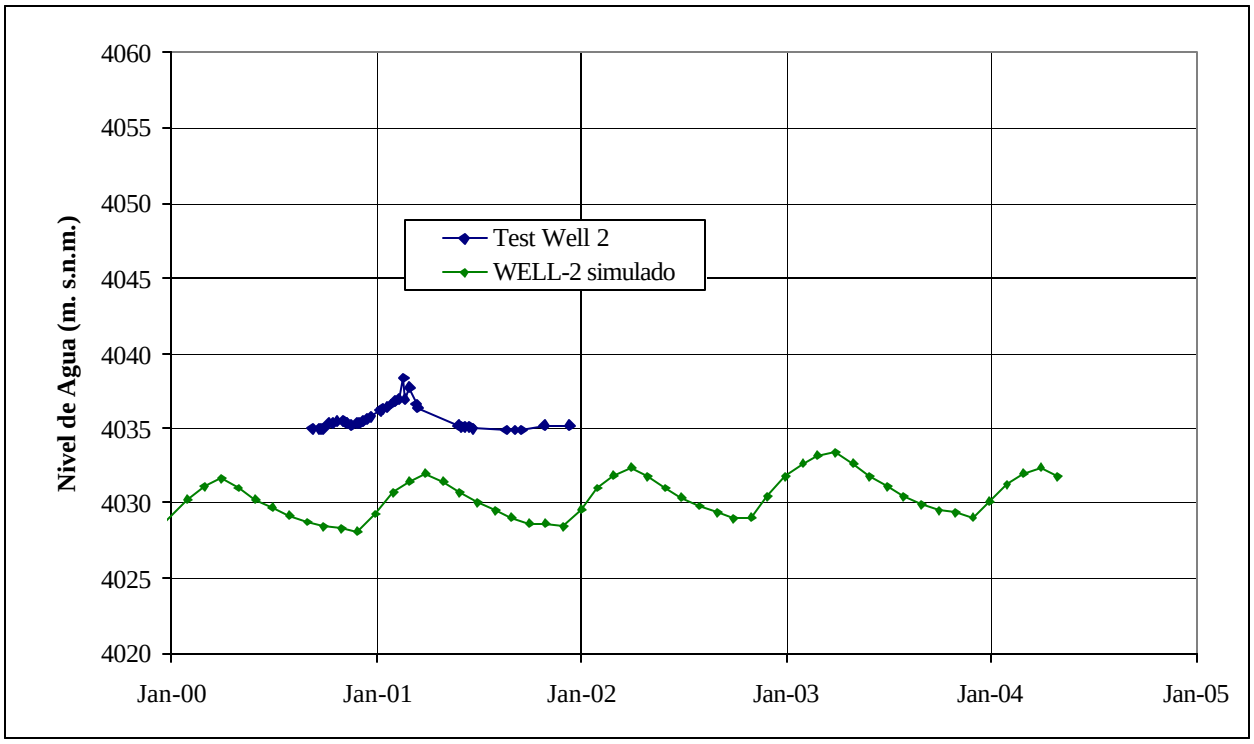


Figura 4.2p. Niveles de Agua Medidos y Simulados en el Pozo RE-12

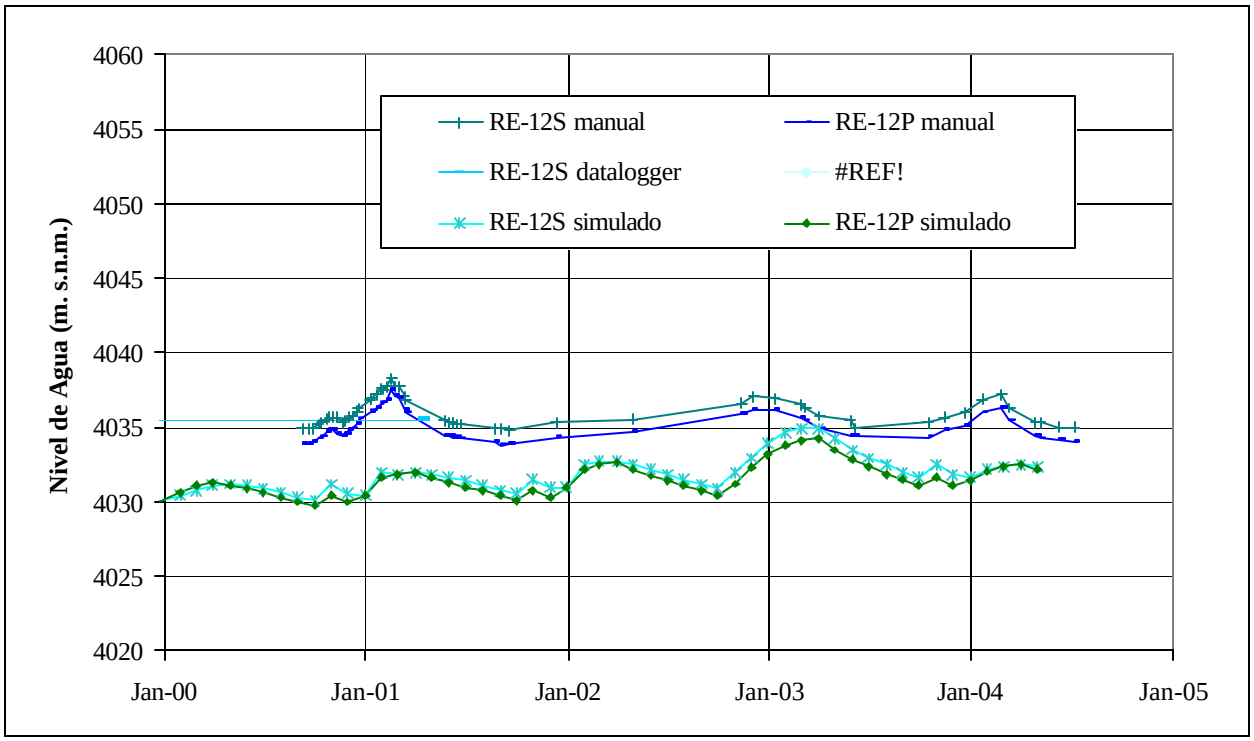


Figura 4.2q. Niveles de Agua Medidos y Simulados en el Pozo RE-13

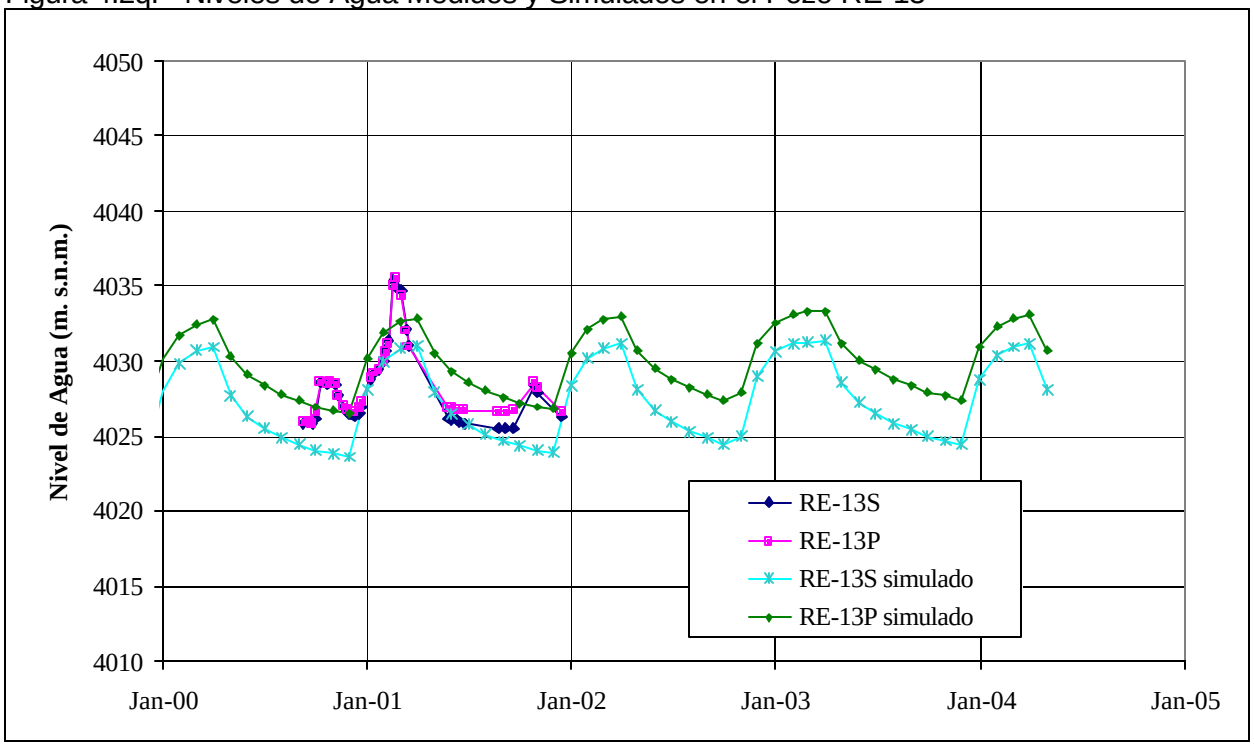


Figura 4.2r. Niveles de Agua Medidos y Simulados en el Pozo RE-17

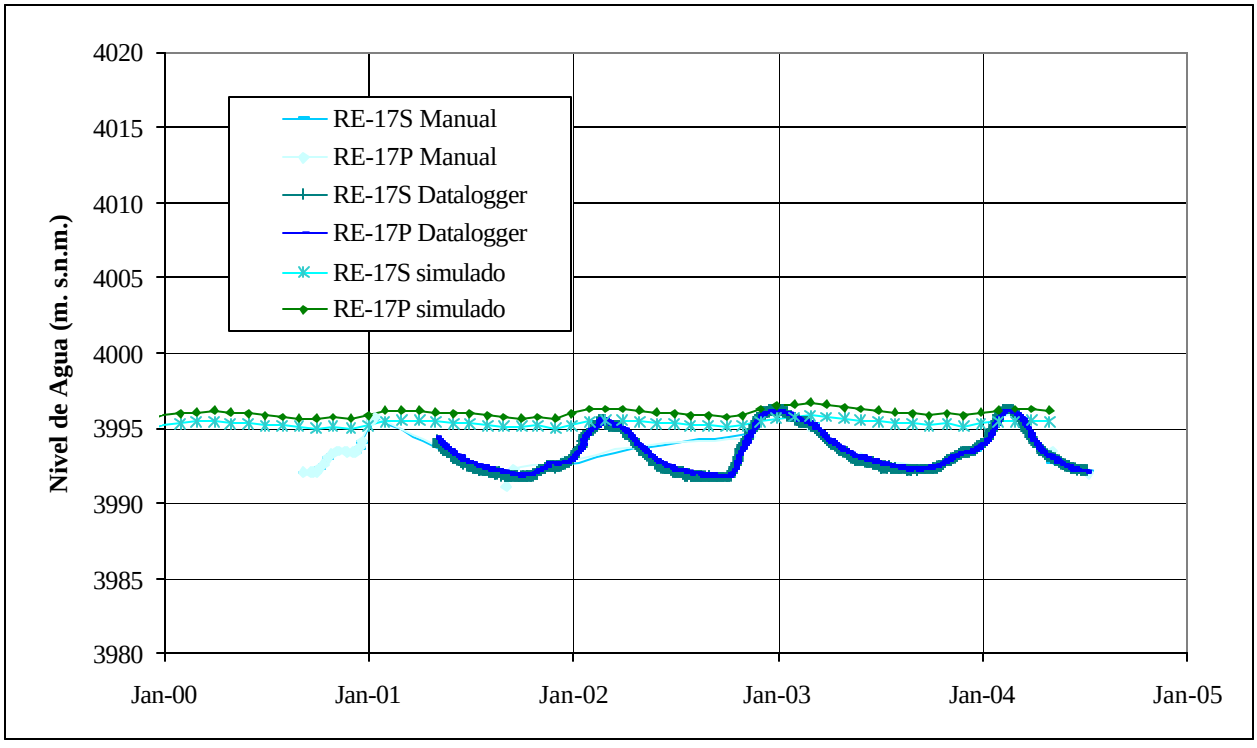


Figura 4.2s. Niveles de Agua Medidos y Simulados en el Pozo BT-4

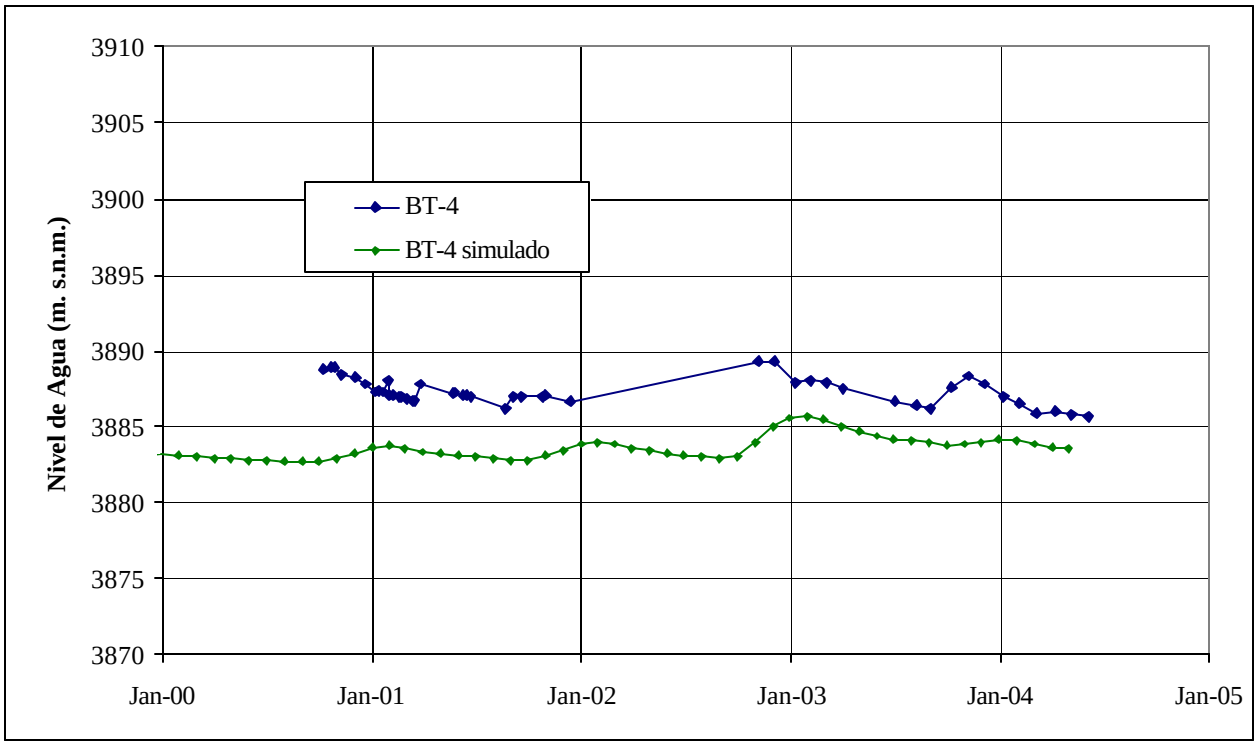


Figura 4.2t. Niveles de Agua Medidos y Simulados en el Pozo NEV-1

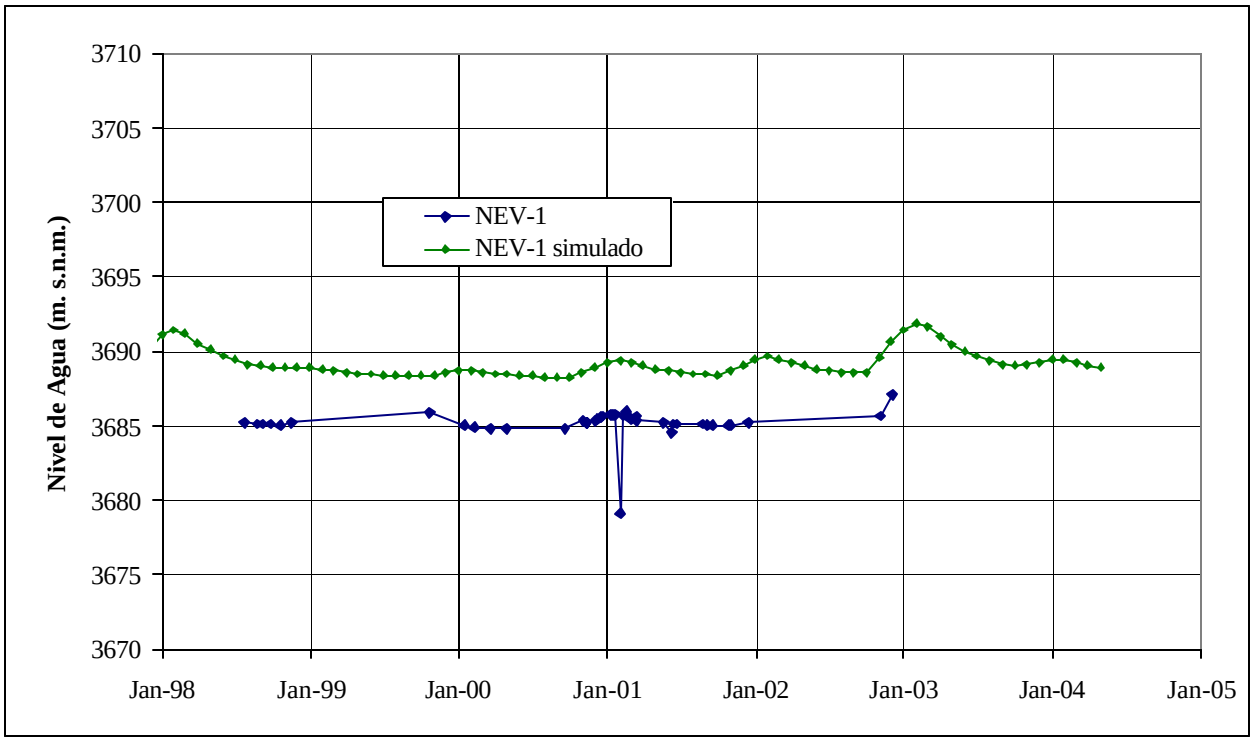


Figura 4.2u. Niveles de Agua Medidos y Simulados en el Pozo NEV-2

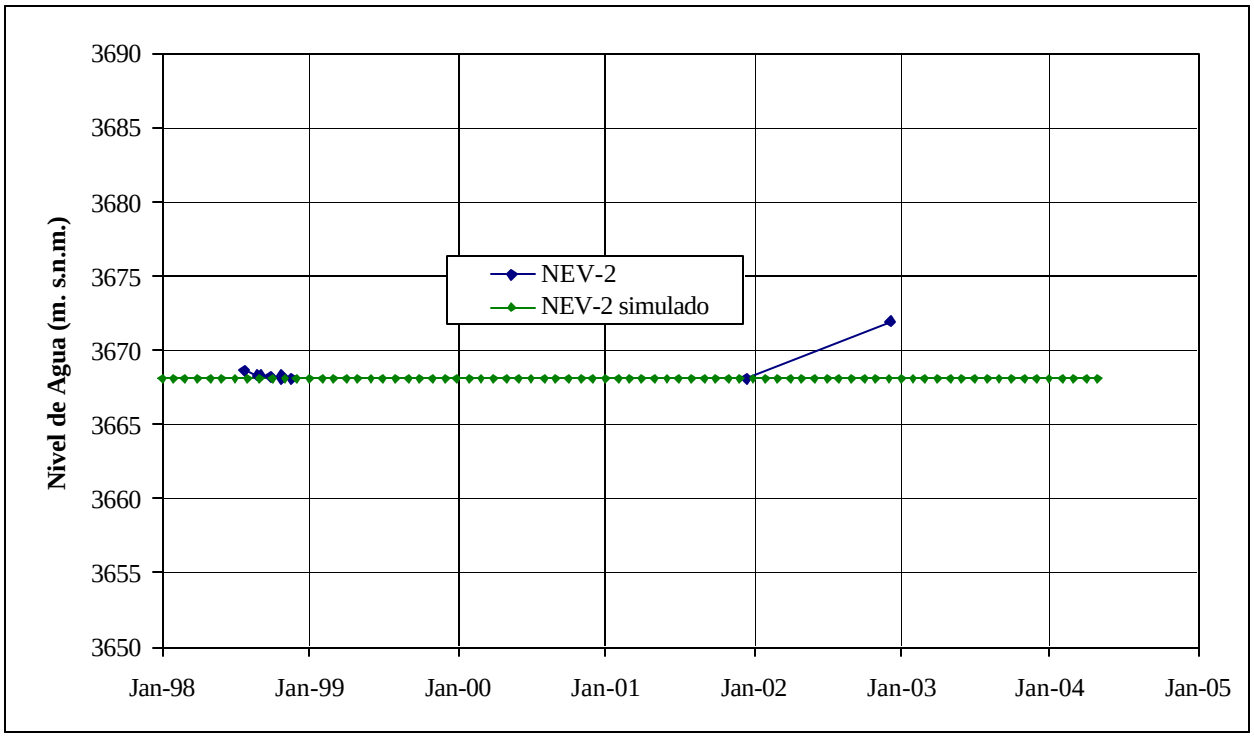
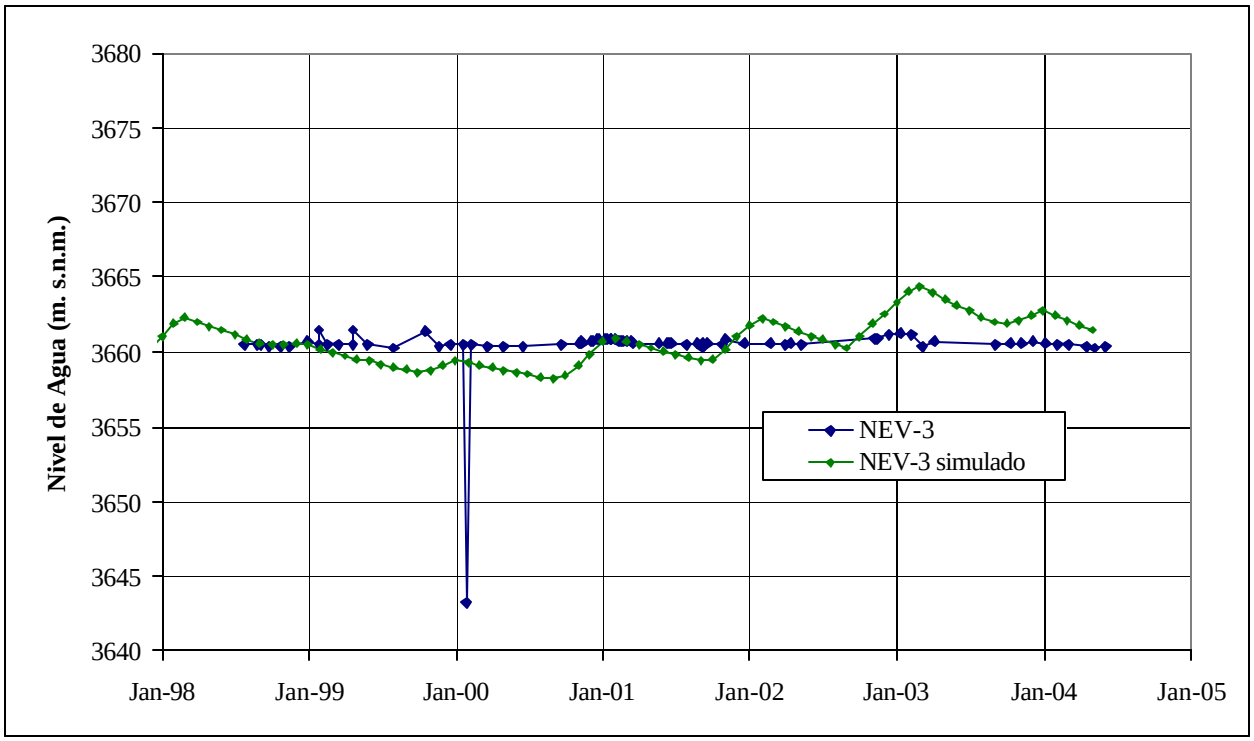
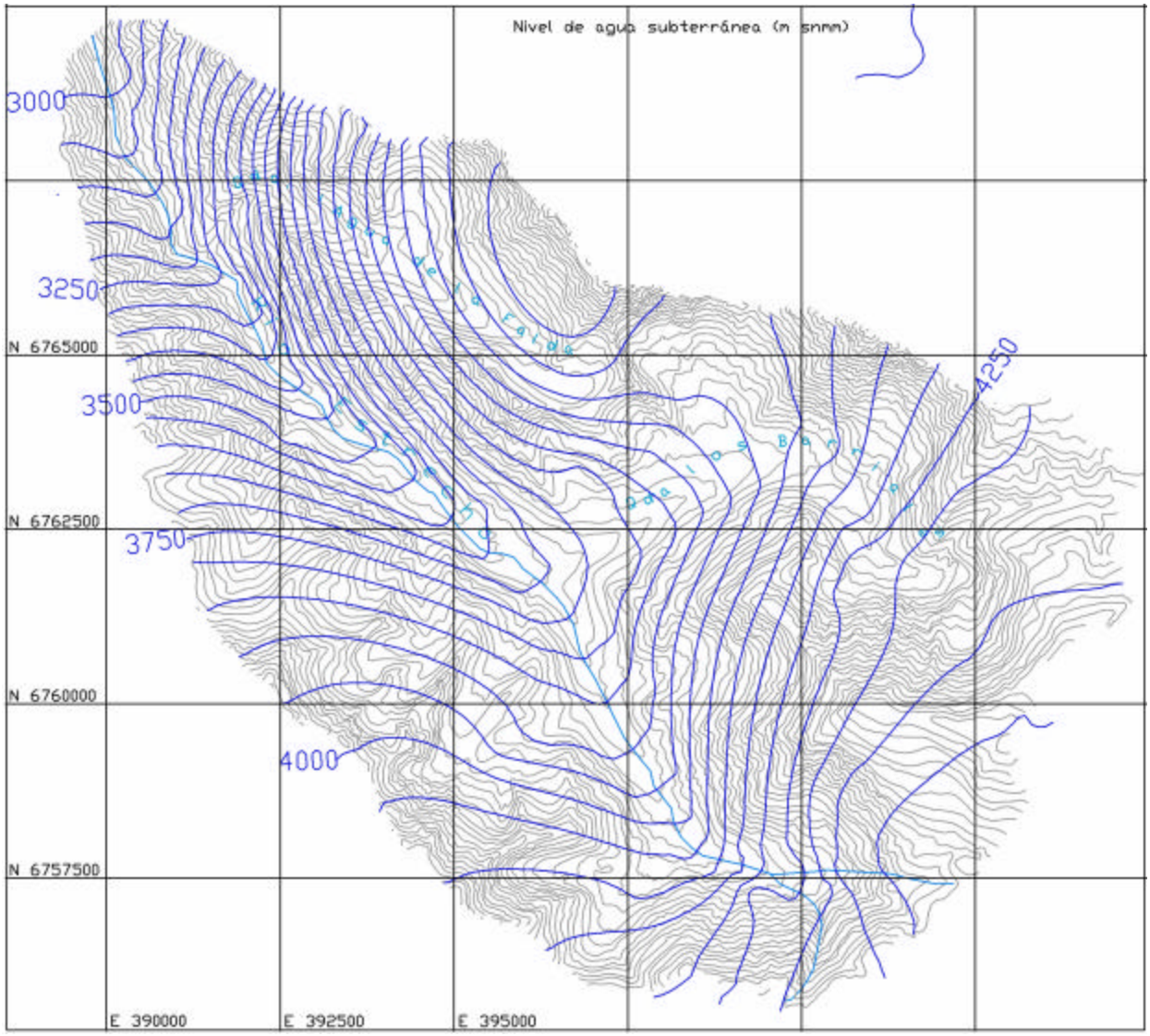


Figura 4.2v. Niveles de Agua Medidos y Simulados en el Pozo NEV-3



Los contornos de niveles de la superficie freática en el mes de Abril de 2004 se muestran en la Figura 4.3. Estos contornos concuerdan con los niveles medidos y conforman al esquema general previsto para la Cuenca del Estrecho.

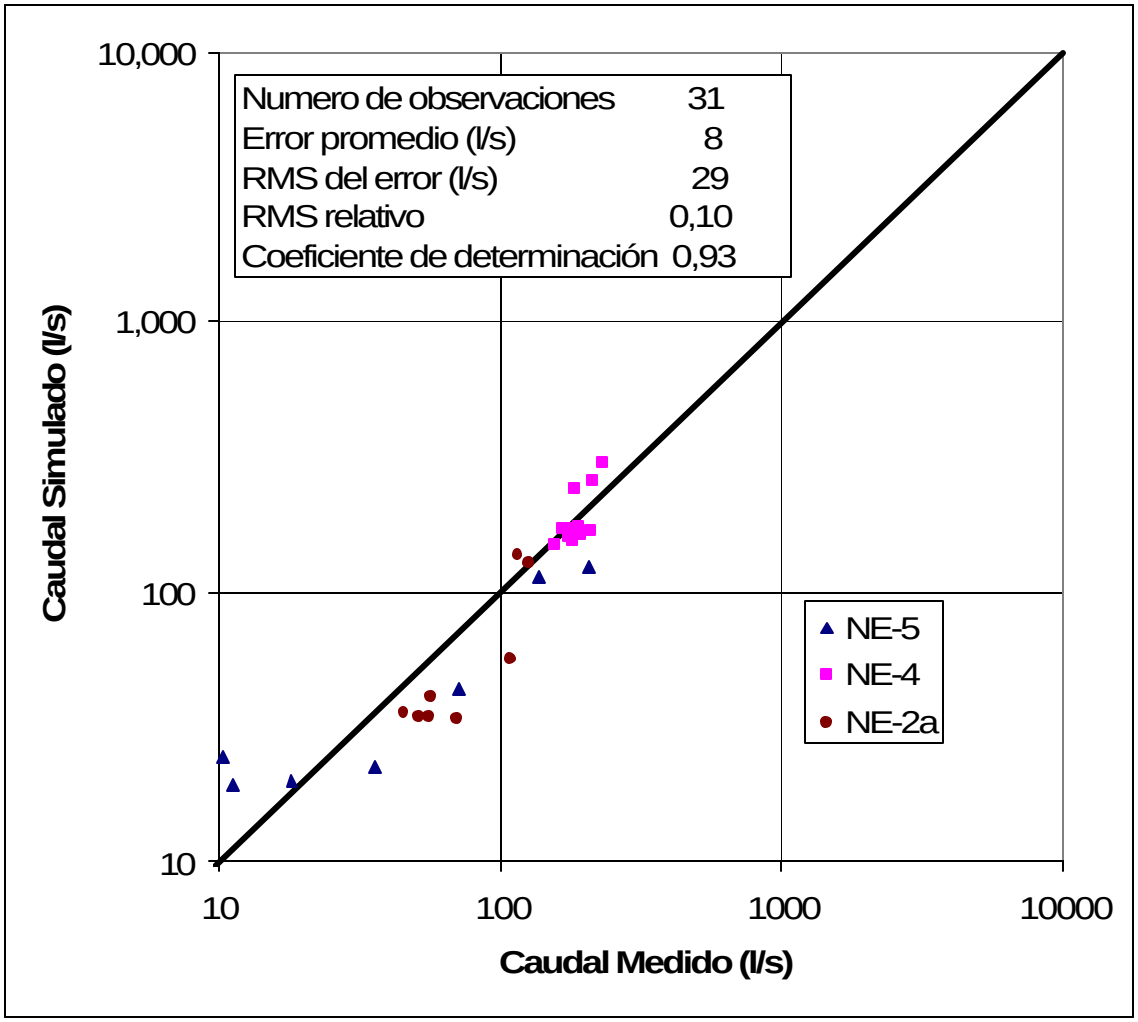
Figura 4.3. Contornos Simulados de Niveles de la Superficie Freática, mes de Abril de 2004



4.4 Validación del Modelo

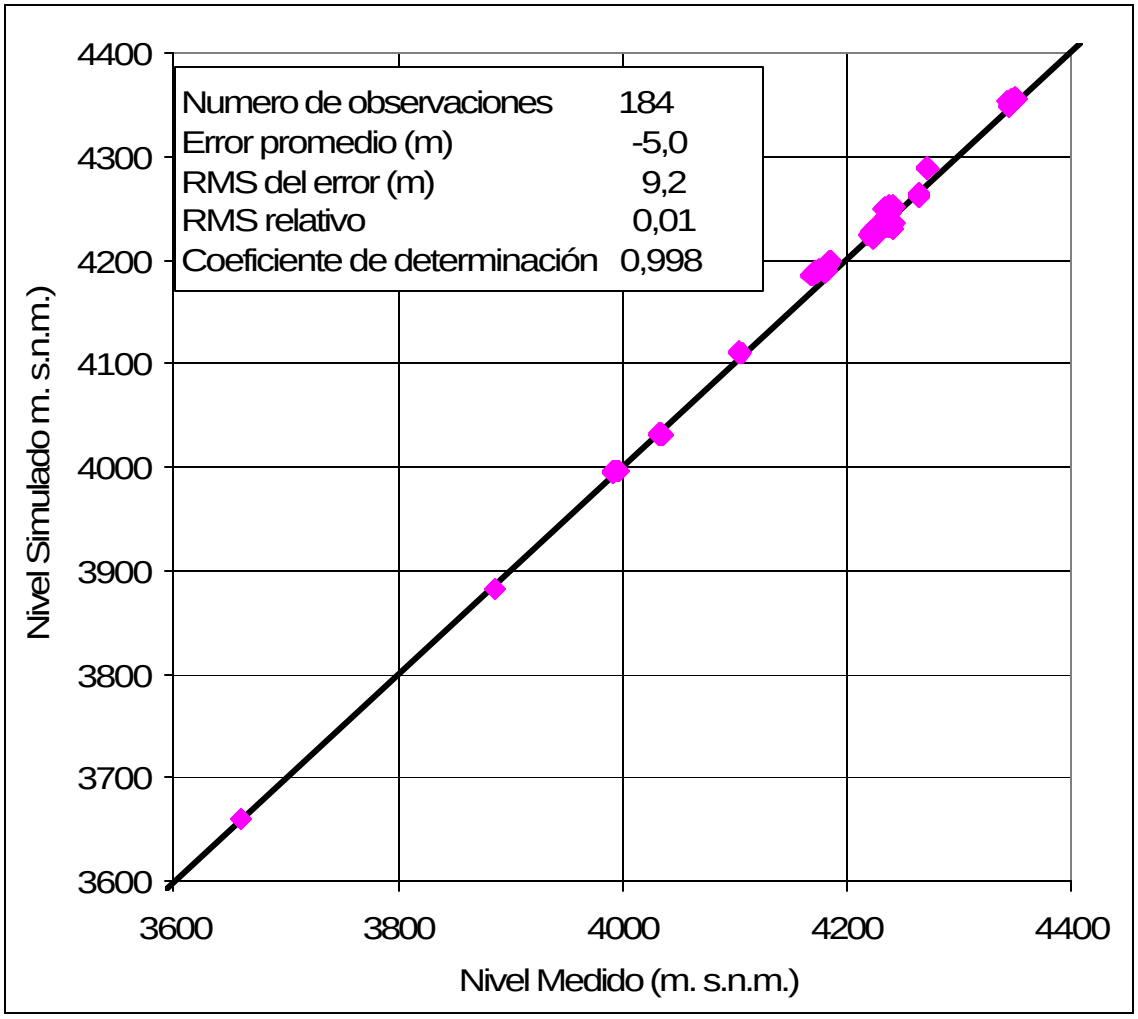
Después de la calibración del modelo usando los datos hasta abril 2004, se actualizó el modelo hasta abril de 2005 para validarlo. En la Figura 4.4 se comparan los caudales simulados con el promedio mensual de los caudales medidos. El modelo mantiene una buena correlación.

Figura 4.4. Caudales Medidos y Simulados, 1 abril de 2004 hasta 1 abril de 2005



En la Figura 4.5 se comparan los niveles simulados de agua subterránea con el promedio mensual de los niveles medidos. El modelo mantiene una buena correlación.

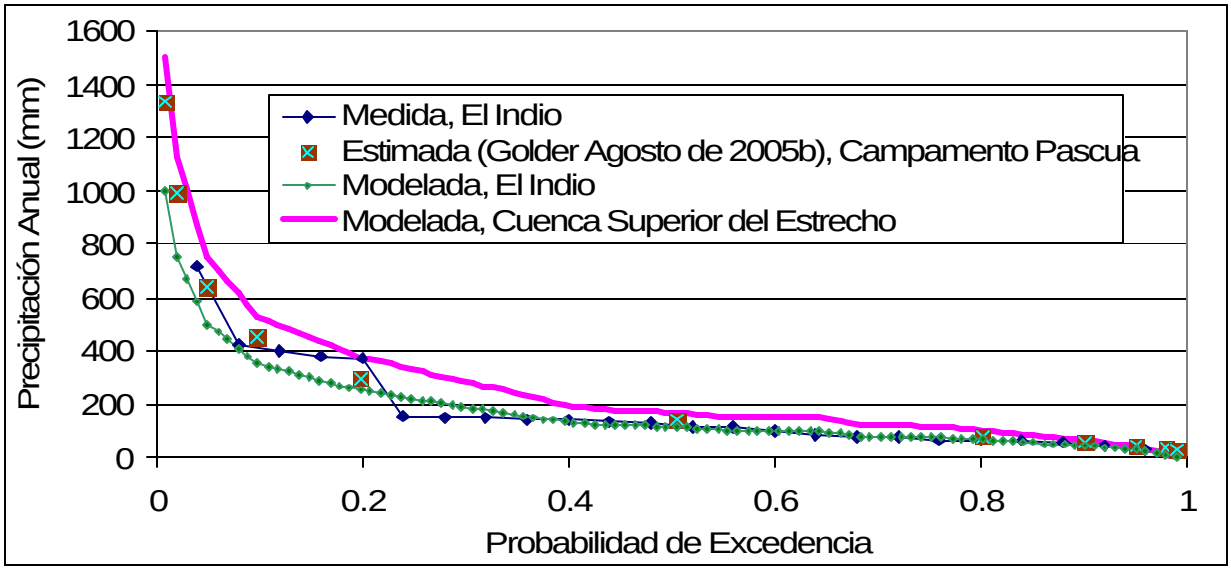
Figura 4.5. Niveles Medidos y Simulados de Agua Subterránea, 1 abril de 2004 hasta 1 abril de 2005



5 DISTRIBUCIONES DE CAUDAL

Se evaluó un rango de condiciones tanto húmedas como secas mediante el empleo de una serie estadísticamente representativa de 100 años de datos mensuales de precipitaciones (Zhan, 2002), basada en los registros de precipitaciones de El Indio. En la Figura 5.1 se compara la distribución simulada de las precipitaciones anuales con los valores de precipitaciones medidas y estimadas (Golder, noviembre de 2005b).

Figura 5.1. Distribución de Precipitaciones Anuales



La serie representativa de 100 años de datos de precipitaciones se utilizó en el modelo con el fin de estimar la distribución de caudales de aguas superficiales en determinados puntos de interés. Las distribuciones resultantes de los caudales medios anuales se comparan con las distribuciones estimadas (Golder, noviembre de 2005b) en la Figura 5.2 para el caso de la estación NE-2a y en la Figura 5.3 para el caso de la estación NE-4. Cabe destacar que resultaron similares estas distribuciones de flujo, en circunstancias que la estimación de caudales entregó valores algo relativamente más bajos para la estación NE-2a y algo más altos para la estación NE-4, para el caso de los períodos de retornos largos.

Figura 5.2. Distribuciones de Flujos Medios Anuales en la Estación NE-2a

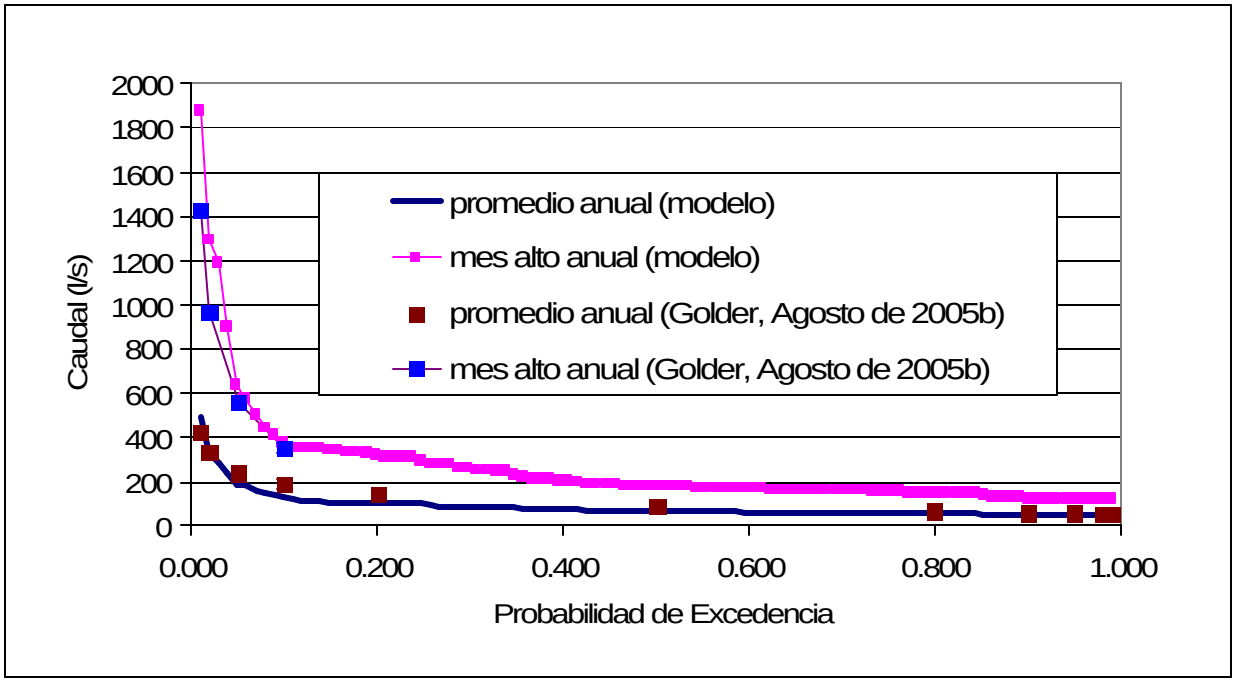
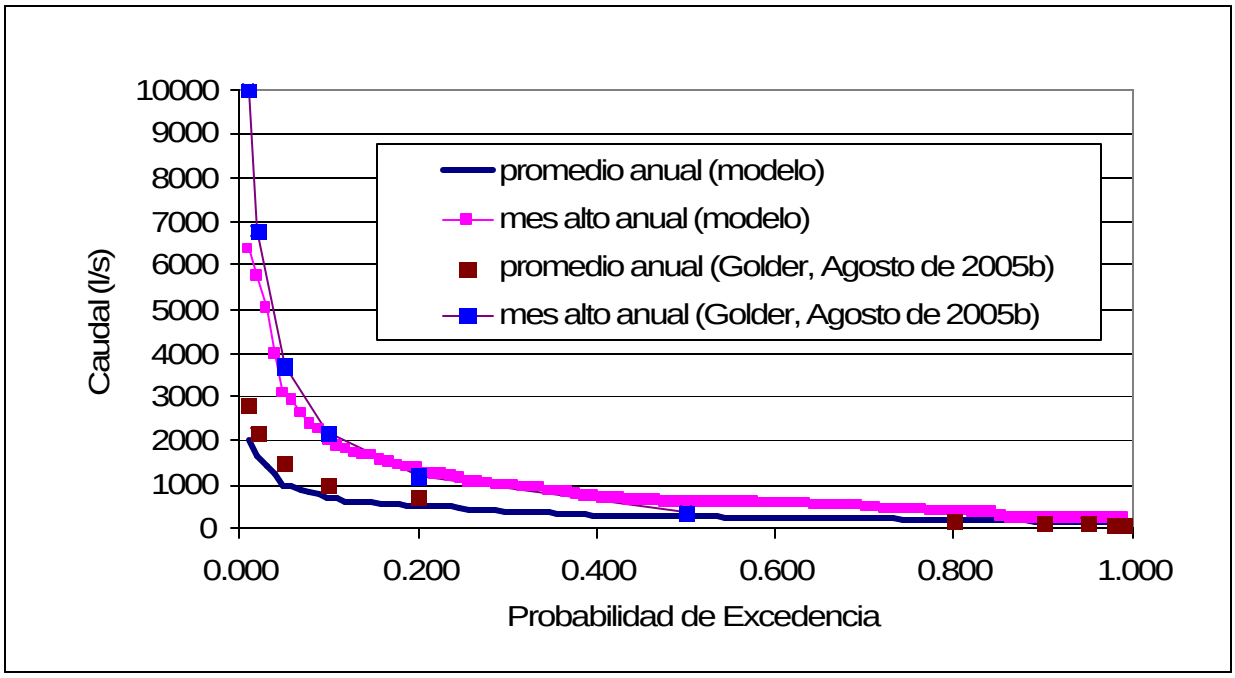


Figura 5.3. Distribuciones de Flujos Medios Anuales en la Estación NE-4



Las distribuciones simuladas de caudales mensuales se muestran de NE-5 en la Figura 5.4, de NE-2a en la Figura 5.5 y de NE-4 en la Figura 5.6.

Figura 5.4. Distribuciones de Caudales Mensuales en NE-5

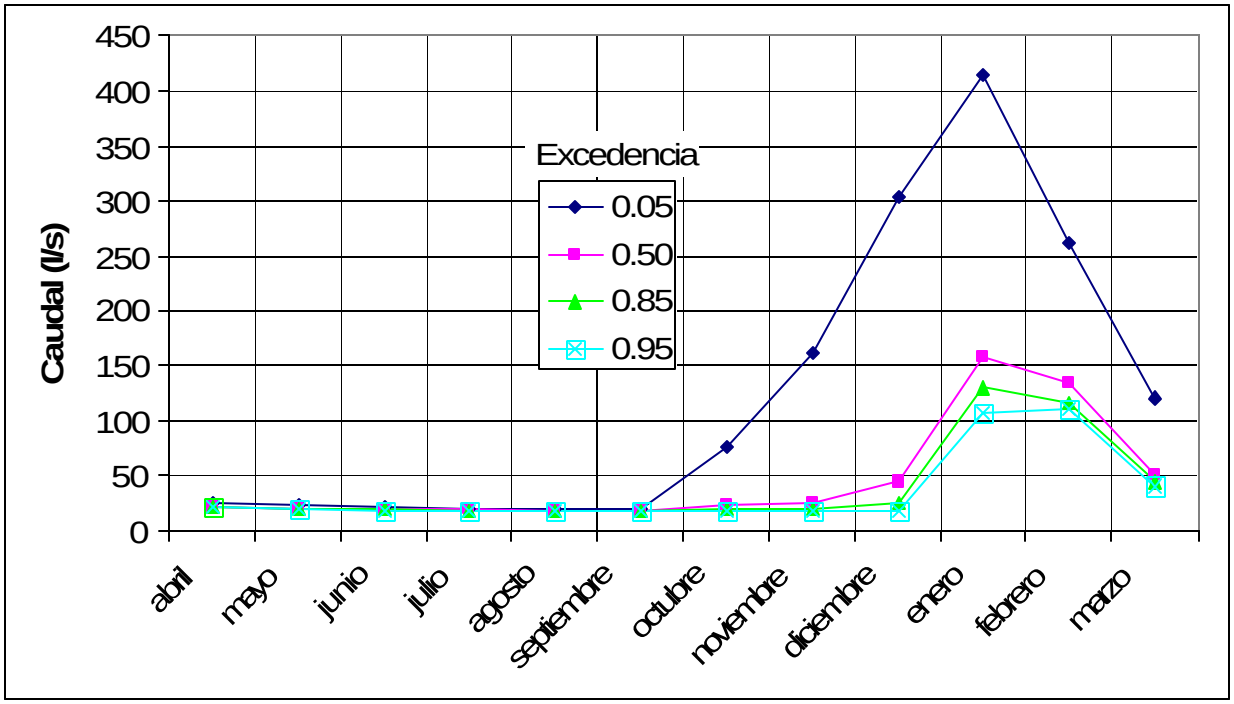


Figura 5.5. Distribuciones de Caudales Mensuales en NE-2a

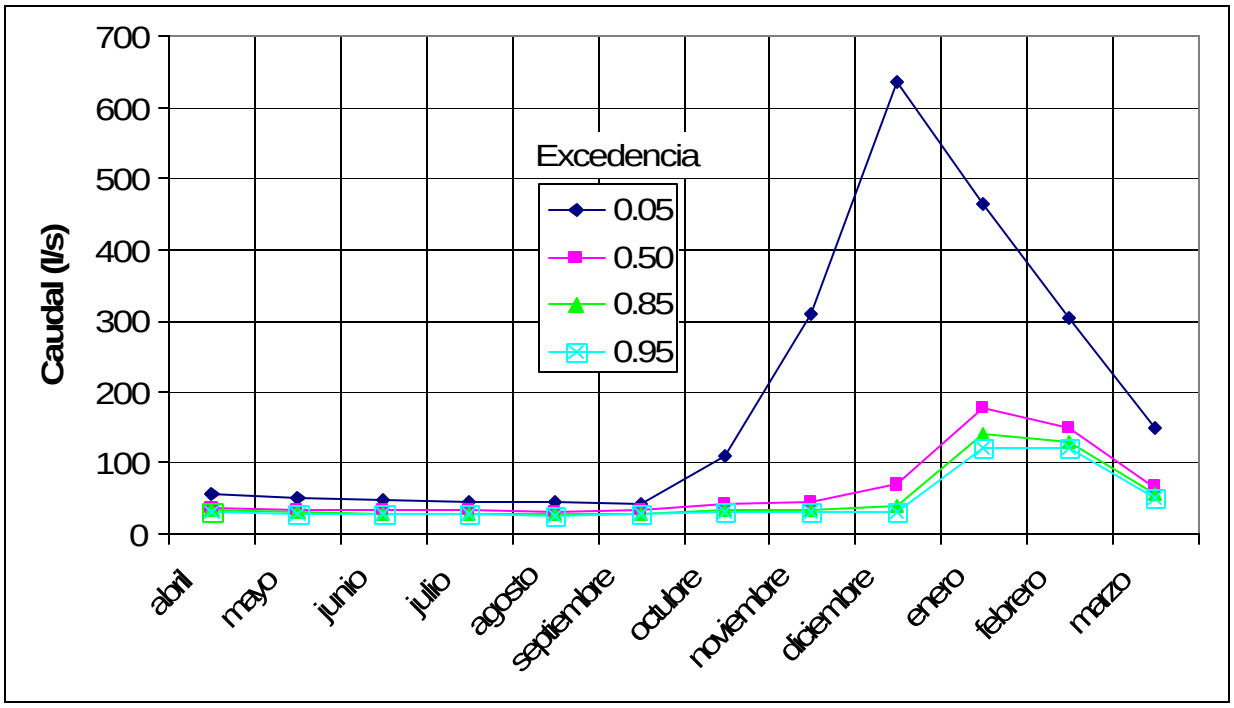
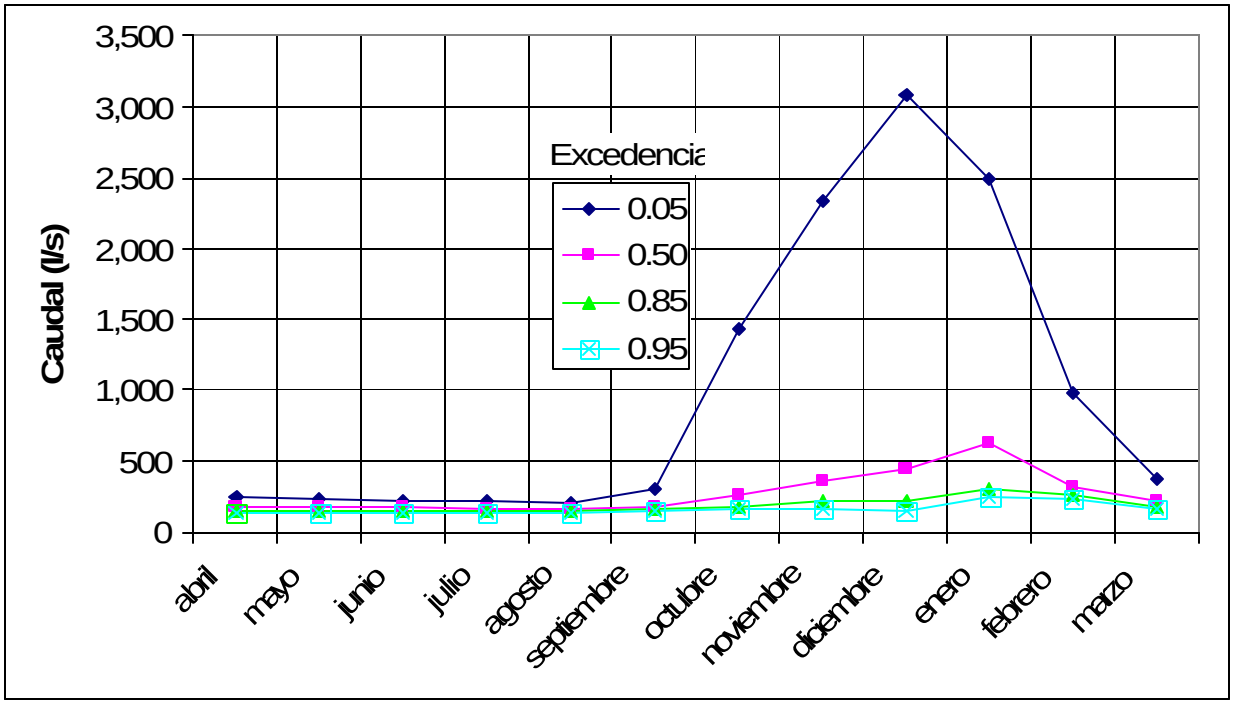


Figura 5.6. Distribuciones de Caudales Mensuales en NE-4



6 BALANCE HÍDRICO DE LA HOYA SUPERIOR DEL ESTRECHO

A continuación se entrega una presentación detallada del balance hídrico simulado para la Hoya Superior de la Cuenca del Río Estrecho, en que están ubicados los lugares de emplazamiento propuestos para el Rajo Abierto de Pascua-Lama y el Botadero de Estéril de Nevada Norte.

La forma de la Cuenca Superior del Río Estrecho aguas arriba de la estación fluviométrica NE-5 constituye una cuenca hidrogeológica natural. Debido a la existencia en este sector de alguna barrera al flujo subterráneo, el agua subterránea del sector es impulsada hacia la superficie (Golder, noviembre de 2005a). Como resultado, la descarga primaria de agua líquida desde la Cuenca Superior del Estrecho se produce en la forma de flujo superficial, medido en la estación NE-5. Además, hay componentes menores de evapotranspiración y descarga subterránea.

6.1 Balance Hídrico Resumido

En la Tabla 6.1 se presenta un balance hídrico anual resumido de la Cuenca Superior del Río Estrecho. El balance anual se presenta para un año hidráulico que extiende por definición desde el mes de Mayo de cada año hasta Abril del año siguiente. El balance hídrico anual consiste en componentes de afluentes, efluentes y almacenamiento.

- Los afluentes consisten de aguas de deshielo de nieve y glaciares, junto con un componente insignificante de aporte afluente de agua subterránea.

- Los efluentes consisten principalmente en pérdidas por sublimación de nieve y descargas de aguas superficiales, junto con componentes menores de efluentes de aguas subterráneas y de evapotranspiración de aguas subterráneas.

- El agua se almacena en la forma de agua subterránea y de nieve/hielo.

La suma de los aportes afluentes menos los efluentes salientes en cada año es igual a la suma de los componentes de almacenamiento. Nota el aumento de hielo almacenado en los años húmedos y la pérdida de hielo en los años secos. El glaciar pierde un promedio anual de hielo almacenado equivalente a 24 mm de agua sobre toda la cuenca superior de 15,5 km^2.

Tabla 6.1. Balance Hídrico Anual Resumido del Río Estrecho Superior

Año Terminando 30 Abr	Afluente		Efluente				Almacenaje	
	Precipitación (mm)	Afluente de Agua Subterránea (mm)	Agua Superficial (mm)	Sublimación (mm)	Efluente de Agua Subterránea (mm)	ET de Agua Subterránea (mm)	Accumulación / Pérdida de Nieve y Hielo (mm)	Cambio de Almacenaje de Agua Subterránea (mm)
1982	38	2	-68	-82	-8	-2	-113	-8
1983	205	2	-88	-134	-9	-2	-36	10
1984	214	2	-103	-145	-8	-2	-52	10
1985	589	2	-212	-245	-8	-2	114	10
1986	163	2	-100	-133	-8	-3	-74	-5
1987	544	2	-197	-217	-8	-3	114	7
1988	1055	2	-354	-347	-7	-3	342	4
1989	129	2	-121	-164	-7	-3	-155	-9
1990	186	2	-105	-135	-8	-3	-59	-5
1991	166	2	-101	-125	-8	-3	-65	-4
1992	203	2	-94	-135	-8	-2	-31	-5
1993	229	2	-117	-154	-8	-3	-52	1
1994	98	2	-84	-110	-8	-2	-91	-14
1995	117	2	-85	-111	-9	-2	-82	-7
1996	89	2	-79	-104	-9	-2	-94	-9
1997	63	1	-73	-95	-9	-2	-103	-11
1998	563	2	-200	-234	-8	-2	107	14
1999	92	2	-87	-112	-8	-2	-104	-11
2000	116	2	-82	-111	-9	-2	-79	-7
2001	219	2	-96	-144	-9	-2	-34	4
2002	195	2	-105	-140	-8	-2	-62	3
2003	626	2	-221	-257	-8	-3	132	8
2004	146	2	-99	-130	-8	-3	-84	-7
Mínimo	38	1	-68	-82	-7	-2	-155	-14
Mediano	186	2	-100	-135	-8	-2	-62	-5
Promedio	263	2	-125	-155	-8	-2	-24	-1
Máximo	1055	2	-354	-347	-9	-3	342	14

6.2 Balance Hídrico Anual

En la Tabla 6.2 se presenta un balance hídrico anual en mayores detalles para la Cuenca Superior del Río Estrecho. El balance hídrico total consiste en balances por separado de nieve/hielo, de agua superficial y de agua subterránea. Los tres balances se detallan a continuación:

- El balance hídrico de nieve/hielo está conformado de los componentes de precipitación, sublimación y deshielo.
- El balance hídrico de agua superficial está conformado de los componentes de aporte afluente de deshielo y de flujo basal, y los componentes de efluente de agua superficial más infiltración al sistema subterráneo.
- El balance hídrico de agua subterránea está conformado de los componentes de aporte afluente de infiltración de deshielo más recarga desde cauces fluviales. Los componentes efluentes son la descarga de flujo basal más evapotranspiración mas efluente de agua subterránea.

Tabla 6.2. Balance Hídrico Anual de la Cuenca del Estrecho Superior

	Nieve y Glaciar				Agua Superficial					Agua Subterránea						
	Afluente	**Efluente**		**Almacenaje**	**Afluente**			**Efluente**		**Afluente**			**Efluente**			**Almacenaje**
Año Hidrológico Terminando 30 Abr	Precipitación (mm)	Sublimación (mm)	Deshielo (mm)	Accumulación / Pérdida de Nieve y Hielo (mm)	Deshielo de Glaciar (l/s)	Deshielo de Nieve (l/s)	Flujo Basal (l/s)	Recarga de Agua Sub-terránea (l/s)	Efluente de Agua Superficial (l/s)	Recarga Directa de Deshielo de Nieve (l/s)	Recarga desde Agua Superficial (l/s)	Afluente de Agua Sub-terránea (l/s)	ET de Agua Sub-terránea (l/s)	Flujo Basal (l/s)	Efluente de Agua Sub-terránea (l/s)	Cambio de Almacenaje de Agua Subterránea (l/s)
1982	38	-82	-69	-113	34	0	20	-20	-34	0	20	1	-1	-20	-4	-4
1983	205	-134	-106	-36	34	13	21	-25	-43	5	25	1	-1	-21	-4	5
1984	214	-145	-121	-52	34	20	22	-25	-50	6	25	1	-1	-22	-4	5
1985	589	-245	-231	114	34	73	26	-28	-104	7	28	1	-1	-26	-4	5
1986	163	-133	-104	-74	34	13	25	-22	-49	5	22	1	-1	-25	-4	-2
1987	544	-217	-213	114	34	64	27	-28	-97	7	28	1	-1	-27	-4	3
1988	1055	-347	-366	342	34	139	29	-29	-174	7	29	1	-1	-29	-4	2
1989	129	-164	-120	-155	34	21	27	-23	-59	4	23	1	-1	-27	-4	-4
1990	186	-135	-109	-59	34	15	26	-23	-52	5	23	1	-1	-26	-4	-2
1991	166	-125	-107	-65	34	14	25	-23	-50	5	23	1	-1	-25	-4	-2
1992	203	-135	-99	-31	34	10	25	-22	-46	5	22	1	-1	-25	-4	-2
1993	229	-154	-127	-52	34	23	25	-25	-57	6	25	1	-1	-25	-4	1
1994	98	-110	-79	-91	34	4	24	-21	-41	1	21	1	-1	-24	-4	-7
1995	117	-111	-87	-82	34	6	23	-21	-42	3	21	1	-1	-23	-4	-3
1996	89	-104	-79	-94	34	3	22	-20	-39	2	20	1	-1	-22	-4	-5
1997	63	-95	-71	-103	34	1	21	-20	-36	0	20	1	-1	-21	-4	-5
1998	563	-234	-222	107	34	69	24	-29	-98	7	29	1	-1	-24	-4	7
1999	92	-112	-84	-104	34	6	23	-21	-42	1	21	1	-1	-23	-4	-6
2000	116	-111	-84	-79	34	5	22	-21	-40	3	21	1	-1	-22	-4	-3
2001	219	-144	-109	-34	34	14	23	-24	-47	5	24	1	-1	-23	-4	2
2002	195	-140	-116	-62	34	18	23	-24	-51	5	24	1	-1	-23	-4	1
2003	626	-257	-238	132	34	76	26	-28	-108	7	28	1	-1	-26	-4	4
2004	146	-130	-100	-84	34	11	25	-22	-48	4	22	1	-1	-25	-4	-4

Se nota los componentes comunes entre los 3 balances.

- La “Recarga de agua subterránea” representa un afluente al sistema de agua subterránea y un efluente del sistema de agua superficial.
- El “Flujo basal” representa el opuesto, un efluente del sistema de agua subterránea y un afluente al sistema de agua superficial.
- El “Deshielo” del balance de nieve y hielo se componen del “Deshielo de glaciar” y “Deshielo de nieve”, afluentes al sistema de agua superficial, y del “Recarga directa de deshielo de nieve”, afluente al sistema de agua subterránea.
- Se presenta gráficamente el balance de nieve y glaciar en la Figura 6.1, el balance de agua superficial en la Figura 6.2 y el balance de agua subterránea en la Figura 6.3.

Figura 6.1. Balance Hídrico Simulado de Nieve y Glaciar de la Cuenca Superior del Río Estrecho (mm de agua)

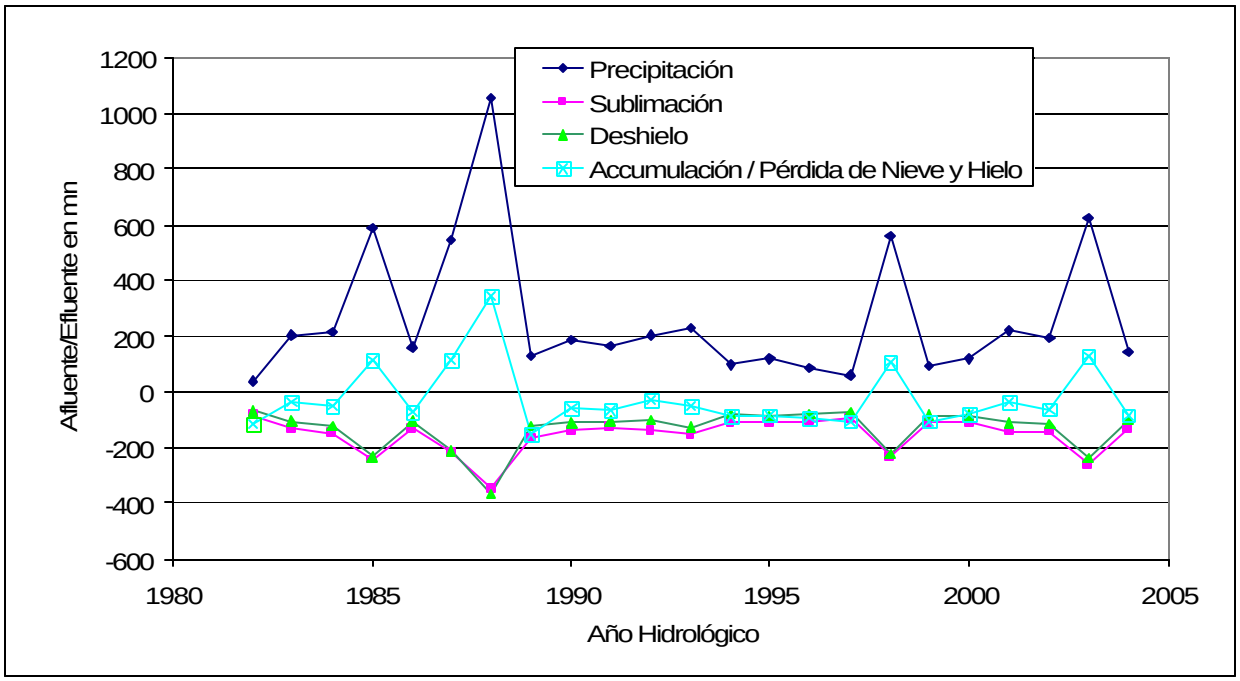


Figura 6.2. Balance Hídrico Simulado de Agua Superficial de la Cuenca Superior del Río Estrecho (l/s)

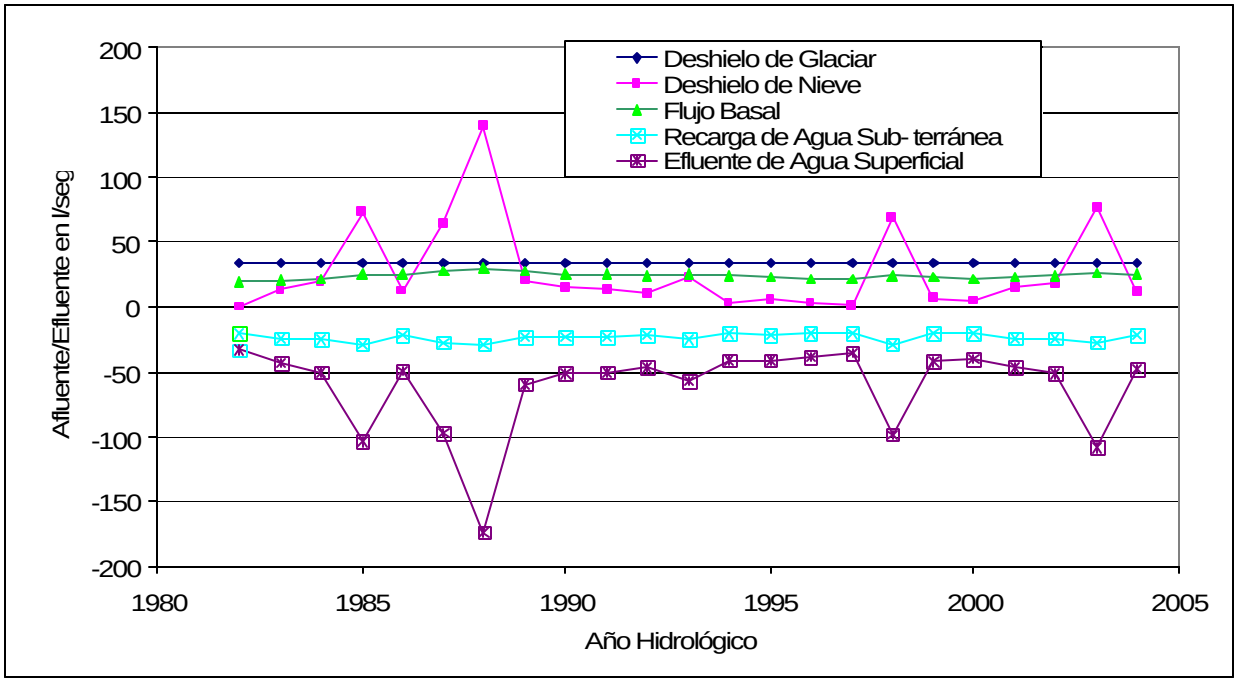
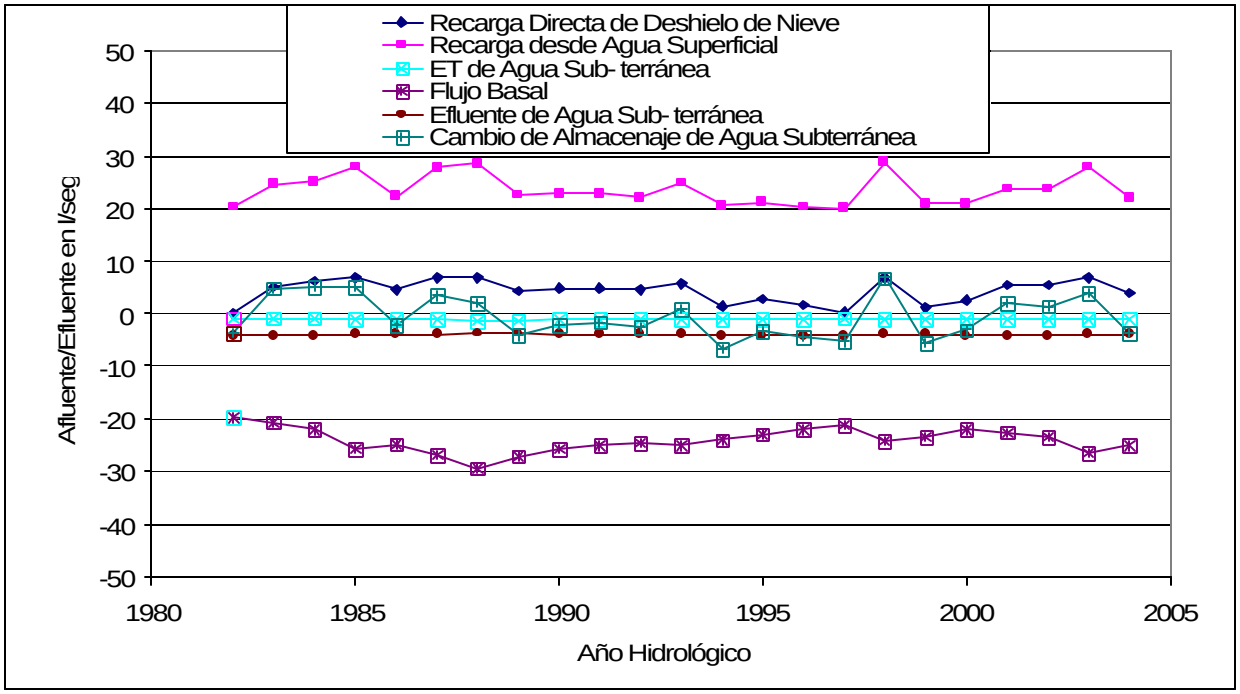


Figura 6.3. Balance Hídrico Simulado de Agua Subterránea de la Cuenca Superior del Río Estrecho (l/s)



6.3 Balance Hídrico Mensual

En la Tabla 6.3 se presenta, en la forma de la Tabla 6.2 con valores mensuales, el balance hídrico mensual simulado para la Cuenca Superior del Río Estrecho.

Tabla 6.3. Balance Hídrico Mensual, Cuenca Superior del Río Estrecho

	Balance de Hielo y Nieve					Balance de Agua Superficial					Balance de Agua Subterranea						
	Almacenaje	Afluente	Efluente			Afluente			Efluente		Afluente			Efluente			Almacenaje
	Acumulación / Pérdida de Nieve y Hielo (mm)	Precipitación (mm)	Sublimación/ Evaporación (mm)	Deshielo (mm)	Deshielo (l/s)	Deshielo de Glaciar (l/s)	Deshielo de Nieve (l/s)	Flujo Basal (l/s)	Recarga de Agua Subterránea (l/s)	Efluente de Agua Superficial (l/s)	Recarga Directa de Deshielo de Nieve (l/s)	Recarga desde Agua Superficial (l/s)	Afluente de Agua Subterránea (l/s)	ET de Agua Subterránea (l/s)	Flujo Basal (l/s)	Efluente de Agua Sub-terránea (l/s)	Cambio de Almacenaje de Agua Subterránea (l/s)
May-01	0	0	0	0	0	0	0	20	0	20	0	0	1	0	20	4	-24
Jun-01	-2	0	3	0	0	0	0	20	0	20	0	0	1	0	20	4	-24
Jul-01	0	4	4	0	0	0	0	20	0	20	0	0	1	0	20	4	-23
Aug-01	22	30	7	0	0	0	0	19	0	19	0	0	1	1	19	4	-23
Sep-01	-10	0	10	0	0	0	0	18	0	18	0	0	1	1	18	4	-22
Oct-01	-9	0	8	0	2	0	2	18	2	18	0	2	1	1	18	4	-20
Nov-01	-13	0	10	3	17	17	1	17	17	17	0	17	1	1	17	4	-4
Dec-01	-17	0	9	8	47	47	0	17	47	17	0	47	1	1	17	4	26
Jan-02	-32	1	9	24	141	141	0	19	63	96	0	63	1	1	19	4	39
Feb-02	-30	1	7	24	139	139	0	23	60	102	0	60	1	1	23	4	33
Mar-02	-15	2	7	10	62	62	0	24	54	32	0	54	1	1	24	4	25
Apr-02	-4	0	4	0	0	0	0	21	0	21	0	0	1	1	21	4	-26
May-02	0	3	3	0	0	0	0	19	0	19	0	0	1	1	19	4	-23
Jun-02	-42	47	5	0	0	0	0	19	0	19	0	0	1	0	19	4	-23
Jul-02	62	67	5	0	0	0	0	18	0	18	0	0	1	0	18	4	-22
Aug-02	-5	3	8	0	0	0	0	18	0	18	0	0	1	1	18	4	-22
Sep-02	27	39	12	0	0	0	0	17	0	18	0	0	1	1	17	4	-22
Oct-02	-14	5	16	3	20	0	20	18	14	25	0	14	1	1	18	4	-9
Nov-02	-28	0	17	10	60	17	26	17	36	24	18	36	1	1	17	4	32
Dec-02	-38	0	19	18	108	47	42	20	65	43	20	65	1	1	20	4	61
Jan-03	-50	0	14	36	209	141	49	24	68	148	20	68	1	1	24	4	58
Feb-03	-25	15	13	27	160	139	16	26	59	123	4	59	1	1	26	4	33
Mar-03	-20	0	8	12	68	62	7	27	53	42	0	53	1	1	27	4	21
Apr-03	15	25	10	0	0	0	0	23	1	22	0	1	1	1	23	4	-26
May-03	4	12	8	0	0	0	0	21	0	20	0	0	1	1	21	4	-24
Jun-03	28	33	5	0	0	0	0	20	0	20	0	0	1	0	20	4	-23
Jul-03	63	68	5	0	0	0	0	19	0	19	0	0	1	0	19	4	-23
Aug-03	-45	54	9	0	0	0	0	19	0	19	0	0	1	1	19	4	-23
Sep-03	-14	0	14	0	1	0	1	18	0	19	0	0	1	1	18	4	-22
Oct-03	-16	5	17	4	23	0	23	19	14	28	0	14	1	1	19	4	-9
Nov-03	-25	4	18	11	66	17	29	18	38	26	20	38	1	1	18	4	36
Dec-03	-26	15	21	21	122	47	55	21	67	56	20	67	1	1	21	4	61
Jan-04	-55	7	20	42	249	141	68	26	70	185	20	70	1	1	26	4	59
Feb-04	-34	8	12	31	184	139	31	28	58	141	13	58	1	1	28	4	38
Mar-04	-16	6	10	12	72	62	10	30	51	50	0	51	1	2	30	4	17
Apr-04	-6	0	6	0	0	0	0	25	2	23	0	2	1	1	25	4	-27
May-04	-1	0	0	0	0	0	0	22	1	21	0	1	1	1	22	4	-26
Jun-04	164	169	5	0	0	0	0	21	1	20	0	1	1	1	21	4	-24
Jul-04	350	357	7	0	0	0	0	20	1	20	0	1	1	1	20	4	-24
Aug-04	17	38	21	0	0	0	0	20	0	19	0	0	1	1	20	4	-23
Sep-04	-13	18	31	0	2	0	2	19	0	21	0	0	1	1	19	4	-23
Oct-04	-49	0	36	13	79	0	79	20	29	70	0	29	1	1	20	4	5
Nov-04	-68	1	38	32	187	17	151	25	67	125	20	67	1	1	25	4	59
Dec-04	-90	0	37	53	311	47	244	30	68	253	20	68	1	2	30	4	54
Jan-05	-99	0	29	70	411	141	251	33	63	361	20	63	1	2	33	4	45
Feb-05	-65	0	18	48	282	139	122	34	58	238	20	58	1	2	34	4	39
Mar-05	-26	0	11	15	87	62	25	34	44	77	0	44	1	2	34	4	5
Apr-05	-5	0	5	0	0	0	0	29	4	25	0	4	1	1	29	4	-29
May-05	2	9	7	0	0	0	0	26	3	23	0	3	1	1	26	4	-26
Jun-05	26	31	5	0	0	0	0	24	2	22	0	2	1	1	24	4	-25
Jul-05	67	72	6	0	0	0	0	22	2	21	0	2	1	1	22	4	-24
Aug-05	-7	2	9	0	0	0	0	22	1	20	0	1	1	1	22	4	-24
Sep-05	-8	5	13	0	0	0	0	21	1	20	0	1	1	1	21	4	-24
Oct-05	10	28	15	2	14	0	14	20	11	29	0	11	1	1	20	4	-14
Nov-05	-28	0	18	10	57	17	25	20	36	25	16	36	1	2	20	4	27
Dec-05	-36	0	20	17	98	47	33	24	55	49	18	55	1	2	24	4	44
Jan-06	-50	0	14	37	217	141	56	29	58	168	20	58	1	2	29	4	44
Feb-06	-33	5	11	27	160	139	19	31	50	140	1	50	1	1	31	4	16
Mar-06	-16	3	8	11	65	62	4	32	43	55	0	43	1	2	32	4	5
Apr-06	-1	8	8	0	0	0	0	27	4	23	0	4	1	1	27	4	-28
May-06	169	177	8	0	0	0	0	24	3	21	0	3	1	1	24	4	-26
Jun-06	37	43	6	0	0	0	0	23	2	21	0	2	1	1	23	4	-24
Jul-06	75	81	7	0	0	0	0	22	2	20	0	2	1	1	22	4	-24
Aug-06	154	166	11	0	0	0	0	21	2	20	0	2	1	1	21	4	-24
Sep-06	-25	0	24	0	1	0	1	20	1	21	0	1	1	1	20	4	-23
Oct-06	38	75	27	9	55	0	55	21	24	52	0	24	1	1	21	4	-1
Nov-06	-59	3	34	28	165	17	129	26	67	104	20	67	1	2	26	4	57
Dec-06	-60	0	33	47	278	47	211	31	65	224	20	65	1	2	31	4	50
Jan-07	-86	6	26	65	398	141	225	34	59	340	20	59	1	2	34	4	41
Feb-07	-60	4	17	47	277	139	118	36	55	238	20	55	1	2	36	4	35
Mar-07	3	31	13	15	86	62	25	36	47	75	0	47	1	2	36	4	6
Apr-07	8	16	10	1	4	0	4	30	7	27	0	7	1	1	30	4	-27
May-07	220	215	5	0	0	0	0	27	4	23	0	4	1	1	27	4	-27
Jun-07	42	51	9	0	0	0	0	25	3	22	0	3	1	1	25	4	-26
Jul-07	382	390	10	0	0	0	0	23	2	21	0	2	1	1	23	4	-25
Aug-07	275	298	23	0	0	0	0	22	2	20	0	2	1	1	22	4	-24
Sep-07	16	52	35	0	2	0	2	21	2	22	0	2	1	1	21	4	-24
Oct-07	-10	48	42	16	94	0	94	24	41	77	0	41	1	1	24	4	13
Nov-07	-93	0	49	44	291	17	224	30	63	308	20	63	1	2	30	4	49
Dec-07	-143	0	57	86	505	47	439	34	60	459	20	60	1	2	34	3	42
Jan-08	-172	0	50	121	715	141	554	36	54	676	20	54	1	2	36	3	35
Feb-08	-95	1	28	70	412	139	283	38	53	378	20	53	1	2	38	3	31
Mar-08	-48	0	21	27	162	62	100	39	52	149	0	52	1	2	39	3	9
Apr-08	-16	0	15	0	3	0	3	32	7	27	0	7	1	1	32	3	-28
May-08	70	82	12	0	0	0	0	29	5	24	0	5	1	1	29	3	-27
Jun-08	-4	5	9	0	0	0	0	26	4	23	0	4	1	1	26	3	-26
Jul-08	-8	3	9	0	0	0	0	24	3	22	0	3	1	1	24	3	-25
Aug-08	-8	4	12	0	0	0	0	23	2	21	0	2	1	1	23	4	-24
Sep-08	3	20	17	0	0	0	0	22	2	21	0	2	1	1	22	4	-24
Oct-08	-23	0	20	2	15	0	15	22	12	24	0	12	1	1	22	4	-14
Nov-08	-32	0	22	10	59	17	30	22	43	25	13	43	1	2	22	4	30
Dec-08	-39	0	19	20	120	47	56	28	50	83	15	50	1	2	28	4	32
Jan-09	-44	14	20	39	227	141	69	32	54	188	17	54	1	2	32	4	34
Feb-09	-48	0	11	36	213	139	68	34	50	191	6	50	1	2	34	4	19
Mar-09	-19	0	7	13	75	62	13	34	41	68	0	41	1	2	34	4	2
Apr-09	-5	0	5	0	0	0	0	29	5	24	0	5	1	1	29	4	-28
May-09	42	50	8	0	0	0	0	26	4	22	0	4	1	1	26	4	-26
Jun-09	1	6	5	0	0	0	0	24	3	21	0	3	1	1	24	4	-25
Jul-09	24	30	5	0	0	0	0	23	2	20	0	2	1	1	23	4	-24
Aug-09	65	73	8	0	0	0	0	22	2	20	0	2	1	1	22	4	-24

	Balance de Hielo y Nieve					Balance de Agua Superficial					Balance de Agua Subterranea						
	Almacenaje	Afluente	Efluente			Afluente			Efluente		Afluente			Efluente			Almacenaje
	Accumulación / Pérdida de Nieve y Hielo (mm)	Precipitación (mm)	Sublimación/ Evaporación (mm)	Deshielo (mm)	Deshielo (l/s)	Deshielo de Glaciar (l/s)	Deshielo de Nieve (l/s)	Flujo Basal (l/s)	Recarga de Agua Subterránea (l/s)	Efluente de Agua Superficial (l/s)	Recarga Directa de Deshielo de Nieve (l/s)	Recarga desde Agua Superficial (l/s)	Afluente de Agua Subterránea (l/s)	ET de Agua Subterránea (l/s)	Flujo Basal (l/s)	Efluente de Agua Sub-terránea (l/s)	Cambio de Almacenaje de Agua Subterránea (l/s)
Sep-88	-12	2	14	0	**1**	0	1	21	2	20	0	2	1	1	21	4	-24
Oct-88	-19	0	18	3	**20**	0	20	21	15	27	0	15	1	1	21	4	-11
Nov-88	-20	7	18	10	**58**	17	25	21	36	26	17	36	1	2	21	4	28
Dec-88	-32	7	20	19	**112**	47	45	25	57	60	20	57	1	2	25	4	47
Jan-89	-54	0	15	39	**227**	141	66	31	58	160	20	58	1	2	31	4	42
Feb-89	-37	0	10	27	**161**	139	20	33	49	143	2	49	1	1	33	4	14
Mar-89	-18	0	7	11	**64**	62	3	33	42	56	0	42	1	2	33	4	4
Apr-89	2	11	9	0	**0**	0	0	28	5	24	0	5	1	1	28	4	-28
May-89	-3	3	6	0	**0**	0	0	25	3	22	0	3	1	1	25	4	-26
Jun-89	1	6	5	0	**0**	0	0	23	2	21	0	2	1	1	23	4	-25
Jul-89	27	33	5	0	**0**	0	0	22	2	20	0	2	1	1	22	4	-24
Aug-89	4	11	7	0	**0**	0	0	21	2	20	0	2	1	1	21	4	-24
Sep-89	87	97	11	0	**0**	0	0	21	1	19	0	1	1	1	21	4	-23
Oct-89	-14	5	18	3	**20**	0	20	21	15	26	0	15	1	1	21	4	-11
Nov-89	-27	0	17	10	**59**	17	28	20	37	36	17	37	1	2	20	4	29
Dec-89	-30	8	19	18	**107**	47	41	20	57	55	20	57	1	2	20	4	48
Jan-90	-53	0	15	37	**220**	141	59	30	59	171	20	59	1	2	30	4	43
Feb-90	-37	0	10	27	**158**	139	17	32	50	139	1	50	1	1	32	4	14
Mar-90	-18	0	7	11	**64**	62	2	33	42	54	0	42	1	2	33	4	4
Apr-90	-3	3	6	0	**0**	0	0	28	4	23	0	4	1	1	28	4	-28
May-90	11	19	8	0	**0**	0	0	25	3	21	0	3	1	1	25	4	-26
Jun-90	72	77	5	0	**0**	0	0	23	2	21	0	2	1	1	23	4	-24
Jul-90	24	30	6	0	**0**	0	0	22	2	20	0	2	1	1	22	4	-24
Aug-90	0	8	9	0	**0**	0	0	21	2	20	0	2	1	1	21	4	-24
Sep-90	2	14	12	0	**0**	0	0	20	1	19	0	1	1	1	20	4	-23
Oct-90	-18	0	15	3	**18**	0	18	21	14	25	0	14	1	1	21	4	-11
Nov-90	-25	0	16	9	**52**	17	20	20	32	25	15	32	1	2	20	4	23
Dec-90	-33	0	18	15	**87**	47	23	24	54	40	17	54	1	2	24	4	42
Jan-91	-39	9	14	34	**198**	141	38	28	55	152	20	55	1	2	28	4	41
Feb-91	-37	0	10	27	**161**	139	18	31	50	138	3	50	1	1	31	4	18
Mar-91	-6	16	12	11	**64**	62	2	32	43	53	0	43	1	2	32	4	6
Apr-91	19	30	10	0	**1**	0	1	27	5	23	0	5	1	1	27	4	-27
May-91	33	41	8	0	**0**	0	0	24	3	21	0	3	1	1	24	4	-25
Jun-91	134	140	5	0	**0**	0	0	22	2	20	0	2	1	1	22	4	-24
Jul-91	11	19	8	0	**0**	0	0	22	2	20	0	2	1	1	22	4	-24
Aug-91	-8	3	11	0	**0**	0	0	21	2	19	0	2	1	1	21	4	-23
Sep-91	-16	0	16	0	**1**	0	1	20	1	20	0	1	1	1	20	4	-23
Oct-91	-20	3	18	5	**28**	0	28	20	16	32	0	16	1	1	20	4	-9
Nov-91	-19	14	20	13	**77**	17	41	20	49	28	20	49	1	2	20	4	44
Dec-91	-47	0	22	25	**148**	47	81	27	66	89	20	66	1	2	27	4	54
Jan-92	-84	0	20	44	**257**	141	97	31	61	207	20	61	1	2	31	4	45
Feb-92	-39	0	10	29	**172**	139	25	33	49	149	8	49	1	1	33	4	19
Mar-92	-18	0	7	11	**65**	62	3	33	42	57	0	42	1	2	33	4	3
Apr-92	2	10	9	0	**0**	0	0	28	4	24	0	4	1	1	28	4	-28
May-92	51	59	8	0	**0**	0	0	25	3	22	0	3	1	1	25	4	-26
Jun-92	-3	2	5	0	**0**	0	0	23	2	21	0	2	1	1	23	4	-25
Jul-92	0	5	5	0	**0**	0	0	22	2	20	0	2	1	1	22	4	-24
Aug-92	8	15	7	0	**0**	0	0	21	2	20	0	2	1	1	21	4	-24
Sep-92	-11	0	11	0	**0**	0	0	21	1	20	0	1	1	1	21	4	-24
Oct-92	-13	0	12	1	**8**	0	8	20	6	21	0	6	1	1	20	4	-18
Nov-92	-15	0	10	5	**31**	17	7	20	22	21	8	22	1	2	20	4	5
Dec-92	-23	0	12	11	**67**	47	13	23	54	28	8	54	1	1	23	4	34
Jan-93	-39	0	12	27	**159**	141	18	27	55	132	0	55	1	2	27	4	22
Feb-93	-32	0	8	24	**140**	139	0	30	51	118	0	51	1	1	30	4	17
Mar-93	-7	15	11	10	**62**	62	0	31	44	48	0	44	1	2	31	4	8
Apr-93	-5	2	7	0	**1**	0	1	26	4	23	0	4	1	1	26	4	-27
May-93	-4	0	5	0	**0**	0	0	23	2	21	0	2	1	1	23	4	-25
Jun-93	5	10	5	0	**0**	0	0	22	2	20	0	2	1	1	22	4	-24
Jul-93	67	73	5	0	**0**	0	0	21	1	20	0	1	1	1	21	4	-24
Aug-93	12	19	8	0	**0**	0	0	20	1	19	0	1	1	1	20	4	-23
Sep-93	-11	1	11	0	**0**	0	0	19	1	19	0	1	1	1	19	4	-23
Oct-93	-15	0	13	2	**12**	0	12	19	10	22	0	10	1	1	19	4	-14
Nov-93	-22	0	15	7	**39**	17	12	19	25	22	11	25	1	1	19	4	12
Dec-93	-25	0	12	13	**74**	47	16	22	56	30	12	56	1	1	22	4	40
Jan-94	-40	4	14	30	**178**	141	25	26	57	135	12	57	1	2	26	4	38
Feb-94	-33	0	8	25	**149**	139	9	29	53	124	0	53	1	1	29	4	20
Mar-94	-16	1	6	10	**62**	62	0	30	45	46	0	45	1	2	30	4	10
Apr-94	0	9	8	0	**0**	0	0	25	3	22	0	3	1	1	25	4	-27
May-94	-3	2	6	0	**0**	0	0	22	2	21	0	2	1	1	22	4	-25
Jun-94	-3	0	3	0	**0**	0	0	21	1	20	0	1	1	1	21	4	-24
Jul-94	4	8	5	0	**0**	0	0	20	1	19	0	1	1	1	20	4	-24
Aug-94	-5	0	5	0	**0**	0	0	20	1	19	0	1	1	1	20	4	-23
Sep-94	32	43	11	0	**0**	0	0	19	0	19	0	0	1	1	19	4	-23
Oct-94	-6	8	13	1	**5**	0	5	18	4	19	0	4	1	1	18	4	-16
Nov-94	-16	0	12	4	**26**	17	5	18	20	20	5	20	1	1	18	4	2
Dec-94	-6	20	16	10	**58**	47	8	19	53	21	5	53	1	1	19	4	33
Jan-95	-42	0	13	29	**171**	141	21	24	58	128	9	58	1	2	24	4	38
Feb-95	-32	0	8	24	**141**	139	1	28	55	113	0	55	1	1	28	4	23
Mar-95	-15	1	6	10	**62**	62	0	29	47	45	0	47	1	2	29	4	13
Apr-95	-2	6	8	0	**0**	0	0	24	2	22	0	2	1	1	24	4	-27
May-95	-3	0	3	0	**0**	0	0	22	1	20	0	1	1	1	22	4	-25
Jun-95	5	10	5	0	**0**	0	0	21	1	20	0	1	1	1	21	4	-24
Jul-95	3	8	5	0	**0**	0	0	20	1	19	0	1	1	1	20	4	-23
Aug-95	27	35	7	0	**0**	0	0	19	0	19	0	0	1	1	19	4	-23
Sep-95	-11	0	11	0	**0**	0	0	19	0	18	0	0	1	1	19	4	-23
Oct-95	-10	0	9	1	**4**	0	4	18	3	19	0	3	1	1	18	4	-19
Nov-95	-14	0	10	4	**24**	17	3	18	19	19	4	19	1	1	18	4	0
Dec-95	-20	0	12	9	**50**	47	4	18	51	18	0	51	1	1	18	4	28
Jan-96	-34	0	10	24	**141**	141	0	23	58	105	0	58	1	1	23	4	30
Feb-96	-30	0	6	24	**139**	139	0	26	56	110	0	56	1	1	26	4	25
Mar-96	-12	8	10	10	**62**	62	0	28	50	40	0	50	1	2	28	4	16
Apr-96	-4	1	5	0	**0**	0	0	23	1	22	0	1	1	1	23	4	-26
May-96	7	15	8	0	**0**	0	0	21	1	20	0	1	1	1	21	4	-24
Jun-96	259	265	5	0	**0**	0	0	20	0	19	0	0	1	1	20	4	-24
Jul-96	41	50	9	0	**0**	0	0	19	0	19	0	0	1	0	19	4	-23
Aug-96	148	161	14	0	**0**	0	0	19	0	19	0	0	1	1	19	4	-23
Sep-96	19	48	28	0	**2**	0	2	18	0	20	0	0	1	1	18	4	-22
Oct-96	-38	11	34	12	**73**	0	73	19	27	65	0	27	1	1	19	4	4
Nov-96	-66	0	36	30	**178**	17	142	24	69	113	20	69	1	1	24	4	61

	Balance de Hielo y Nieve					Balance de Agua Superficial					Balance de Agua Subterranea						
	Almacenaje	Afluente	Efluente			Afluente			Efluente		Afluente			Efluente			Almacenaje
	Accumulación Pérdida de Nieve y Hielo (mm)	Precipitación (mm)	Sublimación/ Evaporación (mm)	Deshielo (mm)	Deshielo (l/s)	Deshielo de Glaciar (l/s)	Deshielo de Nieve (l/s)	Flujo Basal (l/s)	Recarga de Agua Subterránea (l/s)	Efluente de Agua Superficial (l/s)	Recarga Directa de Deshielo de Nieve (l/s)	Recarga desde Agua Superficial (l/s)	Afluente de Agua Subterránea (l/s)	ET de Agua Subterránea (l/s)	Flujo Basal (l/s)	Efluente del Agua Sub-terránea (l/s)	Cambio de Almacenaje de Agua Subterránea (l/s)
Dec-97	-85	0	35	55	296	47	230	29	69	296	20	69	1	1	29	4	56
Jan-98	-95	0	27	68	400	141	240	31	66	345	20	66	1	2	31	4	50
Feb-98	-84	0	17	47	276	139	116	33	61	228	20	61	1	1	33	4	43
Mar-98	-19	6	11	14	82	62	21	33	47	68	0	47	1	2	33	4	10
Apr-98	-1	8	8	0	0	0	0	26	3	25	0	3	1	1	28	4	-28
May-98	5	13	8	0	0	0	0	25	2	23	0	2	1	1	25	4	-26
Jun-98	42	47	5	0	0	0	0	25	1	21	0	1	1	1	23	4	-25
Jul-98	14	20	6	0	0	0	0	21	1	20	0	1	1	1	21	4	-24
Aug-98	-8	0	8	0	0	0	0	21	1	20	0	1	1	1	21	4	-24
Sep-98	-12	0	12	0	0	0	0	20	0	20	0	0	1	1	20	4	-24
Oct-98	-14	0	13	1	7	0	7	19	5	21	0	5	1	1	19	4	-18
Nov-98	-16	0	11	6	33	17	9	19	23	21	8	23	1	1	19	4	7
Dec-98	-25	0	12	12	72	47	18	23	56	31	8	56	1	1	23	4	36
Jan-99	-41	0	12	29	171	141	30	27	58	139	0	58	1	2	27	4	28
Feb-99	-33	0	8	25	150	139	11	29	55	124	0	55	1	1	29	4	21
Mar-99	-15	4	9	11	62	62	1	30	46	46	0	46	1	2	30	4	11
Apr-99	-1	7	8	0	0	0	0	25	2	23	0	2	1	1	25	4	-27
May-99	7	15	8	0	0	0	0	22	1	21	0	1	1	1	22	4	-25
Jun-99	12	17	5	0	0	0	0	21	1	20	0	1	1	1	21	4	-24
Jul-99	-5	1	5	0	0	0	0	20	1	20	0	1	1	1	20	4	-24
Aug-99	-5	0	5	0	0	0	0	20	0	19	0	0	1	1	20	4	-23
Sep-99	26	38	11	0	0	0	0	19	0	19	0	0	1	1	19	4	-23
Oct-99	13	27	13	1	6	0	6	18	5	20	0	5	1	1	18	4	-18
Nov-99	-20	0	14	6	35	17	8	18	21	22	10	21	1	1	18	4	8
Dec-99	-24	0	12	12	72	47	15	21	57	26	10	57	1	1	21	4	41
Jan-00	-39	4	13	30	174	141	23	25	58	130	10	58	1	1	25	4	38
Feb-00	-32	1	8	25	148	139	8	28	56	119	0	56	1	1	28	4	24
Mar-00	-16	0	6	10	62	62	0	29	48	43	0	48	1	2	29	4	14
Apr-00	5	13	10	0	0	0	0	24	2	22	0	2	1	1	24	4	-27
May-00	14	22	8	0	0	0	0	22	1	20	0	1	1	1	22	4	-25
Jun-00	73	79	6	0	0	0	0	20	1	20	0	1	1	1	20	4	-24
Jul-00	55	61	6	0	0	0	0	20	0	19	0	0	1	1	20	4	-23
Aug-00	-10	0	10	0	0	0	0	19	0	19	0	0	1	1	19	4	-23
Sep-00	2	15	13	0	1	0	1	19	0	19	0	0	1	1	19	4	-23
Oct-00	-20	0	16	4	23	0	23	19	14	28	0	14	1	1	19	4	-9
Nov-00	-29	0	18	11	63	17	27	19	37	26	19	37	1	1	19	4	33
Dec-00	-39	0	20	19	113	47	46	22	63	52	20	63	1	1	22	4	56
Jan-01	-51	0	15	36	215	141	54	27	64	158	20	64	1	2	27	4	52
Feb-01	-32	7	11	27	162	139	18	29	55	132	5	55	1	1	29	4	25
Mar-01	-8	15	11	11	65	62	4	30	47	49	0	47	1	2	30	4	11
Apr-01	10	20	10	0	1	0	1	25	3	23	0	3	1	1	25	4	-27
May-01	12	20	8	0	0	0	0	23	2	21	0	2	1	1	23	4	-25
Jun-01	5	11	5	0	0	0	0	21	1	20	0	1	1	1	21	4	-24
Jul-01	54	60	5	0	0	0	0	20	1	20	0	1	1	1	20	4	-24
Aug-01	59	68	8	0	0	0	0	20	1	19	0	1	1	1	20	4	-23
Sep-01	-2	12	14	0	1	0	1	19	0	19	0	0	1	1	19	4	-23
Oct-01	-11	10	17	4	24	0	24	20	14	29	0	14	1	1	20	4	-10
Nov-01	-31	0	19	12	69	17	33	19	41	27	20	41	1	1	19	4	38
Dec-01	-35	7	21	21	123	47	57	23	65	61	20	65	1	1	23	4	57
Jan-02	-58	0	17	40	237	141	77	29	62	184	20	62	1	2	29	4	48
Feb-02	-38	0	10	28	167	139	23	31	53	140	5	53	1	1	31	4	23
Mar-02	-18	0	7	11	65	62	3	31	44	52	0	44	1	2	31	4	8
Apr-02	-1	7	8	0	0	0	0	26	3	23	0	3	1	1	26	4	-28
May-02	178	186	8	0	0	0	0	24	2	21	0	2	1	1	24	4	-26
Jun-02	57	64	7	0	0	0	0	22	2	20	0	2	1	1	22	4	-24
Jul-02	268	277	9	0	0	0	0	21	1	20	0	1	1	1	21	4	-24
Aug-02	41	62	21	0	0	0	0	20	1	19	0	1	1	1	20	4	-24
Sep-02	-1	31	31	0	2	0	2	20	1	21	0	1	1	1	20	4	-23
Oct-02	-51	0	37	14	83	0	83	20	30	73	0	30	1	1	20	4	6
Nov-02	-72	0	39	33	194	17	157	28	66	134	20	66	1	1	28	4	55
Dec-02	-91	2	39	54	319	47	252	31	67	263	20	67	1	2	31	4	51
Jan-03	-101	0	30	72	422	141	262	33	60	376	20	60	1	2	33	4	42
Feb-03	-84	3	18	49	286	139	127	35	55	246	20	55	1	2	35	4	38
Mar-03	-28	0	12	16	93	62	32	35	46	82	0	46	1	2	35	4	6
Apr-03	-5	1	6	0	0	0	0	30	4	25	0	4	1	1	30	4	-29
May-03	47	55	8	0	0	0	0	26	3	23	0	3	1	1	26	4	-27
Jun-03	9	15	6	0	0	0	0	24	2	22	0	2	1	1	24	4	-26
Jul-03	47	53	6	0	0	0	0	23	2	21	0	2	1	1	23	4	-25
Aug-03	5	14	9	0	0	0	0	22	2	20	0	2	1	1	22	4	-24
Sep-03	-14	0	14	0	0	0	0	21	1	20	0	1	1	1	21	4	-24
Oct-03	-18	0	16	3	16	0	16	21	13	24	0	13	1	1	21	4	-12
Nov-03	-26	0	17	9	51	17	21	21	34	25	14	34	1	2	21	4	22
Dec-03	-33	0	17	15	91	47	29	25	54	47	15	54	1	2	25	4	40
Jan-04	-48	0	13	35	208	141	50	29	56	164	18	56	1	2	29	4	40
Feb-04	-33	3	10	27	157	139	18	31	50	138	0	50	1	1	31	4	14
Mar-04	-15	4	9	11	65	62	3	32	43	54	0	43	1	2	32	4	5
Apr-04	-5	0	5	0	0	0	0	27	4	23	0	4	1	1	27	4	-28
promedio (l/seg)					65	34	27	24	24	61	4	24	1	1	24	4	-1
promedio (mm/año)	-24	263	155	132		69	55	49	48	125	9	48	2	2	49	8	-1

7 APPLICACIONES DEL MODELO

Se aplicó el modelo para los siguientes fines:

- Apoyar al dseño del sistema de manejo de aguas (Golder, noviembre de 2005c) asociado con el depósito de estériles: Estimación de volúmenes para las estructuras de almacenaje aguas abajo del botadero y de la capacidad de la planta de tratamiento de aguas ácidas. Estimación del nivel futuro de la napa subterránea ubicada por debajo del depósito.
- Estimación de cambios a los caudales de aguas superficiales, aguas abajo del Proyecto. También se entregó los caudales simulados a un modelo de dilución (Barrick, 2005) para evaluar la calidad de agua.
- Estimación de cambios al nivel de la napa subterránea, aguas abajo del proyecto, para estimar el impacto al sistema de humedales.
- Estimación de caudales generados dentro del rajo abierto, y estimación del balance de aguas del rajo en la época de cierre.

Para hacer los analices de las condiciones del futuro, fue necesario modificar el modelo para representar los siguientes:

- Canales perimetrales: Se cambió la representación de los cursos superficiales para incluir los canales perimetrales, al norte y al sur del botadero.
- Botadero: Se cambió la simulación del area del botadero, para representar la presencia y las características del depósito de estériles.
- Rajo: Cambió la simulación del area del rajo, para representar la cuenca nueva.
- Sistema de Manejo de Aguas: Cambió la representación del sistema, para simular la captura de aguas superficiales y subterráneas cerca al pie del botadero.

7.1 Sistema de Manejo de Aguas

En la Figura 7.1 se presenta el sistema de manejo de aguas de operaciones. En la Figura se muestra los límites del botadero y las ubicaciones de los puntos de captura de aguas superficiales y subterráneas, para las distintas etapas del Proyecto. En la Figura 7.2 se presenta el sistema de manejo de aguas de la época de post-cierre.

Se evaluó las condiciones de operación y cierre empleando una serie estadísticamente representativa de 100 años de precipitación mensual en la estación El Indio.

- Se representó el botadero con los caudales de escurrimiento y infiltración del balance de aguas del botadero (WMC, 2005).
- Se representó el manejo de aguas del rajo asumiendo almacenaje suficiente para utilizar todo el escurrimiento del rajo como agua industrial. Los resultados del modelo fueron utilizados para determinar el volumen de almacenaje requerido (Golder, noviembre de 2005c).

Se hizo una serie de simulaciones para representar cada año del Proyecto. Se asumió la captación de 10 l/s de agua subterránea. La distribución estadística de los simulados caudales que aportan al sistema del manejo de aguas del botadero se presenta en la Figura 1.3. Los resultados fueron utilizados en el diseño del sistema de manejo de aguas (Golder, noviembre de 2005c).

Figura 7.1. Sistema de Manejo de Agua, Operaciones

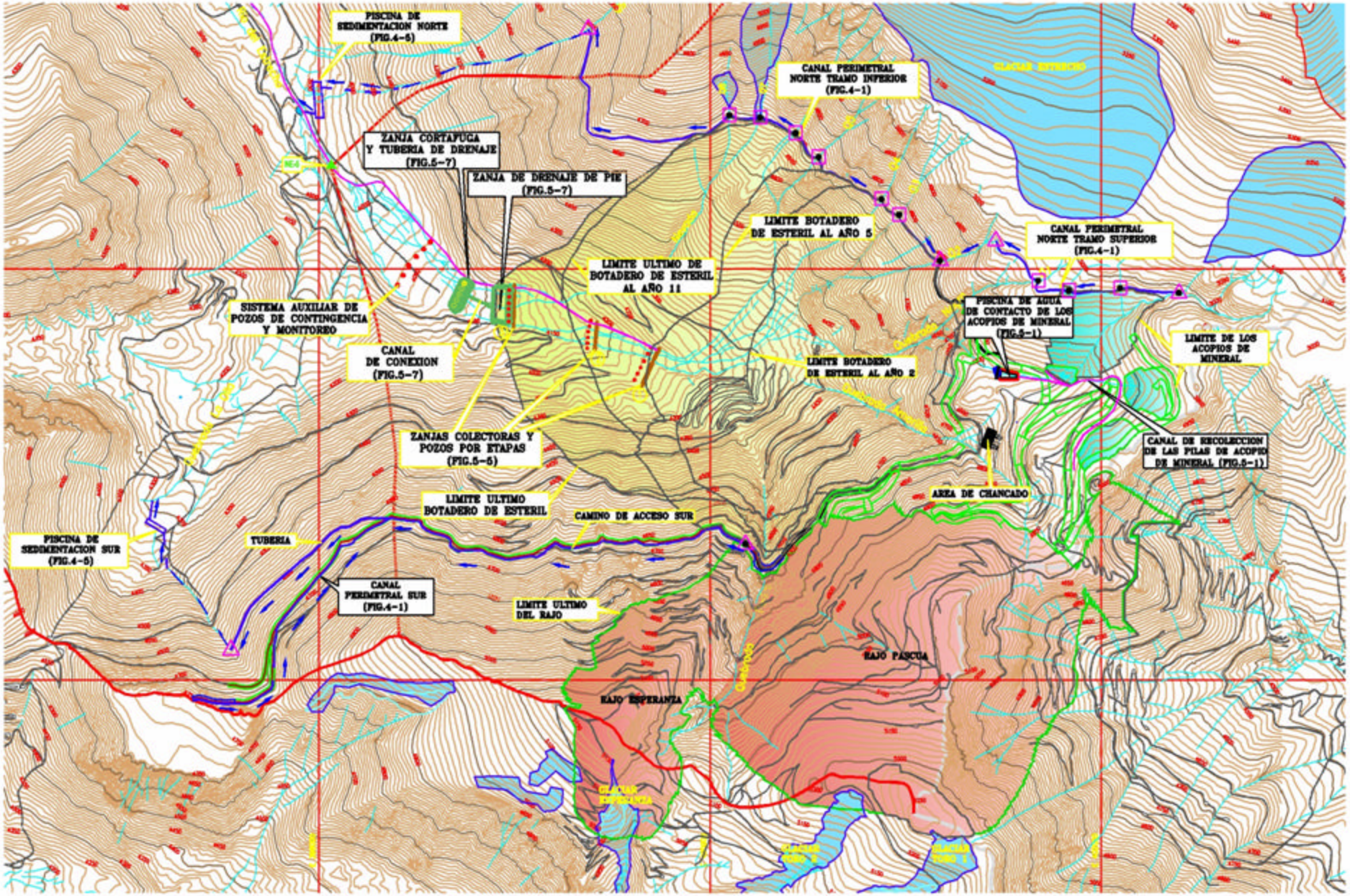


Figura 7.2. Sistema de Manejo de Agua, Cierre

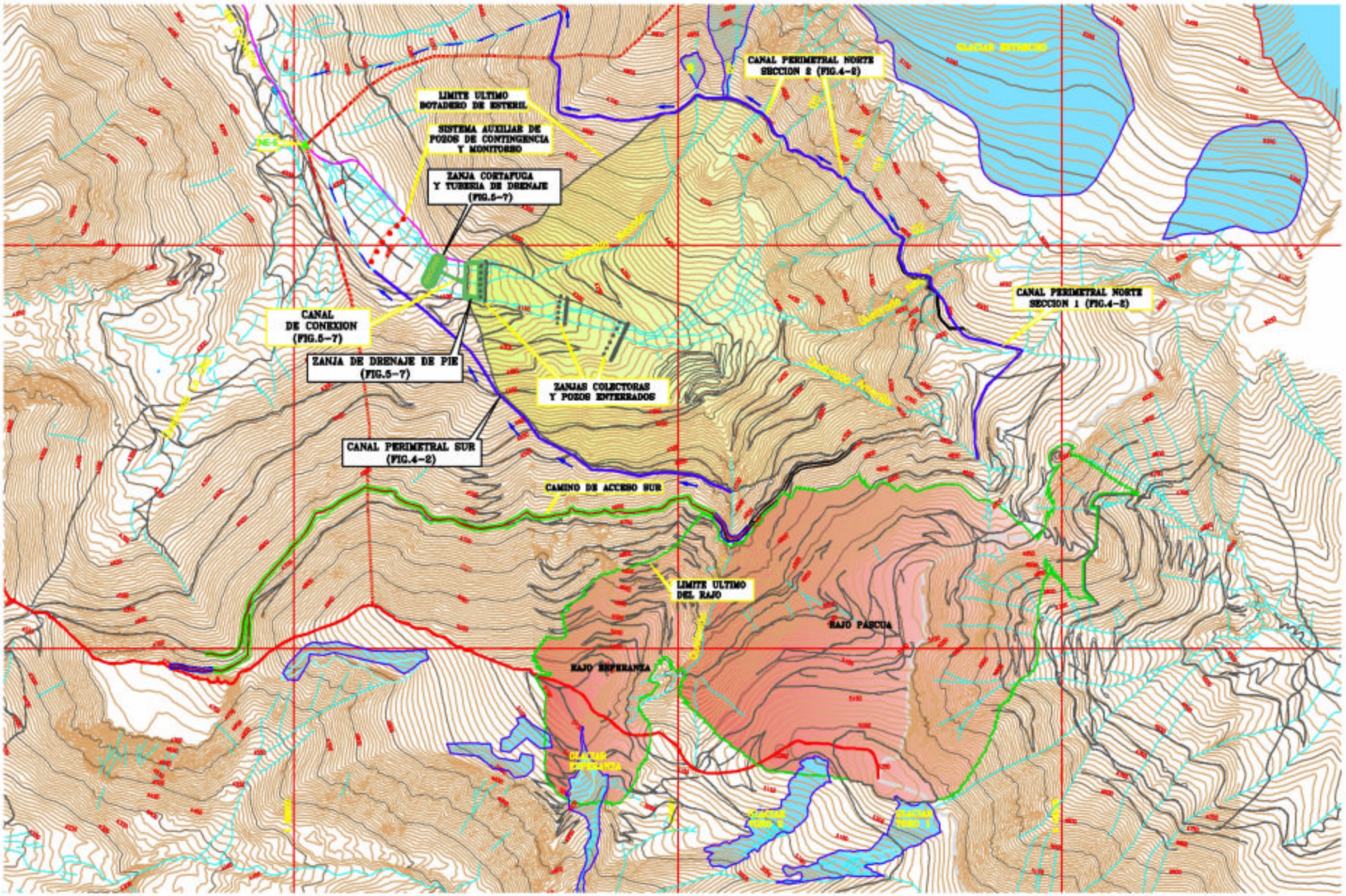
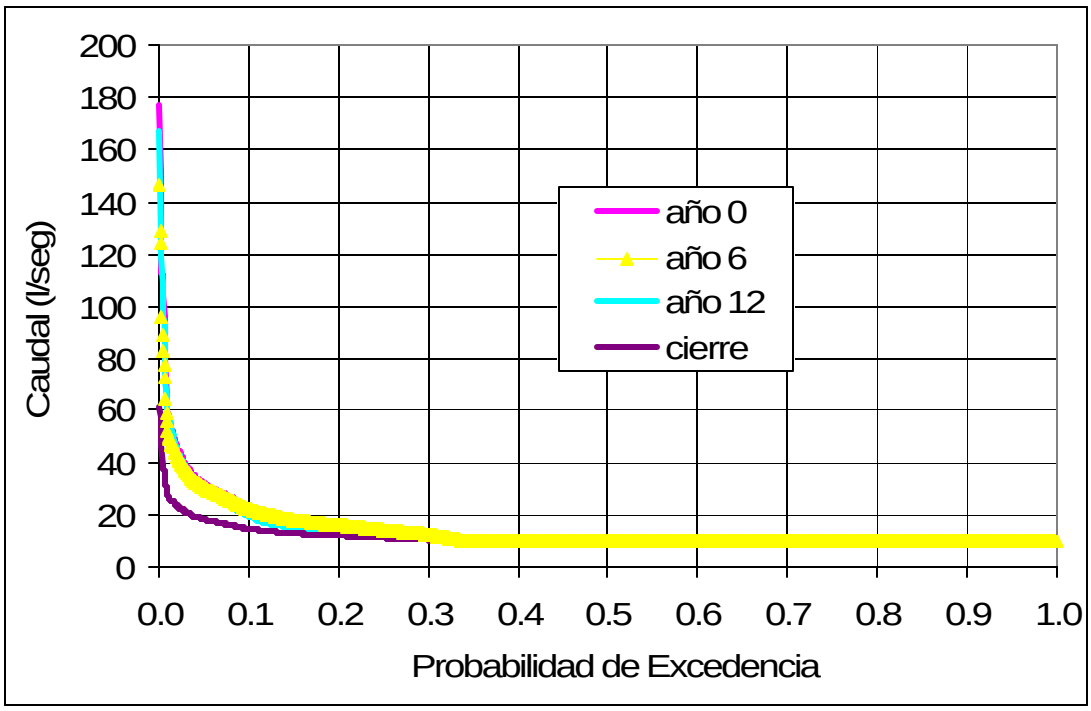


Figura 7.3. Caudales Afluente al Sistema de Manejo de Aguas



Con el modelo se calculó la distribución de caudales afluente al sistema de manejo de aguas del botadero. Con los resultados se estimó (Golder, noviembre de 2005c) que una laguna de 400.000 m^3 cumplirá con los criterios de diseño del sistema.

Se estima (Golder, noviembre de 2005c) que otra laguna de 400.000 m^3 dentro el rajo podrá almacenar el escurrimiento del rajo por uso industrial.

Se calcula que el nivel de la napa subterránea bajo al botadero bajará unos 30m en los 20 anos del Proyecto, debido a la desviación de los deshielos de glaciar. Se concluye que el agua subterránea no va a saturar ni desestabilizar la base del botadero.

7.2 Cambios de Caudal

Están previstos distintos impactos a los caudales de agua:

1. La desviación de agua por los canales perimetrales, que llevarían los deshielos del glaciar Estrecho fuera de la cuenca superior, reduciría la recarga al acuífero de la cuenca superior. Resultaría un aumento del caudal de verano, por los deshielos del glaciar que no infiltrarían al sistema subterráneo, junto con una reducción del caudal de invierno, por la pérdida de flujo basal del mismo sistema subterráneo.

2. La pérdida del agua que aporta el sector del rajo. Resultaría una disminución de los caudales del período de deshielo. Está planificado el consumo del agua del rajo por uso industrial.

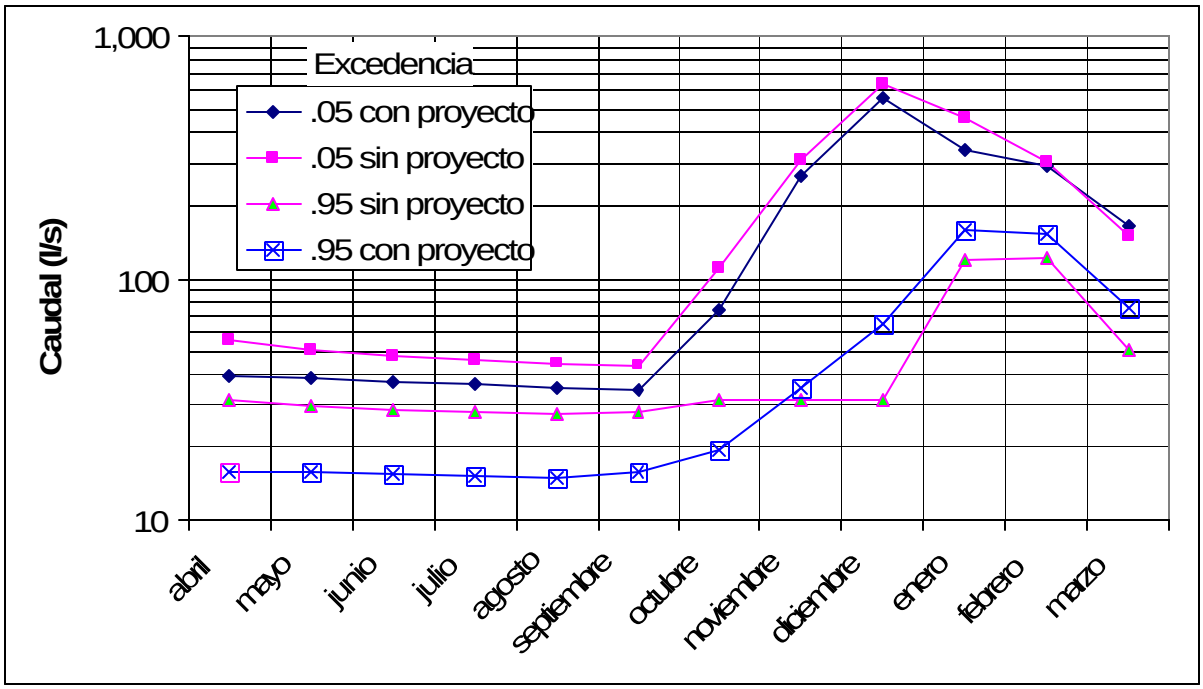
3. La reducción del agua que aporta el sector del botadero, debido a la potencia de los estériles no saturados, resultaría en una disminución de los caudales del período de deshielo.

4. El sistema de manejo de aguas de contacto regularía los caudales de la cuenca superior. Los caudales del período de deshielo serían almacenados y descargados en la forma de un flujo regulado. Sería consumos de agua por evaporación de las piscinas y por el proceso de tratamiento. Resultaría una disminución de los caudales altos y un aumento de los caudales bajos.

Se presentan las distribuciones de caudales simulados, sin y con Proyecto, en las Figuras 7.4 (Los caudales "con Proyecto" representan condiciones de cierre). Los caudales simulados incluyen el consumo, por agua industrial, de todas las aguas generadas dentro del rajo. También incluyen la captura de agua superficial y subterránea por el sistema de manejo de aguas, evaporación de las piscinas y el caudal efluente de la planta de tratamiento.

En la Figura 7.4b se presenta el caudal simulado en el punto NE-3, ubicado entre NE-2a y NE-4, aguas abajo de la confluencia del Río del Estrecho con Quebrada Barriales. En éste punto se ha determinado un caudal ecológico de 32 l/s (DGA, 2005). Nota que el caudal mínimo, simulado con Proyecto, es de 60 l/s.

Figura 7.4a. Cambios de Caudal, NE-2a

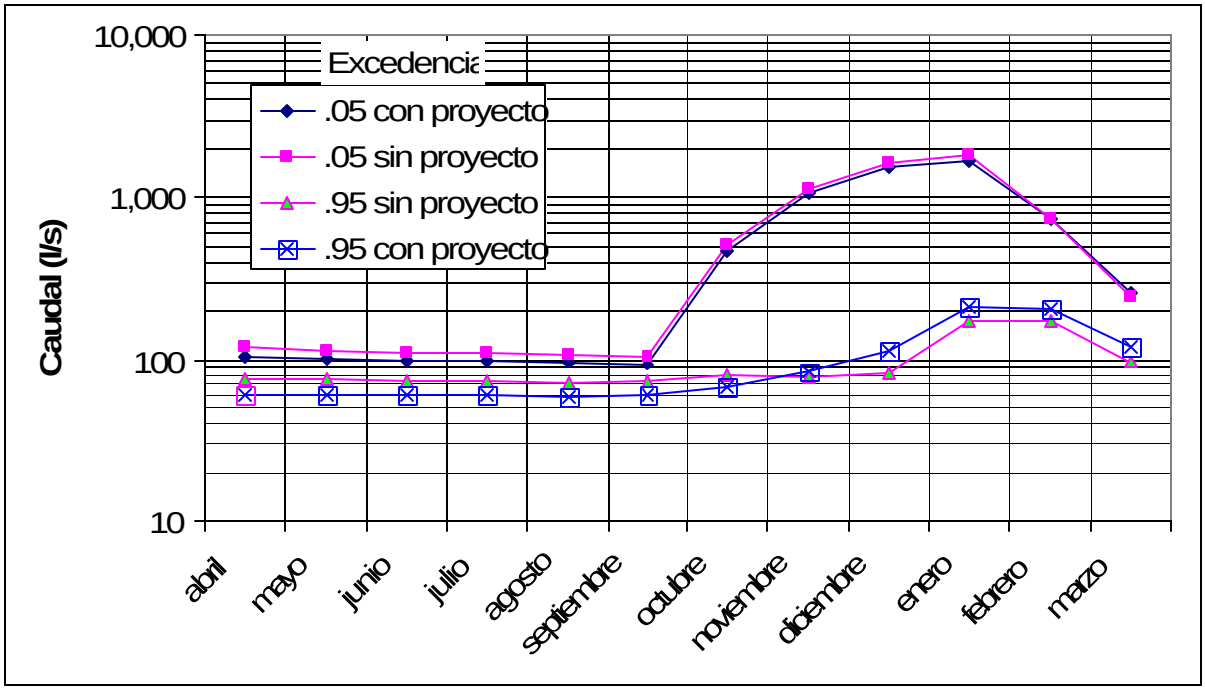


La resultada principal del Proyecto es una disminución de 10-15 l/s del caudal de estiaje, que corresponda a la desviación del agua del glaciar, que aporta al flujo basal del sistema subterránea. El agua desviada aparece en un aumento de 10-30 l/s de los caudales altos de los años secos.

Un resultado secundario incluye una disminución de 50-400 de los caudales altos de los años húmedos. Esta corresponda al manejo de los caudales máximos que aportan los sectores del botadero y del rajo.

El cambio neto del volumen total es una disminución promedia de 128.000 m^3/año, que corresponde a un caudal de 4 l/s.

Figura 7.4b. Cambios de Caudal, NE-3



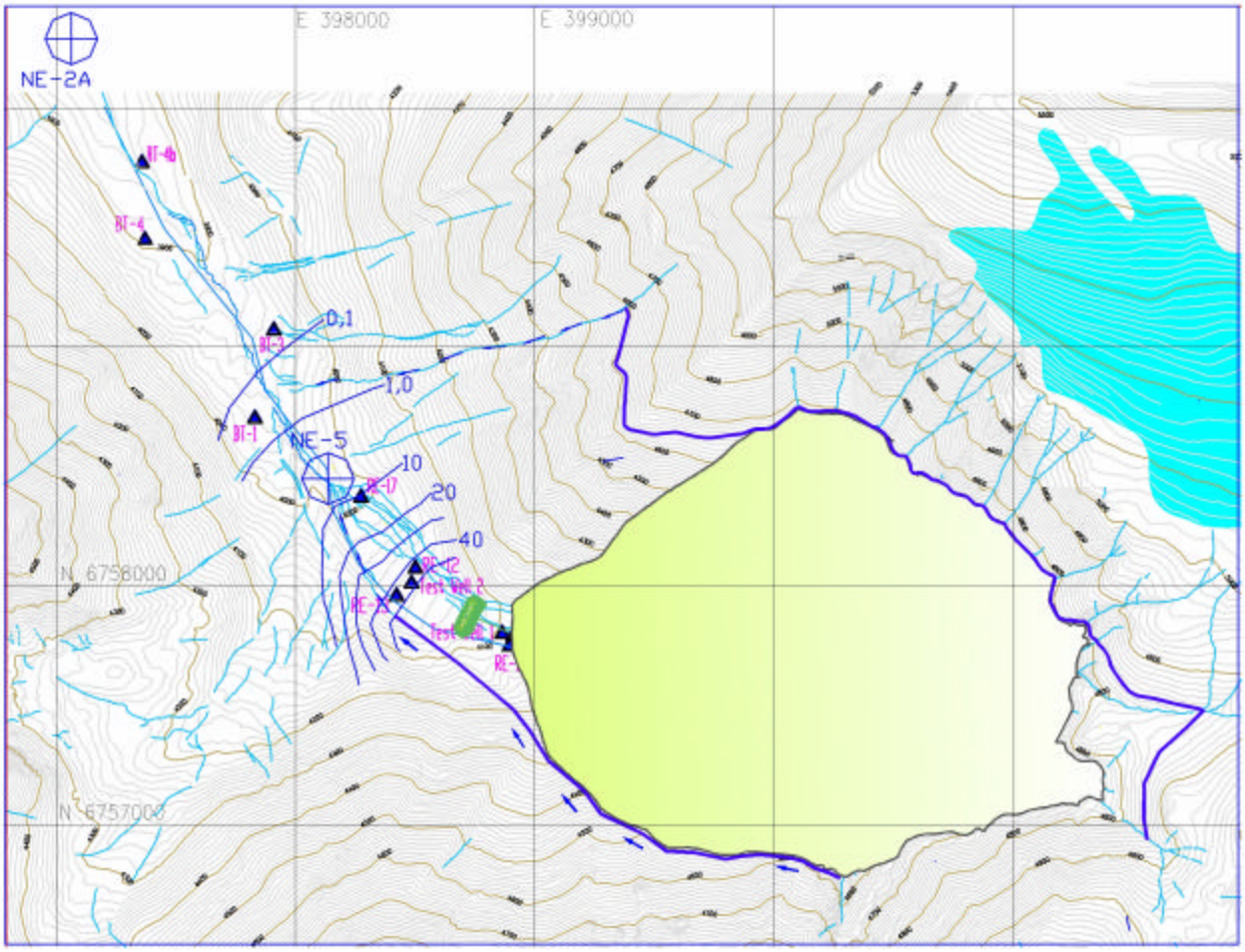
Los caudales simulados no incluyen la regulación de caudal por ningún embalse, aparte de las piscinas de tratamiento. Los caudales simulados no incluyen ni la toma adicional de agua del Río Estrecho, por uso industrial, ni el consumo de agua potable. No incluyen efluentes de la planta de tratamiento de aguas servidas.

Los resultados del modelo hidrológico fueron entregados en un modelo de dilución (Barrick, 2005), que se usó para calcular la calidad de agua en los tramos del Río Estrecho aguas abajo de la planta.

7.3 Cambios de Nivel de Agua Subterránea

Se presentan los cambios del nivel de agua subterránea, aguas abajo del botadero, en la Figura 7.5. Según la figura, cambios a los humedales, que están sustentados por agua subterránea, serán restringidos a la zona cerca de la estación hidrométrica NE-5. Unos 500 m aguas abajo de NE-5, la caída del nivel de agua subterránea será menor al 10 cm.

Figura 7.5. Cambios del Nivel Piezométrico



7.4 Balance de Aguas del Rajo

Se presenta la topografía del Rajo en la Figura 7.6, en que están identificadas las 4 sub-cuencas en que podrían formar cuerpos de agua. La altura de la cresta de la laguna principal, a que aportan las otras, es de 4556 m s.n.m. En la Tabla 7.1 están resumidas las características de las 4 sub-cuencas.

Figura 7.6. Representación del Rajo

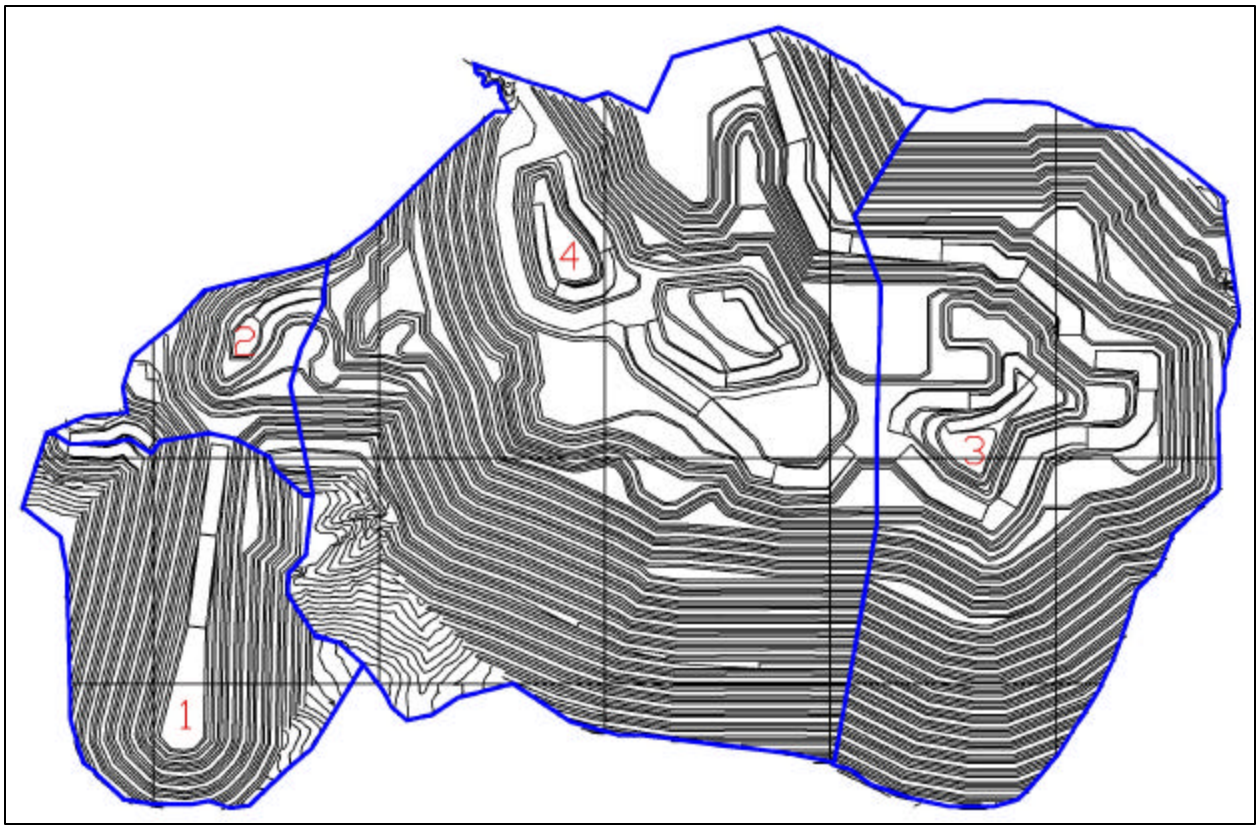


Tabla 7.1. Lagunas del Rajo

Laguna	fondo (m snm)	nivel máximo de agua (m snm)	área máximo (m^2)	volumen máximo (m^3)
1	4860	4892	5.7E+04	1.2E+06
2	4780	4796	1.0E+04	1.2E+05
3	4540	4588	7.6E+04	1.8E+06
4	4492	4556	2.7E+05	6.5E+06
total			4.1E+05	9.7E+06

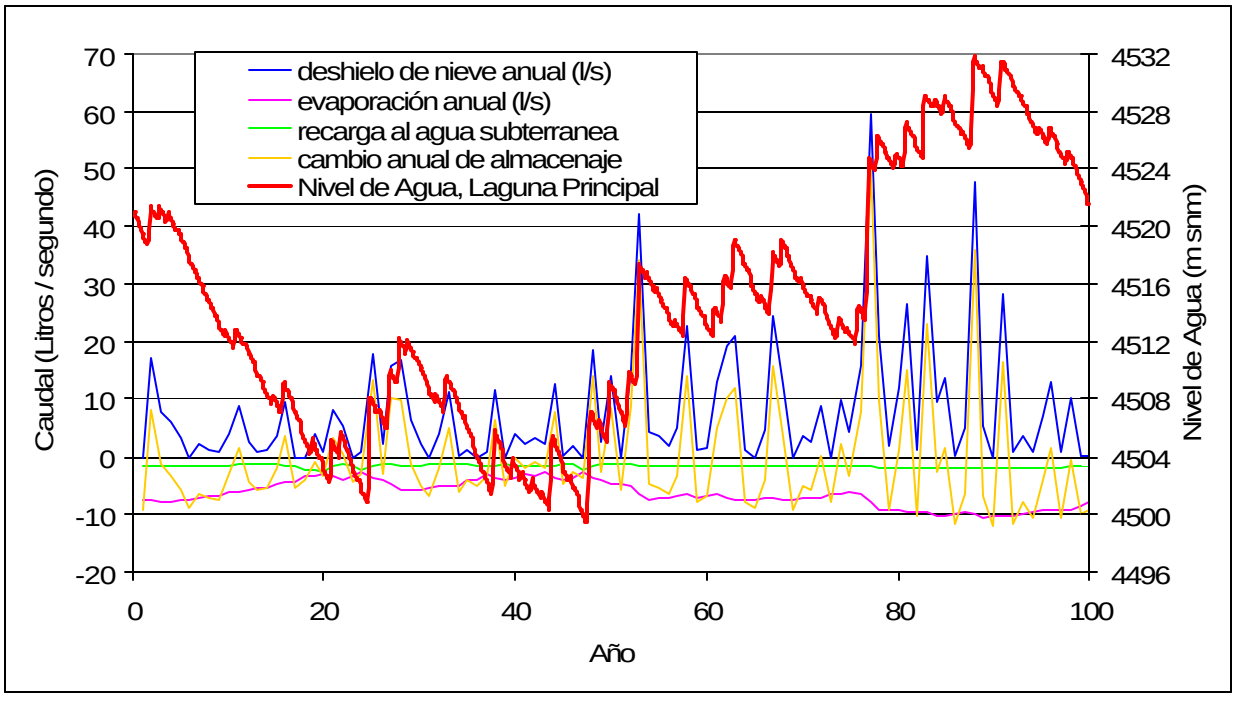
Asumiendo que los cambios topográficos cambiarán los patrones de acumulación de nieve, se modeló una precipitación promedia de 212 mm/año, igual a las 1,2 veces de la precipitación de la estación El Indio, con máximo en 100 años de 1200 mm/año. Este nivel representa un aumento de 50% sobre la precipitación simulada anteriormente para el área original, que fue orientada hacia el norte.

Se simuló el balance de nieve de la cuenca del rajo como fue descrito anteriormente en la sección 3.1. El deshielo simulado fue entregado como escurrimiento a los balances de agua de las 4 lagunas. Se simuló el nivel de agua, el área de superficie con la evaporación y el almacenaje de cada laguna, y el flujo de agua desde las 3 afluentes a la laguna principal.

Se proyecta que la laguna principal llegaría a una altura de 4500 m s.n.m. sobre un período de décadas, después variando, con los patrones de precipitación, entre los 4500 m y 4532 m, que está unos 24 m bajo de la cresta del rajo.

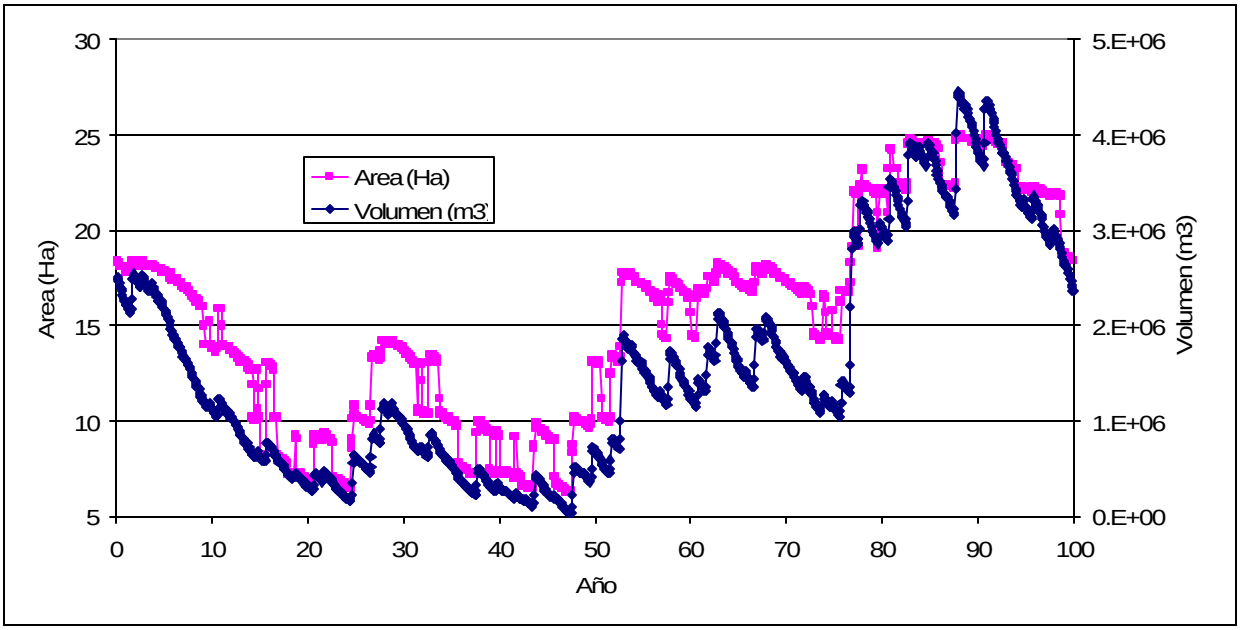
En la Figura 7.7 se presenta el balance de aguas simulado de las lagunas del rajo. El balance promedio anual consiste en 7,9 l/s de escurrimiento al rajo de deshielo de nieve, 1,5 l/s de infiltración al sistema de agua subterránea y 6,4 l/s de evaporación. Agua que infiltra al sistema subterráneo fluye aguas abajo hasta el sistema de captura de aguas del botadero.

Figura 7.7. Balance de Aguas de las Lagunas del Rajo



En la Figura 7.8 se presenta el área de superficie de agua y el volumen almacenado dentro de las lagunas. Se proyecta un área de laguna entre los 6 y 25 Ha, con volumen de agua entre los 100.000 y 4.600.000 m3.

Figura 7.8. Área y Volumen de Lagunas



8 SENSIBILIDAD DE LOS RESULTADOS

El modelo calibrado representa la presente mejor estimación del sistema. A continuación se presenta la sensibilidad de los resultados a la variación de los parámetros del modelo dentro de sus rangos razonables.

8.1 Sistema de Manejo de Aguas

El capítulo 7 describe el uso del modelo para simular el sistema hidrológico bajo condiciones con Proyecto. En la sección 7.1 se presenta 2 resultados principales:

1. Con los simulados caudales afluente al sistema de manejo de aguas del botadero (Figura 7.3) se estima (Golder, noviembre de 2005c) que una laguna de 400.000 m^3 cumplirá con los criterios de diseño del sistema.

2. Con los simulados caudales afluente al rajo se estima (Golder, noviembre de 2005c) que otra laguna de 400.000 m^3 dentro el rajo podrá almacenar el escurrimiento del rajo por uso industrial.

Hay un grado de incertidumbre en la distribución de caudales que aportará el botadero (WMC, 2005) y el rajo. Se presenta las distribuciones simuladas en la Figura 8.1. Se calculó los volúmenes almacenados asumiendo una evaporación activa de 9 l/s y una capacidad de la planta de tratamiento de 19 l/s (Golder, noviembre de 2005c). Con estas condiciones se calcula que el sistema del botadero llegará a su capacidad, con descarga de agua no tratada, 3 veces en 100 años.

Se evalúa el almacenamiento total de 800.000 m^3, considerando caudales mayores. Se estima un máximo de caudales con una simulación del sistema natural, más los canales de desviación, sin considerar la reducción de caudales aportados por el sector del botadero (WMC, 2005). Se presenta la distribución de caudales no-desviados en la Figura 8.1. Se calculó los volúmenes almacenados asumiendo una evaporación activa de 9 l/s, una capacidad de la planta de tratamiento de 19 l/s (Golder, noviembre de 2005c) y un consumo de 22 l/s de agua para riego de caminos en los meses de octubre – marzo (Barrick, 2005, Pág. 12-2). Se calcula que el sistema llegará a su capacidad 4 veces en 100 años.

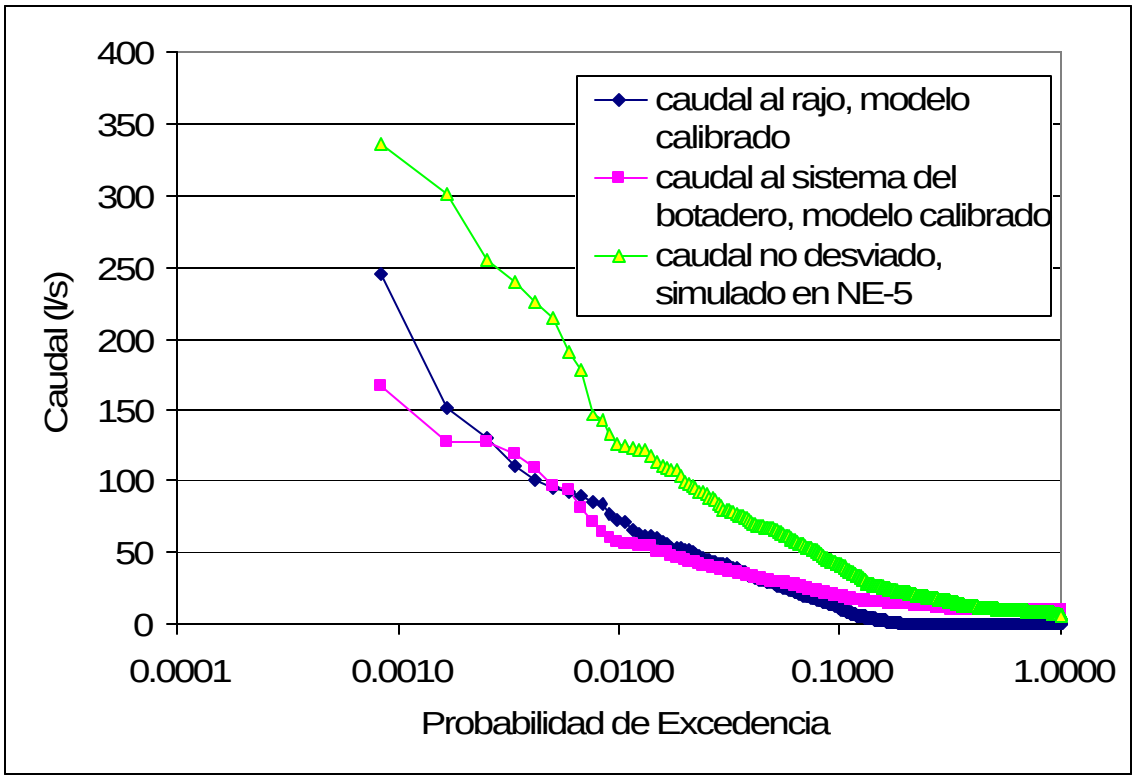
Se calculó los volúmenes asumiendo un caudal aún mayor, de 20% más del caudal no-desviado de la Figura 8.1, con un caudal mensual máximo de 400 l/s. El volumen anual máximo de este escenario es de 3.8 Mm^3, equivalente a 420 mm de agua sobre el área de 9.1 km^2 que aporta al sistema. Resultó que el sistema llegue a su capacidad 6 veces en 100 años.

Se concluye que el volumen de 800.000 será suficiente para almacenar y manejar el agua aportada al sistema. La conclusión se considera conservador, considerando otros factores:

- Será necesario una laguna construida en el rajo solamente para los primeros años de operación. Después del año 6 el rajo tendrá un volumen de almacenaje mayor que los 400.000 m^3 (Golder, noviembre de 2005c).

- Se podrá anticipar los caudales extremos varios meses antes del evento, durante el invierno anterior. Con este tiempo se podrá tomar medidas para evitar la descarga de agua no tratada del sistema de manejo.

Figura 8.1. Distribuciones de caudales simulados del sistema de manejo de aguas.



8.2 Cambios de Caudal

En la Sección 7.2 se estima los cambios de caudal:

1. Una disminución de 10-15 l/s del caudal de estiaje, debido a la desviación de agua por los canales perimetrales.

2. Una disminución promedia del volumen anual del flujo del Río Estrecho de 128.000 m^3/año, que corresponde a un caudal de 4 l/s.

El mayor impacto a los caudales de estiaje que físicamente pueda ocurrir es igual al flujo basal de NE-5, que varía entre los 10 y 35 l/s (Figura 2.2b), con un promedio de 22 l/s.

El impacto máximo posible al volumen anual de agua es igual a la parte del caudal de NE-5 que no sería desviada (Figura 8.1), que corresponde a un caudal promedio anual de 20 l/s.

Se concluye que, debido a las limitaciones físicas, los cambios al caudal de estiaje y al volumen promedio anual no podrán sobrepasar un nivel de aproximadamente 20-25 l/s.

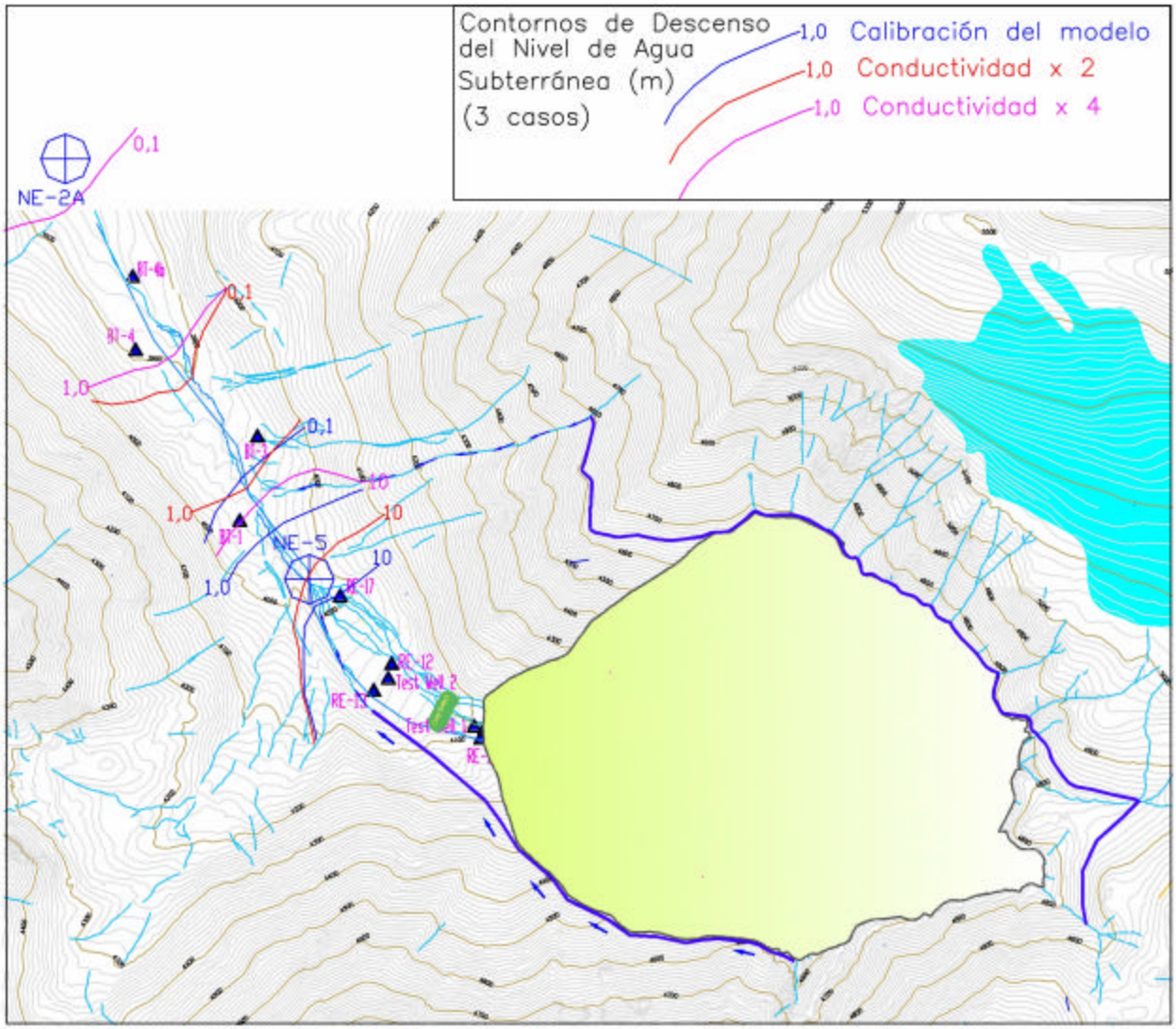
8.3 Cambios de Nivel de Agua Subterránea

El parámetro de mayor importancia para determinar los cambios de nivel subterránea es la transmisividad/conductividad del acuífero aguas abajo de NE-5, que se identifica como “aluvio de conductividad baja” en la Figura 3.5a encima de “roca fracturada de transmisividad intermedia” en la Figura 3.5b.

El modelo representa los dos niveles con una transmisividad total de 10 m^2/día, de acuerdo con el valor mayor de las pruebas de bombeo en los pozos NEV-1, NEV-2 y NEV-3 de la Tabla 2.2. Si la conductividad del acuífero sea menor, los cambios del nivel de agua sea menores. En el caso de conductividad mayor, los cambios de nivel puedan ser mayores.

Se examinó los posibles cambios de nivel que resultarían de conductividades mayores. En un caso se simuló una conductividad/transmisividad 2x los valores del modelo calibrado, que produce una calibración buena de los niveles medidos. En el otro caso se simuló una conductividad/transmisividad de 4x los valores del modelo calibrado, que produjo una calibración mala de los niveles medidos, por lo tanto se considera un caso poco probable. En la Figura 8.2 se presentan los cambios de nivel simulados con los 3 casos del modelo calibrado, conductividad 2x y conductividad 4x.

Figura 8.2. Sensibilidad de los cambios simulados del nivel de agua subterránea



8.4 Balance de Aguas del Rajo

En la sección 7.4 se estima los caudales de escurrimiento del rajo. Se concluye que el volumen de almacenamiento del rajo final será suficiente para contener todo el escurrimiento que se generará en cualquier año. El volumen máximo de agua simulado en el rajo es de 4,6 Mm^3, de un volumen de almacenamiento de 9,7 Mm^3.

Se proyecta que el nivel de agua de la laguna principal variará, entre los 4500 m y 4532 m snm, 24 m bajo de la cresta del rajo. El balance promedio anual se proyecta en 7,9 l/s de escurrimiento al rajo de deshielo de nieve, 1,5 l/s de infiltración al sistema de agua subterránea y 6,4 l/s de evaporación.

Se simula un volumen promedio de escurrimiento de 0,25 Mm^3/año al rajo, con un máximo en 100 años de 1,9 Mm^3. Este se compara al volumen disponible de de 9,7 Mm^3 de almacenaje y a la capacidad máxima de 0,5 Mm3 de evaporación del rajo. Se concluye que ninguna variación razonable del caudal de escurrimiento pueda resultar en un flujo superficial del rajo.

Un parámetro desconocido es la conductividad del fondo del rajo. Para el análisis de la sección 7.4 se asumió un valor bajo, de 1e-6 cm/s. Para evaluar la sensibilidad de los resultados se experimentó con valores aún menores.

Para una conductividad de 1e-7 cm/s, el nivel de agua varía desde 4506 m y 4540 m snm. Resulta un balance promedio de 7,9 l/s de escurrimiento al rajo de deshielo de nieve, 0,5 l/s de infiltración al sistema de agua subterránea y 7,4 l/s de evaporación.

Se concluye que el volumen de almacenaje del rajo es suficiente para contener el escurrimiento y el nivel de agua no podrá llegar a la cresta del rajo. El agua que aporta el rajo fluirá como agua subterránea, con un caudal regulado, al sistema de captación de agua.

9 REFERENCIAS

Aquaconsult Cía. Ltda. Estudio De Impacto Ambiental Línea Base - Hidrogeología, Proyecto Pascua. Marzo de 1998.

Aquaconsult Cia. Ltda. Programa de Sondajes de Monitoreo Para control de Drenaje Ácido, Proyecto Pascua. Abril de 2000

Barrick, 2005. Estudio de Impacto Ambiental, Modificaciones Proyecto Pascua Lama, Adenda 2.

Concha, Héctor. 2005. INFORME ANALISIS DESCRIPTIVO NIVOMÉTRICO PASCUA LAMA. Informe a la Compañía Minera Nevada Ltda.

DGA, "Pronunciamiento Sectorial de la DGA" Ord. N° 179 del 11 de mayo de 2005.

Escobar, F. y C. Garin, 2005, "Enchaurren Norte, Mass Balance". Bulletins, World Glacier Monitoring Service.

Farnsworth, Richard K.; and Thompson, Edwin S. 1982. Evaporation atlas for the contiguous 48 United States. NOAA Technical Report NWS 33. National Weather Service. Washington, DC.

Geoestudios Ltda. Estudio Hidrogeologico para el Proyecto Minero Nevada. Junio de 1994.

Ginot et al., 2001, "Effects of Postdepositional Processes on Snow Composition of a Subtropical Glacier (Cerro Tapado, Chilean Andes)". Journal of Geophysical Research, Vol. 106, No. D23.

Golder Associates. Proyecto Pascua Lama – Estudio de Glaciares 2005 - Mapa Geomorfologico. Agosto de 2005.

Golder Associates, Condiciones Hidrogeológicas de Linea Base, Parte Superior del Río del Estrecho, Proyecto Pascua Lama. Novembre de 2005a.

Golder Associates. Línea Base de Hidrología para el Lado Chileno del Proyecto Pascua-Lama. Noviembre de 2005b.

Golder Associates. "Plan de Manejo de Aguas, Parte Superior de la Cuenca del Río del Estrecho, Proyecto Pascua Lama". Noviembre de 2005c.

Jones, M.A., Documentation for Barrick Goldstrike Mine Ground-Water Flow Model. Enero de 1998.

Jones, M.A., Documentation for MODFLOW version MAJ5, memorandum inédito elaborado para Barrick Goldstrike Mine, Octubre de 1998.

Jones, M.A., Documentation for MODFLOW version MAJ6x5, memorandum inédito elaborado para Barrick Goldstrike Mine, Octubre de 1999.

Jones, M.A., Modelo Hidrológico de la Parte Superior de la Cuenca del Río Las Taguas. Mayo de 2004.

Jones, M.A., Balance Hídrico de los Glaciares de la Cuenca Superior del Río El Toro y los Cambios Potenciales a los Caudales Aguas Abajo. Noviembre de 2005.

Knight-Piesold SA, VELADERO project, Environmental Base Line Study, VOL. II – Meteorology, 2002

Kull et al, 2002, "Modeling Modern and Late Pleistocene Glacio-Climatological Conditions in the North Chilean Andes (29-30 deg S)". *Climatic Change* 52: 359–381, 2002.

LBG-Guyton Associates. Draft: Pascua-Lama Mine Test Hole and Test Well Drilling, Barrick Chile, LTDA, Agosto de 2000.

McDonald, M.G., y A.W. Harbaugh, A Modular Three-Dimensional Finite-Difference Ground-Water Flow Model, Techniques of Water-Resources Investigations 06-A1, USGS, 1988.

Miller, R.S., User's Guide for RIV2 -- A Package for Routing and Accounting of River Discharge for A Modular, Finite-Difference, Ground-Water Flow Model, USGS Open-File Report 88-345, 1989.

TerraMatrix, Inc. Hydrologic Conditions and Water Supply Potential at the Proposed Tailing Disposal Facility, Nevada Project, Chile. Julio de 1995.

TerraMatrix, Inc. Hydrologic Summary, Pascua Mine Project, Chile. Diciembre de 1996.

U.S. Army Corps of Engineers. 1998. Runoff from Snowmelt, COE publication EM 1110-2-1406.

Water Management Consultants Ltda. Modelo de Balance Hídrico de la Escombrera de Roca Estéril Nevada Norte. Septiembre de 2005.

Water Management Consultants Ltda. Veladero Project Hydrogeologic Summary and Water Balance. Agosto de 2002

Zhan, Prediction of Closure Discharge Flux from the Waste Dump Facilities, Proyecto Veladero, Agosto de 2002

Pronóstico de Caudales de Descarga desde las Instalaciones de Botadero de Estéril en la Época de Cierre Proyecto Veladero

23 de Julio de 2002

Johnny Zhan, Ph.D.
Hidrólogo Senior
Barrick Management Corporation

1.0 INTRODUCCIÓN

Se pronosticaron los caudales de descarga a largo plazo desde las instalaciones de botadero de estéril en la época de cierre del Proyecto Veladero mediante uso de un modelo unidimensional de flujo de agua bajo condiciones no saturadas. Los flujos calculados podrán aplicarse a superficies con cobertura nival en instalaciones individuales con finalidad de proyectar los respectivos ritmos de descarga. Para el desarrollo de este modelo se utilizó el programa computacional HYDRUS-2D (Simunek y van Genuchten, 1999), que consiste en un modelo de elementos finitos para la simulación de flujos de agua a través de medios porosos no saturados mediante uso de la ecuación de Richards (Referencia). Para que pueda calcular soluciones de dicha ecuación en cada aplicación, deberán ingresarse al software los datos correspondientes al valor de conductividad hidrológica en condiciones saturadas (K_{sat}), la curva de retención de agua (WRC, sigla por su nombre en inglés "water retention curve"), la cual describe la relación entre el contenido de agua y los efectos de succión, y los aportes atmosféricos.

2.0 PROPIEDADES HIDRÁULICAS DE LOS ESTERILES

Si bien las propiedades hidráulicas en condiciones no saturadas se determinan por lo general en el laboratorio, en ocasión de la realización del presente estudio no se disponía de resultado de laboratorio alguno. Por lo tanto, dichas propiedades se estimaron para estos efectos sobre la base del análisis granulométrico de los materiales constituyentes de roca estéril, confirmado por los resultados obtenidos de ensayos de terreno.

Mbonimpa et al. (2002) y Aubertin et al. (2002) han desarrollado métodos sencillos para uso en la estimación de los valores de K_{sat} y de WRC a partir de parámetros geotécnicos básicos obtenidos de análisis granulométricos. Entre dichos parámetros se incluyen los de tamaño de partícula, D_{10}, de coeficiente de uniformidad, C_u (D_{60}/ D_{10}), y de razón de hoquedades, e. Tales métodos se han empleado con éxito para pronosticar los valores de K_{sat} y de WRC incorporados en las bases de datos UNSODA y de SoilVision (Aubertin, comunicación personal).

En el mes de Abril 2002, personal de terreno de Barrick realizó pruebas de riego en dos "cribs" o gaviones llenos de material de roca estéril (los Gaviones CTH-02-9 y CTH-02-10, respectivamente). Los materiales de estéril utilizado en estas pruebas de riego en gaviones se obtuvieron de las pilas de Túnel Amable Pila 148 y de Túnel Filo Federico Pila 167, respectivamente. Con anterioridad a la realización de las pruebas de riego, los materiales de estéril se sometieron a análisis granulométricos. La distribución granulométrica de los dos tipos de materiales en promedio se muestra en la Figura N° 1.

En la Figura N° 1, el porcentaje acumulado mínimo de material pasante es de un 60%. Con el fin de adecuar la curva de distribución granolométrica al uso de los métodos propuestos por Aubertin-Mbonimpa, ésta se ajustó mediante una ecuación de regresión semi-logarítmica. De acuerdo con dicha ecuación los tamaños de partícula D_{10} y D_{60} se estiman en valores de 0,028 cm y 1,027 cm respectivamente.

La densidad aparente en base seca del material de los gaviones se ha estimado en 1,51 g/cm^3, valor correspondiente a una porosidad equivalente a 0,40, suponiendo un peso específico de

sólidos equivalente a 2,5. El parámetro de conductividad hidráulica en condiciones no saturadas se estimó mediante uso del método de van Genuchten (van Genuchten et al., 1991). En la Figura N° 2 se presentan los parámetros de WRC estimados y los según van Genuchten ajustados. El valor de K_{sat} estimado para el material es de 2,06E-1 cm/s aproximadamente.

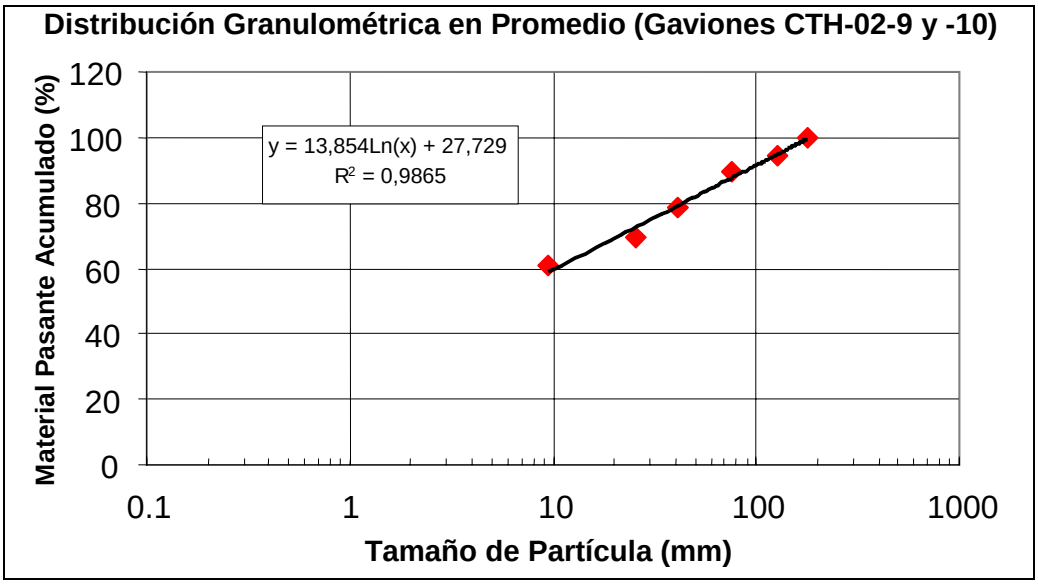


Figura N° 1. Distribución granulométrica en promedio del material de los Gaviones CTH-02-9 y CTH-02-10.

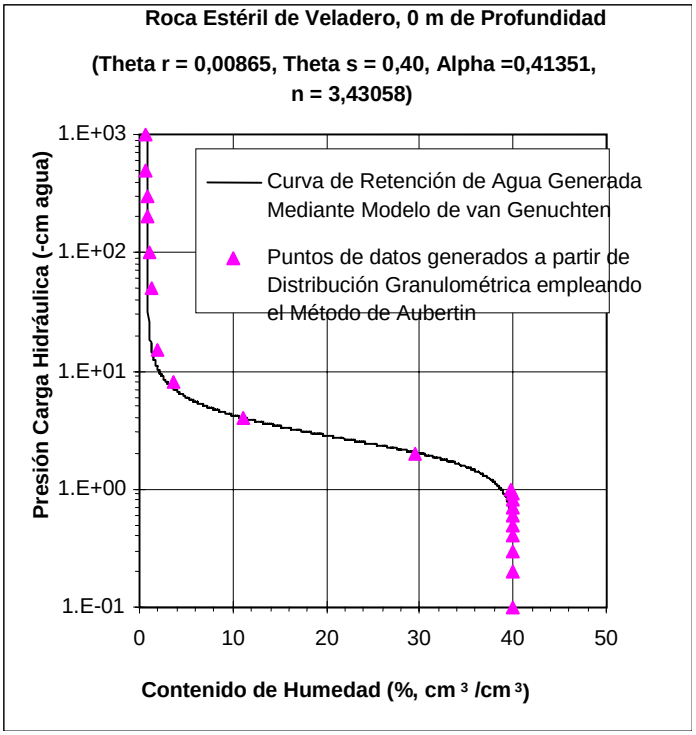


Figura N° 2. Valor de WRC estimado de la roca estéril del Proyecto Veladero.

Los Gaviones CTH-02-9 y CTH-02-10 tienen ambos dimensiones de 2,8 m x 2,8 m x 4 m. Las pruebas de riego se desarrollaron en el período de 9 – 20 de Abril de 2002. El día 9 de Abril se aplicaron 1.600 litros de agua a la parte superior de cada gavión, monitoreándose posteriormente sus respectivas tasas de drenaje descendiente observadas.

El proceso de riego se simuló mediante uso del software HYDRUS-2D y de los parámetros derivados según se ha señalado anteriormente. En la Figura N° 3 se presentan los resultados, los que indican una concordancia entre los ritmos de drenaje descendiente simulados y los observados. Este ejercicio entregó una confirmación de la confiabilidad de los parámetros hidráulicos estimados, como también de la aplicabilidad del software computacional seleccionado para uso en la simulación de flujos a través del material del botadero de estéril.

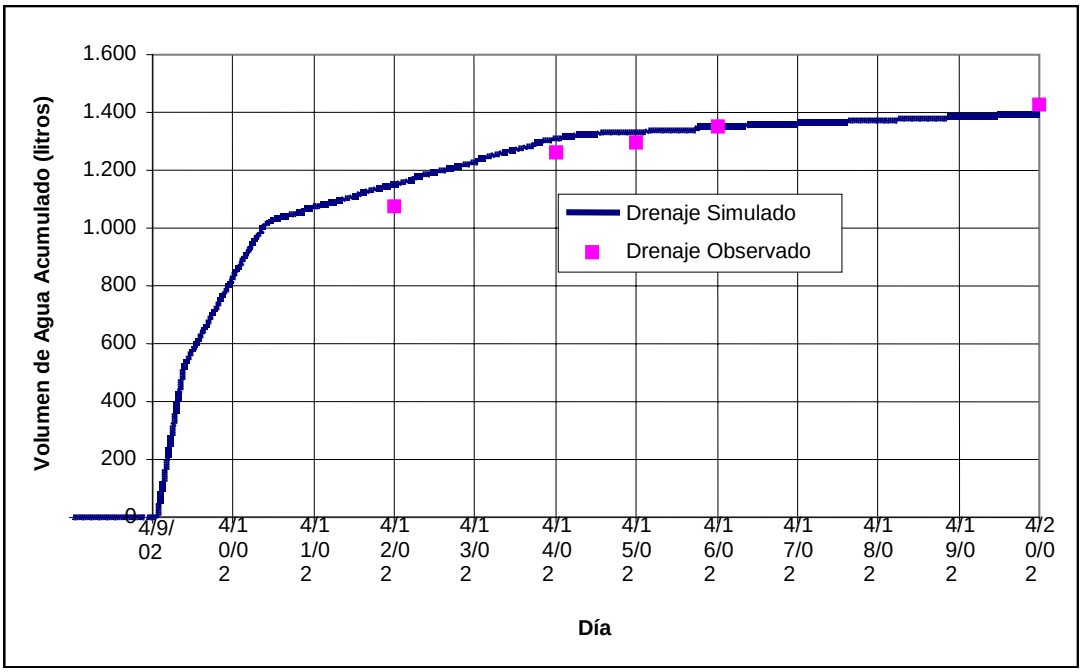


Figura N° 3. Tasas de drenaje descendiente simuladas y observadas, obtenidas de las pruebas de riego realizadas en los Gaviones CTH-02-9 y CTH-02-10.

3.0 DISCRETIZACIÓN DEL DOMINIO DE ESTUDIO Y IMPACTO DEL ESFUERZO VERTICAL NORMAL

En la Tabla N° 1 se presentan las superficies cubiertas y profundidades máximas del Botadero Norte (Botadero Filo Federico) y del Botadero Sur (Botadero Amable).

Tabla N° 1. Dimensiones geométricas de los dos botaderos de estéril del Proyecto Veladero.

Nombre	Superficie (m^2)	Profundidad Máxima (m)
Botadero Norte	2.720.401	195
Botadero Sur	2.330.446	125

El modelo presentado en este informe es de tipo unidimensional. En la simulación efectuada, el borde superior del modelo ha sido representado como de tipo de borde atmosférico y el borde inferior se definió con características de drenaje libre (con gradiente vertical unitario).

La profundidad simulada con este modelo es de 160 m, esto es, el equivalente a las profundidades máximas de desarrollo a las cuales alcanzan ambos botaderos de estéril. El dominio de estudio se discretizó en 256 capas, con distancias internodales de entre 3 y 110 cm. Los distanciamientos internodales de tamaño menor se seleccionaron para representar la parte superior e inferior del dominio del modelo, mientras los de tamaño mayor se adoptaron para representar el interior del mismo.

Se representaron en el modelo los cambios en las propiedades de materiales que se producen a mayor profundidad desde la superficie. Por lo general, con los aumentos en los esfuerzos normales se observan disminuciones en los valores de porosidad y de conductividad hidráulica, junto con aumentos en la densidad aparente. La relación adoptada entre la porosidad relativa y los esfuerzos normales se basó en un estudio de laboratorio (Golder, 2001) según se muestra en la Figura N° 4 a continuación. Asimismo, se realizaron interpolaciones de los resultados de laboratorio mediante uso de un polinomio de 2a orden.

Los parámetros hidráulicos para uso en el modelo se especificaron en términos de cuatro intervalos de 40 m cada uno. Los valores derivados para los parámetros de porosidad, densidad aparente, K_{sat}, como también para los de WRC de van Genuchten especificados para cada intervalo se detallan en la Tabla N° 2.

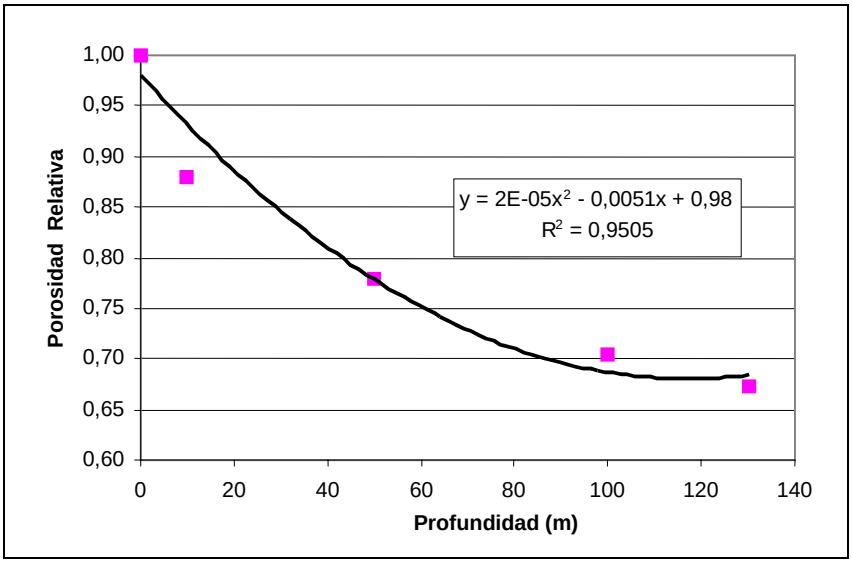


Figura N° 4. Porosidad de materiales versus profundidad.

Tabla N° 2. Propiedades hidrológicas de los materiales de botaderos de estéril correspondientes a cuatro secciones verticales.

Intervalo de Profundidad	0 – 40 m	40- 80 m	80- 120 m	120 – 160 m
Porosidad	0,35	0,30	0,27	0,26
Densidad Aparente, base seca (g/cm^3)	1,61	1,75	1,83	1,84
K_{sat} (cm/s)	7,66E-2	2,64E-2	1,32E-2	1,03E-2
Theta (r)	0,00931	0,00967	0,00971	0,00969
Alpha (cm^{-1})	0,33069	0,26689	0,23111	0,21795
N	3,45796	3,34276	3,23081	3,22183

4.0 CLIMA

Entre los parámetros climáticos que tienen que ser alimentados al programa HYDRUS-2D se incluyen valores diarios de precipitaciones efectivas (aguas lluvia / de deshielo) y niveles potenciales de evaporación. Se supuso una ausencia total de vegetación. El período total de simulación se fijó en 100 años. Los dos conjuntos de parámetros se generaron siguiendo los pasos descritos a continuación.

Paso N° 1: Generación de una Serie de Datos Climáticos Correspondientes a un Período de 100 Años

Se hizo uso de WGEN, que es un generador sintético de clima que viene incorporado en el modelo Visual Help (Schroeder et al., 1994) a fin de generar una serie de valores diarios de precipitaciones, temperaturas y radiación solar cubriendo un período de 100 años.

Se seleccionaron los registros de precipitaciones y temperaturas obtenidos de la ciudad de Reno del estado de Nevada (EE.UU.) como aptos para representar en forma de sustituto el sector del Proyecto Veladero. Cabe destacar que los dos lugares tienen valores similares de precipitaciones anuales medias sobre el largo plazo. Al desplazar la línea temporal en 6 meses para tomar en cuenta la diferencia de hemisferio, se puede observar que la distribución mensual de valores promedios de precipitaciones y de temperaturas de Reno es similar a aquellos que se han estimado para el caso de Veladero. Para uso en este ejercicio de generación sintética del clima, se sustituyeron los valores promedios de precipitaciones y temperaturas correspondientes a Reno con los valores medios mensuales estimados para el sector del Proyecto Veladero, previo desplazamiento de la secuencia cronológica en seis meses.

Es necesario que la facilidad WGEN sea alimentado también con los valores de velocidad anual de viento y de humedad relativa trimestral. Se utilizaron en esta simulación los valores promedios para el período entre Mayo de 2001 hasta Abril de 2002 obtenidos de la Estación de Potrerillos, que es la estación meteorológica más cercana al lugar de emplazamiento de los botaderos de estéril del Proyecto Veladero. Los datos obtenidos de la Estación Potrerillos se presentan en la Tabla N° 3.

Tabla N° 3. Datos climáticos medidos en la Estación Potrerillos.

	*Radiación Solar (MJ/m2/mes)	*Evaporación de Bandeja (mm)	HR Media	Velocidad Media del Viento (m/s)
May. 01	447	59	0,34	4,67
Jun. 01	420	132	0,23	3,81
Jul. 01	395	72	0,32	5,27
Ago. 01	536	43	0,28	4,78
Sep.01	682	17	0,30	4,90
Oct. 01	883	124	0,24	4,24
Nov. 01	991	237	0,19	4,86
Dic. 01	944	203	0,39	3,63
Ene. 02	1074	261	0,27	3,71
Feb. 02	883	210	0,31	3,69
Mar. 02	822	211	0,23	3,95
Abr. 02	618	120	0,25	4,79

* Valores promedios obtenidos de las Estaciones Potrerillos y Veladero.

Paso N° 2: Modificación de la Serie de Registros Sintéticos de Precipitaciones del Período de 100 Años Simulado

Los registros sintéticos de precipitaciones desarrollados con el uso de la facilidad WGEN se modificaron para reflejar las grandes variaciones que caracterizan los niveles de precipitaciones en el lugar del Proyecto. Las precipitaciones a nivel regional presentan típicamente ciclos de muchos años de precipitaciones en niveles inferiores al promedio, con intercalaciones de años húmedos en un extremo. Los registros de más larga data de la zona del Proyecto son los de la Estación El Indio, ubicada a unos 50 km del emplazamiento del Proyecto Veladero. En la Tabla N° 4 se presentan los registros anuales de precipitaciones de El Indio. De los 21 años de registros, en 16 se presentaron precipitaciones en niveles inferiores al promedio, y en 4 se registraron precipitaciones en niveles de más del doble del promedio. Al respecto, el valor mediano de precipitaciones es el equivalente de unos 2/3 de las precipitaciones tomadas en promedio. En consecuencia, la serie de registros sintéticos se modificó en dos etapas para reflejar la distribución de precipitaciones en el lugar:

1) Se ha concluido que los datos de precipitaciones de El Indio pueden representarse adecuadamente mediante uso de una distribución de tipo Log-Pearson III (WMC, 2002), tal como se muestra en la Figura N° 5. Se generó en forma aleatoria una serie de registros de precipitaciones cubriendo un período de 100 años, con valores anuales de precipitaciones por períodos de retorno desde 1 año hasta 100 años. Esta serie de registros sintéticos de precipitaciones diarias de un período de 100 años generados mediante uso de la facilidad WGEN se ha dimensionado a escala, en forma concordante con los valores anuales correspondientes a los registros sintéticos para el caso de El Indio.
2) Mediante un estudio de los datos de precipitaciones a escala regional se ha obtenido la siguiente ecuación de regresión (WMC, 2002) para uso en estimar los valores de precipitaciones anuales en función de nivel sobre el mar y de latitud:

$$P = (0{,}0316\ mm \times m^{-1})\ E + (42{,}784\ mm \times deg^{-1})\ L - 1201\ mm \quad (1)$$

Basado en una altura (E) de 4350 msnm y una latitud (L) de 29,35, la aplicación de la ecuación (1) arroja estimaciones de precipitaciones para el sector del Proyecto Veladero en un nivel de alrededor de un 112% de los niveles correspondientes experimentados en El Indio. En consecuencia, se multiplicaron los valores de la serie de 100 años de precipitaciones diarias por un factor de 1,12.

Tabla N° 4. Precipitaciones de El Indio.

Año	Precipitaciones (mm)
1981	27,2
1996	41
1995	51,7
1993	62,5
1999	73,1
1994	77,2
1988	78,6
1998	97
1985	99,8
1991	101,7
1982	113,3
1990	118,3
1983	124,3
1989	128
2000	130,3
2001	155,9
1992	190
1986	339
1997	374,4
1984	414,1
1987	754,3
Prom.	169,1
Mediano	113,3

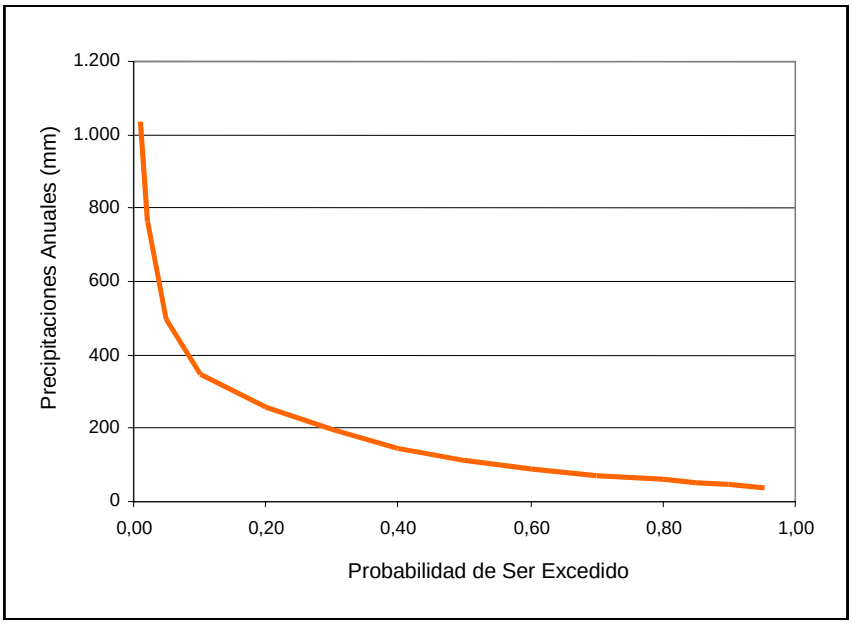


Figura N° 5. Representación de Log Pearson III para el caso de El Indio

Los valores promedios sintéticos finales de precipitaciones y temperaturas mensuales se presentan en la Tabla N° 5. Cabe destacar que la serie de valores sintéticos modificados concuerda estrechamente con las distribuciones desarrollados a partir de datos obtenidos de estaciones meteorológicas (WMC 2002).

Tabla N° 5. Datos de precipitaciones y de temperaturas medias mensuales.

Mes	Precipitaciones Estimadas (WMC 2002) (mm)	Valores Sintéticos de Precipitaciones Modificados (mm)	Temperaturas Estimadas (WMC 2002) (^{o}C)	Temperaturas Sintéticas (^{o}C)
Ene.	0,2	0,2	2,9	3,2
Feb.	0,4	0,4	2,1	2,0
Mar.	1,7	1,3	2,4	2,3
Abr.	5,4	4,6	-2,3	-2,2
May.	28,6	30,1	-3,2	-3,1
Jun.	38,2	38,1	-3,8	-4,0
Jul.	55,0	58,5	-6,9	-7,0
Ago.	39,7	33,0	-4,1	-4,2
Sep.	13,6	14,8	-1,3	-1,2
Oct.	8,2	8,1	-2,3	-2,0
Nov.	0,6	0,7	0,4	0,4
Dic.	0,2	0,1	3,1	3,2
Total	191,8	190,0		
Promedio			-1,1	-1,0

Paso N° 3: Cálculo de Valores de Evaporación Potencial

El parámetro de evaporación potencial se ha calculado haciendo uso de la ecuación de Penman (Penman, 1948, 1956):

$$E = [(\Delta / \gamma) Q_{ne} + E_a] / [(\Delta / \gamma) + 1] \quad (2)$$

Donde:

E = tasa de evaporación potencial

Δ = de*/dT, e* representa la presión de vapor en condiciones saturadas y T la temperatura

γ representa un constante sicrométrico

Δ / γ (valor no unitario) representa un valor en función de la temperatura

E_a representa la transferencia másica o aporte convectivo al proceso de evaporación

E_a representa un valor en función de los parámetros de velocidad del viento, presión de vapor en condiciones saturadas y presión de vapor

Q_{ne} representa el aporte radiactivo al proceso de evaporación. $Q_{ne} = R_n/L_e$

L_e representa el calor latente de vaporización, que es un valor en función de la temperatura

R_n representa la densidad neta de radiación solar incidente al cuerpo de agua

Se desarrolló un modelo en forma de planilla de cálculo para uso en calcular las tasas de evaporación potencial a partir de los valores promedios diarios de velocidad de viento, temperatura, humedad relativa, radiación solar y coeficiente de albedo. El parámetro de temperatura se generó mediante uso de la facilidad de WGEN y el de radiación solar se obtuvo mediante generación por WGEN, seguido por su dimensionamiento a escala hasta obtener concordancia con los valores consignados en la Tabla N° 3. Los valores promedios de velocidad de viento y de humedad relativa (Tabla N° 3) se derivaron de supuestos. Los valores de albedo y de cobertura de nubes se estimaron sobre la base de trabajos previos (WMC 2002) y se presentan en forma resumida en la Tabla N° 6.

Las tasas de evaporación potencial mensual promediadas se presentan en la Tabla N° 7 a continuación. Cabe señalar que al contrastarse los valores de evaporación potencial con los de evaporación de bandeja consignados en la Tabla N° 3, resulta que los primeros equivalen un 80% aproximadamente de los últimos, expresados como valores anuales.

Tabla N° 6. Valores estimados de albedo y de cobertura de nubes

	Cobertura de Nubes	Albedo
May.	0,20	0,60
Jun.	0,36	0,75
Jul.	0,30	0,85
Ago.	0,30	0,80
Sep.	0,25	0,60
Oct.	0,20	0,55
Nov.	0,17	0,45
Dic.	0,20	0,40

Ene.	0,25	0,40
Feb.	0,26	0,40
Mar.	0,28	0,40
Abr.	0,25	0,60

Tabla N° 7. Valores calculados de evaporación media potencial mensual

	Evaporación Potencial Mensual (mm)
Ene.	178
Feb.	132
Mar.	156
Abr.	95
May.	78
Jun.	61
Jul.	55
Ago.	70
Sep.	100
Oct.	117
Nov.	160
Dic.	156

Paso N° 4: Cálculo de Valores de Precipitaciones Diarias "Efectivas" y de Evaporación Potencial

Se desarrolló un modelo en forma de planilla de cálculo para representar los ritmos diarios de acumulación y de fusión de precipitaciones producidas en forma de nieve.

- La entrada "Precipitaciones" se calcula como la suma de las precipitaciones en forma de lluvia y de la cantidad producida por proceso de fusión nival.
- Los valores de evaporación potencial, expresados según se calculan de acuerdo con el Paso N° 3 se ingresan al modelo al estar frente a condiciones de bancos de nieve en niveles equivalentes a cero. En cambio, al presentarse bancos de nieve el valor de evaporación potencial se fija en cero.

Se ha adoptado el supuesto que a temperaturas inferiores a los $0^{o}C$ las precipitaciones se producirán en forma de nieve, y en la forma de lluvia a temperaturas superiores. Se ha concluido que en la serie de datos correspondientes al período de 100 años simulado, un 91% de las precipitaciones se produce en la forma de nieve.

Se supone que la fusión de nieve ocurre a temperaturas superiores a cero grados y que a temperaturas inferiores se presentan pérdidas por proceso de sublimación nival.

El valor de fusión de nieve potencial se estima a partir de parámetros meteorológicos haciendo uso del componente de onda total de radiación de la ecuación generalizada de fusión de nieve (Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos, 1998):

$$M = (3{,}08*Rad)*(1-A) + [(1-N)* (0{,}969*T - 21.34) + N*(1{,}33*T)] \quad (3)$$

Donde:

M = tasa de fusión nival potencial (mm/día)
Rad = radiación solar (MJ/m^2/día)
A = albedo expresado en forma de fracción decimal
N = cobertura de nubes expresada en forma de fracción decimal
T = temperatura atmosférica (^oC)

Para el caso del modelo, se ha adoptado el supuesto que la potencial de sublimación nival se presenta en niveles equivalentes a un tercio de los de la evaporación potencial. Al respecto, los resultados del modelo indican que un 36% de las precipitaciones anuales egresan por efectos de sublimación.

5.0 RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN

En la Figura N° 6 se presentan los valores simulados de ritmos de flujos a la atmósfera y por el fondo para el caso de los botaderos de estéril de Veladero. Al respecto, los valores de flujo de signo positivo representan caudales efluentes de los botaderos mientras los valores negativos representan caudales afluentes. También en dicha figura se muestran los valores de precipitaciones anuales. Se observa que a lo largo del período de 100 años simulados, el flujo por el fondo de los botaderos se presenta en un rango de entre 1,1 cm/año y 42.5 cm/año.

El período anual adoptado para fines de esta simulación va desde el 1 de Julio hasta el 30 de Junio. En cualquier año de simulación dado, si quedan bancos de nieve en cantidades suficientes al final del mes de Junio del año precedente, se presentará la posibilidad de que los flujos a la atmósfera superen incluso los respectivos valores de precipitaciones.

Los resultados de la simulación indican que no se produce escurrimiento de aguas superficiales alguno durante el período de 100 años simulados. Asimismo, indican que la tasa máxima diaria de lluvia / fusión de nieve del período es de 4,7 cm, esto es, un valor bastante inferior al de conductividad hidráulica en condiciones saturadas (17.798 cm/día) que ha sido estimado para los estériles de los botaderos. Asimismo, la tasa de riego empleada para efectos de las pruebas en los Gaviones CTH-02-9 y CTH-02-10 es de 20,4 cm/día. En dichas pruebas, no se observó acumulaciones de agua en la superficie. Por lo tanto, se estima razonable afirmar que no se producirá escurrimiento de aguas superficiales.

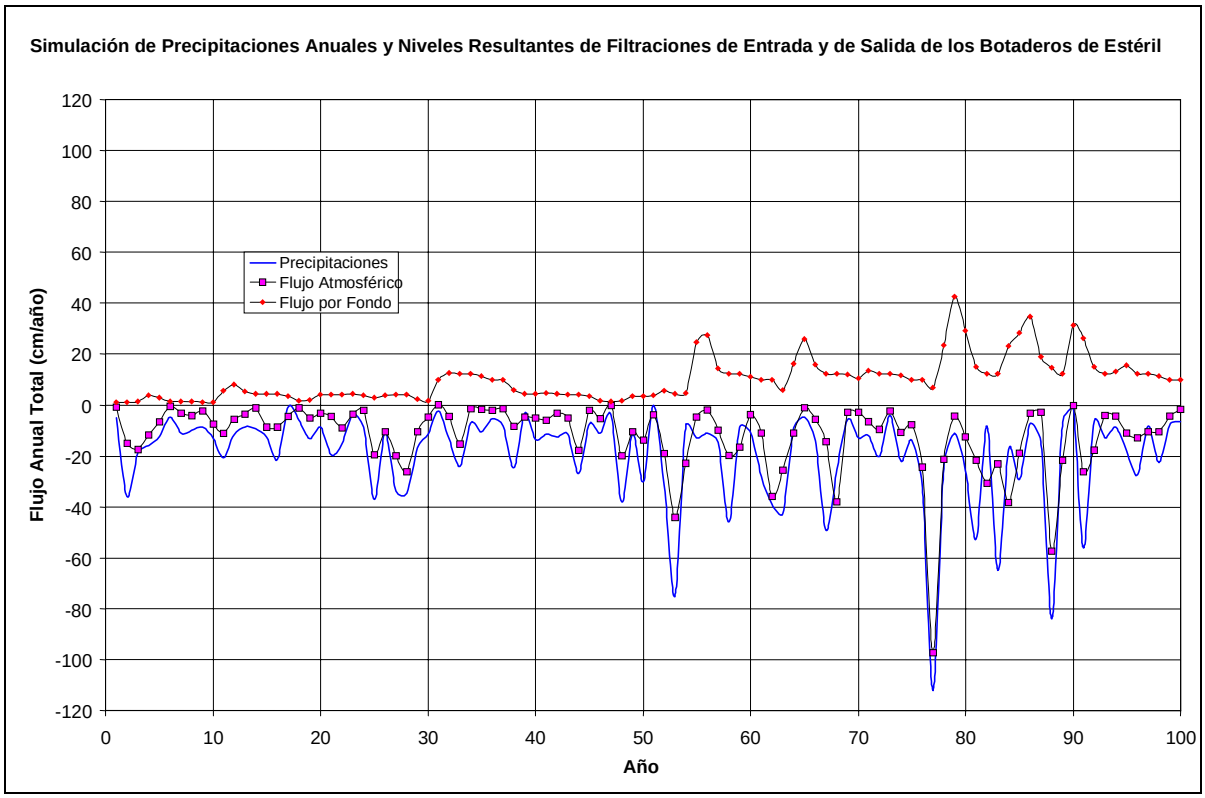


Figura N° 6. Flujos simulados desde los botaderos de estéril del Proyecto Veladero.

REFERENCIAS

Aubertin, M., M. Mbonimpa, B. Bussiere y R.P. Chapuis. 2002. A physically-based model to predict the water retention curve from basic geotechnical properties. Trabajo presentado a *Can. Geotech J.*

Golder Associates. Diciembre de 2001. Predicted closure drainage for the Veladero Valley Leach Facility. 013-2312.140. Informe preparado para Homestake Mining Company.

Mbonimpa, M., M. Aubertin, R.P. Chapuis y B.Bussiere. 2002. Practical pedotransfer function for estimating the saturated hydraulic conductivity. *Can. Geotech J*. 20: 235-259.

Penman, H.L. 1948. *Natural Evaporation from Open Water, Bare Soil, and Grass*. Proc. Roy. Soc. Londres A193, 120-146

Penman, H.L. 1956. Evaporation: an introductory survey. *Netherlands Journal of Agricultural Science 4*, 9-29

Schroeder, P.R., T.S. Dozier, P.A. Zappi, B.M. McEnroe, J.W. Sjostrom y R.L. Peyton. 1994. *The Hydrologic Evaluation of Landfill Performance (HELP) Model: User's Guide for Version 3*. EPA/600/9-94/168b. Laboratorio U.S. Environmental Agency Risk Reduction Engineering Laboratory, Cincinnati, Ohio.

Simunek, J., M. Sejna y M. Th. van Genuchten. 1999. Simulating water flow and solute transport in two-dimensional variable saturated media, version 2.0. *HYDRUS2D/MESHGEN2D*. U.S. Laboratorio Salinity Laboratory, Riverside, California.

U.S. Army Corps of Engineers. 1998. Runoff from Snowmelt, publicación COE EM 1110-2-1406.

van Genuchten, M. Th., F.J. Leij y S.R. Yates 1991. *The RETC code for qualifying the hydraulic function of unsaturated soils*: 1-85. EPA Rep. EPA/600/2-91/065, Kabiratirui U.S. Salinity Laboratory, Riverside, California.

Water Management Consultant. Ltd. Junio de 2002. Draft Veladero Project hydrologic summary and water balance.

Servicio de Impuestos Internos
www.sii.cl
F 2900

N° 3262729

FECHA DE EMISION, 09 DE ENERO DE 2006
HOJA 1 DE 1
CODIGO 80

CERTIFICADO DE AVALUO FISCAL
(NO ACREDITA DOMINIO DE LA PROPIEDAD)

VALIDO PARA EL 2DO SEMESTRE DE 2005

COMUNA	:ALTO DEL CARMEN
NUMERO DE ROL	:903-15
DIRECCION O NOMBRE DE LA PROPIEDAD	:CHANARCILLO CHOLLAY
DESTINO DE LA PROPIEDAD	:AGRICOLA
NOMBRE DEL PROPIETARIO	:CIA MINERA NEVADA S A
ROL UNICO TRIBUTARIO	:85.306.000-3
AVALUO TOTAL	: $ 91.939.998
AVALUO EXENTO DE IMPUESTO	: $ 5.212.812
AVALUO AFECTO A IMPUESTO	: $ 86.727.186
ANO TERMINO DE EXENCION	:1987

CLASIFICACION DE SUELOS 4 R 50,00 HAS, 8 9900,00 HAS

EL AVALUO QUE SE CERTIFICA HA SIDO DETERMINADO SEGUN EL PROCEDIMIENTO DE TASACION FISCAL PARA EL CALCULO DEL IMPUESTO TERRITORIAL, DE ACUERDO A LA LEGISLACION VIGENTE, Y POR TANTO NO CORRESPONDE A UNA TASACION COMERCIAL DE LA PROPIEDAD.

POR ORDEN DEL DIRECTOR

SERVICIO DE IMPUESTOS INTERNOS
Jefe
Departamento
Avaluaciones
LA SERENA
DIRECCION REGIONAL IV

FIRMA Y TIMBRE

OBTENGA SU CERTIFICADO DE AVALUO FISCAL DE MANERA GRATUITA EN EL SITIO INTERNET DEL SII, WWW.SII.CL

Servicio de Impuestos Internos
www.sii.cl
F 2900

Nº 3262728

FECHA DE EMISION, 09 DE ENERO DE 2006
HOJA 1 DE 1
CODIGO 80

CERTIFICADO DE AVALUO FISCAL
(NO ACREDITA DOMINIO DE LA PROPIEDAD)

VALIDO PARA EL 2DO SEMESTRE DE 2005

COMUNA	:ALTO DEL CARMEN
NUMERO DE ROL	:930-9
DIRECCION O NOMBRE DE LA PROPIEDAD	:LOS COLORADOS POTRERILL
DESTINO DE LA PROPIEDAD	:AGRICOLA
NOMBRE DEL PROPIETARIO	:COMPANIA MINERA NEVADA LIMITADA
ROL UNICO TRIBUTARIO	:85.306.000-3
AVALUO TOTAL	: $ 53.909.713
AVALUO EXENTO DE IMPUESTO	: $ 5.212.812
AVALUO AFECTO A IMPUESTO	: $ 48.696.901
ANO TERMINO DE EXENCION	:1987

CLASIFICACION DE SUELOS 4 R 30,00 HAS, 6 50,00, 8 5000,00 HAS

EL AVALUO QUE SE CERTIFICA HA SIDO DETERMINADO SEGUN EL PROCEDIMIENTO DE TASACION FISCAL PARA EL CALCULO DEL IMPUESTO TERRITORIAL, DE ACUERDO A LA LEGISLACION VIGENTE, Y POR TANTO NO CORRESPONDE A UNA TASACION COMERCIAL DE LA PROPIEDAD.

POR ORDEN DEL DIRECTOR

SERVICIO DE IMPUESTOS INTERNOS
Jefe
Departamento
Avalúos
DIRECCION REGIONAL IV

FIRMA Y TIMBRE

OBTENGA SU CERTIFICADO DE AVALUO FISCAL DE MANERA GRATUITA EN EL SITIO INTERNET DEL SII, WWW.SII.CL

SOLICITUD CAMBIO DE USO DE SUELO, ANTECEDENTES LEGALES Y MEMORIA TÉCNICA AGRONÓNICA

SOLICITUD CAMBIO DE USO DE SUELO, ANTECEDENTES LEGALES Y MEMORIA TÉCNICA AGRONÓNICA

MARCO LEGAL

a) Decreto con Fuerza de Ley N° 458 (D.S. N° 458 o D.F.L. N° 458) del Ministerio de la Vivienda y Urbanismo (Artículo 55º); Aprueba Nueva Ley General de Urbanismo y Construcciones; Publicado en el Diario Oficial el 13 de abril de 1976.

> *Artículo 55.- Fuera de los límites urbanos establecidos en los Planes Reguladores no será permitido abrir calles, subdividir para formar poblaciones, ni levantar construcciones, salvo aquellas que fueren necesarias para la explotación agrícola del inmueble, o para las viviendas del propietario del mismo y sus trabajadores.*
>
> *Corresponderá a la Secretaría Regional de Vivienda y Urbanismo respectiva cautelar que las subdivisiones y construcciones en terrenos rurales, con fines ajenos a la agricultura, no originen nuevos núcleos urbanos al margen de la Planificación urbana-regional.*
>
> *Con dicho objeto, cuando sea necesario subdividir y urbanizar terrenos rurales para complementar alguna actividad industrial con viviendas, dotar de equipamiento a algún sector rural, o habilitar un balneario o campamento turístico, la autorización que otorgue la Secretaría Regional del Ministerio de Agricultura requerirá del informe previo favorable de la Secretaría Regional del Ministerio de Vivienda y Urbanismo. Este informe señalará el grado mínimo de urbanización que deberá tener esa división predial.*
>
> *Igualmente, las construcciones industriales, de equipamiento, turismo, y poblaciones, fuera de los límites urbanos, requerirán, previamente a la aprobación correspondiente de la Dirección de Obras Municipales, del informe favorable de la Secretaría Regional del Ministerio de Vivienda y Urbanismo y del Servicio Agrícola que correspondan.*

b) Ley Nº 19.283 (Artículo 46º) del Ministerio de Agricultura, Subsecretaria de Agricultura, Modifica Ley Nº 18.755, Sobre Organización y Atribuciones del Servicio Agrícola y Ganadero, Publicado en el Diario Oficial del 05 de enero de 1994.

> *Artículo 46.- Para autorizar un cambio de uso de suelos en el sector rural, de acuerdo al artículo 55 del Decreto Supremo Nº 458, de 1976, del Ministerio de Vivienda y Urbanismo, se requerirá informe previo del Servicio. Dicho informe deberá ser fundado y público, y expedido por el Servicio dentro del plazo de 30 días, contados desde que haya sido requerido. Asimismo, para proceder a la subdivisión de predios rústicos, el Servicio certificará el cumplimiento de la normativa vigente.*

c) Ley Nº 19.300, Ministerio Secretaría General de la Presidencia, Bases Generales sobre el Medio Ambiente. Publicado en el Diario Oficial el 9 de marzo de 1994.

D.S. Nº 95/2001, Ministerio Secretaría General de la Presidencia, Reglamento del Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental; Publicado en el Diario Oficial el 7 de diciembre de 2002.

Ambas normas establecen si el Proyecto, por el cual se solicita el Cambio de Uso de Suelos, ingresa al SEIA y de ser así, si tiene la susceptibilidad de causar impacto ambiental.

Por otra parte, la Ley Nº 19.300 en el Artículo 11º, señala que se debe elaborar un Estudio de Impacto Ambiental, si generan o presentan los efectos, características o circunstancias, descritos en las letras "a" y "b".

a) Riesgo para la salud de la población, debido a la cantidad y calidad de efluentes, emisiones o residuos;
b) Efectos adversos significativos sobre la cantidad y calidad de los recursos naturales renovables, incluidos el suelo, agua y aire;

El D.S. Nº 95/01 en sus Artículos 5 y 6, se extiende en los efectos, características o circunstancias de las letras "a" y "b" mencionadas, en forma respectiva.

Además, en el D.S. Nº 95/01 se indican las condiciones que se deben cumplir para otorgar el Permiso Ambiental Sectorial del Artículo 96º, referido al permiso para urbanizar terrenos rurales para complementar alguna actividad industrial o para construcciones industriales, por lo que el proyecto minero Pascua – Lama, por ubicarse en una zona rural requiere solicitar cambio de uso de suelo.

En el marco de la evaluación de impacto ambiental de la Modificación del Proyecto Pascua-Lama, se presenta la Solicitud de Cambio de Uso de Suelos.

d) Circular DDU Nº 136 (División de Desarrollo Urbano) del Ministerio de Vivienda y Urbanismo, de fecha 14 de junio de 2004.

Instruye sobre aplicación del artículo 55 de la Ley General de Urbanismo y Construcciones. A continuación se consignan los aspectos más relevantes relacionados con el cambio de uso de suelo y la aplicación del artículo 55 identificado.

Se entiende por cambio de uso del suelo localizado fuera de los límites urbanos establecidos por los instrumentos de planificación territorial, la consecuencia de un acto administrativo de autorización otorgada por el Ministerio de Agricultura a través de sus organismos regionales competentes, que facultan al propietario de un terreno para cambiar la utilización y aptitud agrícola, ganadera y/o forestal del suelo hacia fines distintos como los habitacionales, industriales, turísticos y de otros equipamientos esenciales de carácter complementario. Aquellas edificaciones que se aparten del uso de suelo agrícola original del área rural, deberán someterse al procedimiento de cambio de uso del suelo.

Cuando se requiera construir, sin mediar subdivisión, edificaciones destinadas a industria y equipamiento, se requerirá el informe favorable de la Secretaría Regional Ministerial de Vivienda y Urbanismo, del Servicio Agrícola y Ganadero y la aprobación correspondiente de la Dirección de Obras Municipales.

El Servicio Agrícola y Ganadero, dependiente del Ministerio de Agricultura, es el organismo legalmente facultado para informar favorable o desfavorablemente la factibilidad de cambio del uso del suelo agrícola.

Toda la gestión administrativa prevista en el artículo 55 de la LGUyC debe iniciarse, tramitarse y coordinarse a través de la Secretaría Regional Ministerial de Agricultura respectiva, considerando que las acciones que se lleven a cabo, afectan el destino del área rural.

Conforme a lo que establecen el inciso segundo del artículo 55 y el inciso tercero del artículo 2.1.19. de la Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones, corresponde a las Secretarías Regionales Ministeriales de Vivienda y Urbanismo cautelar que las subdivisiones y construcciones en terrenos rurales, con fines ajenos a la agricultura, no originen núcleos urbanos al margen de la planificación urbana regional, como asimismo que las subdivisiones y construcciones cumplan con las disposiciones pertinentes establecidas en el Instrumento de Planificación Territorial, cuando éste exista.

Todas las obras de construcción ejecutadas fuera de los límites urbanos a las que se refiere el artículo 55 de la Ley General de Urbanismo y Construcciones requieren necesariamente del permiso de la Dirección de Obras Municipales respectiva.

Mediante el artículo único del D.S. Nº 138 (Minvu) de 2002, publicado en el Diario Oficial de 14 de Septiembre de 2002, fue derogada la intervención en el conocimiento y/o aprobación de proyectos a ser desarrollados fuera de los límites urbanos, por la Comisión Mixta de Agricultura, Vivienda y Urbanismo, Turismo y Bienes Nacionales, organismo técnico asesor de nivel nacional y regional.

La presentación de todos los antecedentes deben ser presentados en carpetas o legajos, sugiriéndose como mínimo en quintuplicado.

e) Otros antecedentes

e.1 Pauta de Procedimiento para Autorización de Cambio de Uso de Suelo, correspondiente a un Instructivo del Ministerio de Agricultura

Dicho instructivo se elaboró para complementar los criterios expuestos en el documento "El Permiso Ambiental Sectorial indicado en el artículo 97 del Reglamento del SEIA", correspondiente a la fecha al D.S. Nº 30/97, Permiso que hoy día se encuentra en el Artículo 96º, según el nuevo Reglamento (D.S. Nº 95/01).

En particular, dicho instructivo, especifica los antecedentes que debe contener el respectivo Estudio de Impacto Ambiental, a objeto que la Secretaría Regional Ministerial de Agricultura se pronuncie sobre este permiso.

e.2 Guía para subdivisión de predios rústicos con cambio de uso o cambio de uso solamente, de la SEREMI de Agricultura.

SOLICITUD DE CAMBIO DE USO DEL SUELO

A. INDIVIDUALIZACIÓN DEL PROPIETARIO

Razón Social	:	Compañía Minera Nevada Ltda.
RUT	:	85.306.000-3
Rubro	:	Extracción otros minerales metálicos
Domicilio	:	Ricardo Lyon 222, Piso 11, Comuna Providencia, Santiago
Fono	:	(2) 340 2022
Fax	:	(2) 340 2056

B. INDIVIDUALIZACIÓN DEL REPRESENTANTE LEGAL

Nombre	:	Derek Riehm
RUT	:	21.624.090-1
Domicilio	:	Ricardo Lyon 222, Piso 11, Comuna Providencia, Santiago
Fono	:	(2) 340 2022
Fax	:	(2) 340 2056

Nombre	:	Laura Emery
RUT	:	14.598.411-4
Domicilio	:	Ricardo Lyon 222, Piso 11, Comuna Providencia, Santiago
Fono	:	(2) 340 2022
Fax	:	(2) 340 2056

C. INDIVIDUALIZACIÓN DEL PREDIO

El predio se encuentra conformado por dos Lotes, la Estancia Chañarcillo y Estancia Los Colorados y Potrerillos, cada uno de ellos con un número de rol de avalúo propio. A continuación se individualiza cada uno de los lotes. En la **Lámina 1** se presenta la localización del área del proyecto en la cuenca del río Huasco, mientras que en la **Lámina 2** se observan los deslindes de cada uno de los predios. Ambas Láminas se encuentran contenidas en el **Apéndice Láminas**.

LOTE 1:

Nombre de la propiedad	:	CHAÑARCILLO CHOLLAY
Número Rol avalúo SII	:	903–015 Comuna Alto del Carmen
Superficie física predial afecta a impuesto SII	:	9.950 ha
Superficie física predial total planimetría	:	48.801,41 ha
Superficie física para cambio de uso de suelo	:	3.276,5 ha

El predio se encuentra reconocido en el SII con el nombre de Chañarcillo Chollay. En otros documentos se identifica con el nombre de Estancia Chañarcillo, encontrándose conformado por dos predios contiguos, El Fundo Chañarcillo y Estancia Chollay, según se consigna en el Certificado de Dominio.

Por su forma irregular, el predio no puede ser caracterizado por los vértices, como si se tratase de un polígono regular o relativamente regular, de modo que, a continuación, en la **Tabla 1**, se indican sólo tres vértices del polígono que contiene el predio.

Tabla 1
Principales Vértices que Contienen el Predio Estancia Chañarcillo

Vértice	Coordenadas UTM (m)	
	Norte	Este
1	6.771.041	407.590
2	6.772.023	379.026
4	6.755.616	401.040

Datum Sudamérica Prov. 56 Huso 19

Comuna : Alto del Carmen
Provincia : Huasco
Región : IIIª Región de Atacama

Deslindes del Lote 1 :

Al norte : Con el río Chollay y las divisorias del río Pachuy con la quebrada Chañarcillo.

Al sur y suroeste : Con el Lote 2, por medio de la divisoria de aguas del río Del Toro y quebrada Barriales (ambos al norte de la divisoria), con el río de Las Tres Quebradas (al sur)

Al oeste : Con parte del Lote 2 y los tributarios del río Del Tránsito, quebrada Pinte y quebrada La Plata, en sus cabeceras, donde el deslinde corresponde a la divisoria de aguas de estas quebradas con tributarios que se encuentran a la izquierda del río Chollay.

Al poniente : El límite fronterizo con la República de Argentina, en la cabecera del río Blanco, río Del Estrecho y quebrada Barriales.

LOTE 2:

Nombre de la propiedad en SII : LOS COLORADOS Y POTRERILLOS
Número Rol avalúo SII : 930-009 Comuna Alto del Carmen
Superficie física predial afecta a impuesto SII : 5.080 ha
Superficie física predial total planimetría : 86.265,11 ha

Superficie física para cambio de uso de suelo : 483,2 ha

El predio también se conoce con el nombre de Estancia Los Colorados y Potrerillos o Estancia De Colorados y Potrerillos.

Por su forma irregular, el predio no puede ser caracterizado por los vértices, como si se tratase de un polígono regular o relativamente regular, de modo que, a continuación, en la **Tabla 2**, se indican las coordenadas de tres puntos del polígono que conforman el predio.

Tabla 2
Principales Vértices que Contienen el Predio Estancia Los Colorados y Potrerillos

Vértice	Coordenadas UTM (m)	
	Norte	Este
2	6.772.023	379.026
3	6.736.661	407.768
4	6.775.616	401.040

Datum Sudamérica Prov. 56 Huso 19

Comuna : Alto del Carmen
Provincia : Huasco
Región : IIIª Región de Atacama

Deslindes del Lote 2 :

Al norte : Con el Lote 1 (Estancia Chañarcillo) por medio de la divisoria de aguas de la Sierra Alta que separa las cuencas del estero de la Plata (Plata Alta), río de Las Tres Quebradas, río El Toro y río Potrerillos en el Lote 2 con los cauces río Del Toro [1], río del Estrecho, quebrada del Tapado y quebrada Barriales en Lote 1. Además, la divisoria lo separa de la quebrada Pinte, en su parte alta, tributario del río del Tránsito y fuera de los límites de uno de los predios de Nevada.

Al sur y suroeste : El límite está constituido por la línea que divide la Comuna Alto del Carmen, en la Provincia de Huasco (III Región) y la Comuna de Vicuña (IV Región), correspondiente a la divisoria de aguas del río Potrerillo (III Región) y río Del Carmen. Cabe señalar que el río Potrerillos ubicado en la III Región, es una afluente del río Del Carmen, ubicado en su parte más alta en la IV Región, para ser parte de la III Región (aproximadamente 5 km aguas arriba de la Junta del Medio). La Junta del Medio corresponde a la junta de los ríos Del Carmen con el río Potrerillo. En su parte más alta, el río Del Carmen tiene entre los tributarios al río Apolinario.

Al oeste : El límite es el cauce del río del Carmen desde la Junta del medio hasta la Junta del estero Plata Alta con el río Del Carmen.

Al este : Limita con la República de Argentina, en la cabecera del río Potrerillo y río de Las Tres Quebradas.

[1] El río Del Toro (en Lote 1) es un formativo del río Chollay y el Río El Toro es un tributario del río Tres Quebradas (en Lote 2).

Superficie Total

La superficie total, considerando la Estancia Chañarcillo y Estancia de Colorado y Potrerillos, alcanza a 135.066,25 ha, medidos digitalmente, en tanto que la superficie por la cual se solicita el cambio de uso del suelo es de 3.759,7 ha.

D. OBJETIVOS ESPECÍFICOS Y JUSTIFICACIÓN DEL CAMBIO DE USO

El Proyecto Minero Pascua–Lama se ubica en la cordillera de Los Andes, en la zona limítrofe entre la Tercera Región de Chile y la Provincia de San Juan en Argentina, y considera la explotación de dos yacimientos de minerales de oro, plata y cobre, y su beneficio para producir metal doré (oro-plata) y concentrado de cobre. El yacimiento principal sobre el cual basa la operación de este Proyecto se emplaza en territorio chileno y argentino, razón por la cual considera obras y operaciones tanto en Chile como en Argentina.

El Proyecto Pascua-Lama se desarrollará bajo el amparo del Tratado Sobre Integración y Complementación Minera celebrado entre Chile y Argentina, en diciembre de 1997, y el Protocolo Adicional Específico al Tratado Sobre Integración y Complementación Minera, para el Proyecto Pascua-Lama, cuya firma por parte de ambos estados se efectuó el 13 de agosto del 2004. El mismo Protocolo define el área donde son aplicables sus disposiciones, conocida como "Área de Operaciones". En territorio chileno, el Área de Operaciones del Protocolo comprende principalmente las cuencas del Río El Toro y del Río del Estrecho, que es donde se desarrollará la actividad minera del Proyecto.

El área del protocolo en el lado chileno tiene un a extensión total de 38.604,66 ha, de las cuales, 19.534,34 ha se localizan en la Estancia Chañarcillo y 19.070,32 ha en la Estancia de Colorado y Potrerillos.

El área de protocolo queda conformada por los vértices que se muestran en la **Tabla 3** y en la **Lámina 2** (**Apéndice de Láminas**) y cuyas coordenadas son las que se indican a continuación:

Tabla 3
Vértices del área de protocolo en el territorio chileno, según Lámina 2

Vértices	Coordenadas UTM (m)	
	Norte	Este
1	6.770.000,00	Límite con Argentina
2	6.770.000,00	391.000,00
3	6.756.000,00	391.000,00
4	6.756.000,00	382.700,00
5	6.745.000,00	382.700,00
6	6.745.000,00	391.000,00
7	6.748.000,00	391.000,00
8	6.748.000,00	Límite con Argentina

Datum Sudamérica Prov. 56 Huso 19

El sector por el cual se solicita el Cambio de Uso del Suelo, se localiza al interior del Área de Protocolo. Su ubicación se observa en la **Lámina 2**.

El Proyecto Pascua-Lama lo desarrollan tres empresas. Una de ellas es la Compañía Minera Nevada Ltda. (CMN), dueña de las propiedades mineras que conforman el Proyecto Pascua-Lama en Chile. En el lado argentino son dueñas de las propiedades mineras que conforman el Proyecto Pascua-Lama en Argentina Barrick Exploraciones Argentina S.A. (BEASA) y Exploraciones Mineras Argentinas S.A. (EMA). Las tres empresas son filiales indirectas de Barrick Gold Corporation (Barrick), cuya casa matriz se ubica en la ciudad de Toronto, Canadá.

El proyecto contempla una producción de oro en torno a un rango de 675.000 a 700.000 onzas/año, alcanzando posteriormente una producción máxima estimada entre 750.000 a 775.000 onzas/año, a partir del sexto año. La producción de plata alcanzará un rango de 24 a 25 millones de onzas/año, durante los primeros años, para llegar a un máximo en torno a los 30 M de onzas por año.

La vida útil, de acuerdo al plan minero actualizado, se estima en 20 años, aún cuando el período de explotación del rajo alcanzaría entre 17 y 18 años. La planta de procesos operará por el período de 20 años.

El yacimiento principal se emplaza en territorio chileno y argentino, por lo cual se consideran obras y operaciones tanto en Chile como en Argentina. La solicitud de cambio de uso del suelo se solicita por dos lotes que se localizan en el territorio chileno, limítrofe con el territorio argentino, anteriormente individualizados.

En el lado chileno se contempla un conjunto de actividades operacionales que incluyen para ello las siguientes obras (algunas de las obras se extienden hacia el lado argentino):

- Rajo de la mina
- Depósito de estériles
- Sistema de recolección, manejo y tratamiento de drenaje ácido del botadero de estériles
- Chancador primario de mineral
- Sistema de transporte de mineral hacia Argentina (correa transportadora)

- Instalaciones auxiliares y talleres de mantención y reparación de equipos y vehículos (incluyen sala de cambio de personal, comedor, campamento, sala de primeros auxilios, bodegas de almacenamiento de materiales, talleres de soldadura, polvorín, caseta de control de paso internacional, oficinas, sala de primeros auxilios, sistema de distribución de aguas y energía, sistema de acopio temporal de residuos sólidos, planta de tratamiento de aguas servidas, caminos internos, aeródromo).
- Estanques de almacenamiento de combustible (gasolina y petróleo diesel)

El Proyecto Pascua – Lama fue aprobado ambientalmente por medio de la Resolución Exenta N°039/2001. En diciembre del año 2004 se sometieron a evaluación ambiental modificaciones al proyecto aprobado el año 2001, entre las cueles se incluye un campamento permanente en el lado chileno (el que contará con planta potabilizadora y planta de tratamiento de aguas servidas), un aumento en la tasa de extracción de mineral, entre otras.

El sector a desafectar tiene una superficie total de 3.759,7 ha. En la **Lámina 2** se muestra la relación del área de cambio de uso de suelo con el área predial y con el área de protocolo, mientras que en la **Lámina 3** se presenta en mayor detalle el área a desafectar, mientras que en la **Lámina 4** se observan las unidades de suelos. Los vértices del área a desafectar son los que se indican a continuación, en la **Tabla 4**.

Tabla 4
Vértices del Área por la cual se Solicita el Cambio de Uso del Suelo, Según Lámina 3

Vértices	Coordenadas UTM (m)	
	Norte	Este
A	Límite con Argentina	Límite con Argentina
B	6.758.989	399.745
C	6.760.233	399.747
D	6.765.344	394.349
E	6.764.000	393.000
F	6.760.620	396.232
G	6.755.079	396.236
H	6.755.079	Límite con Argentina

Datum Sudamérica Prov. 56 Huso 19

Al interior del polígono definido por las coordenadas señaladas, se encuentran áreas de vegas que no serán intervenidas (54,98 ha), superficie que ha sido descontada del área total a desafectar.

E. INDIVIDUALIZACIÓN DE LOS LOTES EN QUE SE PROYECTA DIVIDIR EL PREDIO, CON SINGULARIZACIÓN DE SUS DESLINDES PARTICULARES

No se proyecta subdividir el predio.

E. FIRMA DEL PROPIETARIO O SU REPRESENTANTE LEGAL.

Derek Riehm RUT 21.624.090-1	Laura Emery RUT 14.598.411-4

Fecha:……..

Santiago, 13 de Enero de 2006

SR.
SECRETARIO REGIONAL MINISTERIAL
DE AGRICULTURA
III REGION
PRESENTE

Compañía Minera Nevada Ltda., domiciliada para estos efectos en Ricardo Lyon 222, Piso 11, Comuna de Providencia, Santiago, Fono (2) 340 2022, representada por Derek Riehm, RUT 21.624.090-1 y Laura Emery , RUT 14.598.411-4, ambos con domicilio en Ricardo Lyon 222, Piso 11, Comuna de Providencia, Santiago; al Sr. Director Regional solicitan:

Según consta de los antecedentes que se acompañan, Compañía Minera Nevada es propietaria de los predios:

LOTE 1

Nombre	ESTANCIA CHAÑARCILLO
Número Rol avalúo SII	903–015 Comuna Alto del Carmen
Superficie física predial afecta a impuesto SII	9.950 ha
Superficie física predial planimetría	48.801,41 ha
Inscripción Conservador de Bienes Raíces	Vallenar Fs. 215; Nº 188; Año 1999

Deslindes del Lote 1 :

Al norte : Con el río Chollay y las divisorias del río Pachuy con la quebrada Chañarcillo.

Al sur y suroeste : Con el Lote 2, por medio de la divisoria de aguas del río Del Toro y quebrada Barriales (ambos al norte de la divisoria), con el río de Las Tres Quebradas (al sur)

Al oeste : Con parte del Lote 2 y los tributarios del río Del Tránsito, quebrada Pinte y quebrada La Plata, en sus cabeceras, donde el deslinde corresponde a la divisoria de aguas de estas quebradas con tributarios que se encuentran a la izquierda del río Chollay.

Al poniente : El límite fronterizo con la República de Argentina, en la cabecera del río Blanco, río Del Estrecho y quebrada Barriales.

LOTE 2

Nombre	ESTANCIA DE COLORADO Y POTRERILLOS
Número Rol avalúo SII	930–009 Comuna Alto del Carmen
Superficie física predial afecta a impuesto SII	5.080 ha
Superficie física predial planimetría	86.265,11 ha
Inscripción Conservador de Bienes Raíces	Vallenar Fs. 285; Nº 272; Año 2002

Deslindes del Lote 2 :

Al norte : Con el Lote 1 (Estancia Chañarcillo) por medio de la divisoria de aguas de la Sierra Alta que separa las cuencas del estero de la Plata (Plata Alta), río de Las Tres Quebradas, río El Toro y río Potrerillos en el Lote 2 con los cauces río Del Toro, río del Estrecho, quebrada del Tapado y quebrada Barriales en Lote 1. Además, la divisoria lo separa de la quebrada Pinte, en su parte alta, tributario del río del Tránsito y fuera de los límites de uno de los predios de Nevada.

Al sur y suroeste : El límite está constituido por la línea que divide la Comuna Alto del Carmen, en la Provincia de Huasco (III Región) y la Comuna de Vicuña (IV Región), correspondiente a la divisoria de aguas del río Potrerillo (III Región) y río Del Carmen. Cabe señalar que el río Potrerillos ubicado en la III Región, es una afluente del río Del Carmen, ubicado en su parte más alta en la IV Región, para ser parte de la III Región (aproximadamente 5 km aguas arriba de la Junta del Medio). La Junta del Medio corresponde a la junta de los ríos Del Carmen con el río Potrerillo. En su parte más alta, el río Del Carmen tiene entre los tributarios al río Apolinario.

Al oeste : El límite es el cauce del río del Carmen desde la Junta del medio hasta la Junta del estero Plata Alta con el río Del Carmen.

Al este : Limita con la República de Argentina, en la cabecera del río Potrerillo y río de Las Tres Quebradas.

Es del caso que deseo cambiar el uso del suelo de mi predio con el objeto de destinarlo a infraestructura minera, razón por la cual solicito su autorización.

Las propiedades no cuenta con**:** urbanización mínima, luz, agua potable, alcantarillado, alejada del radio urbano de la Comuna de Alto del Carmen.

Para estos efectos se acompaña:

1. Copia autorizada de la Inscripción de Dominio

    1.1 Estancia Chañarcillo: Otorgado por Notario y Conservador de Bienes Raíces (suplente) de Vallenar el 20 de julio de 2005.

    1.2 Estancia Los Colorados y Potrerillos: Otorgado por Notario y Conservador de Bienes Raíces (suplente) de Vallenar el 20 de julio de 2005.

2. Copia autorizada de la escritura social y de la inscripción correspondiente

    Se adjunta:

    2.1 Escritura Pública "Transformación Sociedad Compañía Minera Nevada S.A. a Compañía Minera Nevada Limitada", Repertorio N° 4875-2000 de fecha 03 de octubre de 2000.

    2.2 Escritura Pública "Protocolización Extracto Transformación de Sociedad Compañía Minera Nevada S.A. en Compañía Minera Nevada Limitada" Repertorio N° 5.147-2000 de fecha 17 de octubre de 2000.

    2.3 Al reverso del Extracto se indica la Inscripción de la Sociedad en el Registro de Comercio: fs. 26.765 N° 21.186 de fecha 10 de octubre de 2000.

    2.4 Se adjunta Certificado que acredita que el Extracto fue publicado en el Diario Oficial de fecha 17 de octubre de 2000. Fotocopia legalizada de fecha 31 de octubre de 2000.

3. Copia de Poder del Representante Legal

    3.1 Se adjunta Escritura Pública de "Reducción Acta Compañía Minera Nevada Limitada", Repertorio N° 6.040-2004, de fecha 30 de noviembre de 2004, la que en el punto Cuarto señala que se otorga poder a Derek Riehm y Laura Emery para concurrir ante toda clase de autoridades del Gobierno de Chile y servicio público para realizar trámites o presentar solicitudes de todo orden.

4. Certificado de Avalúo con Clasificación de Suelos extendido por el Servicio de Impuestos Internos

    4.1 Chañarcillo Chollay.

    4.2 Los Colorados y Potrerillos.

5. Certificado de Ruralidad

    5.1 Estancia Chañarcillo: Otorgado por la Dirección de Obras Municipales (DOM) de Alto del Carmen, acreditando que el predio se encuentra en zona rural (fuera de los límites urbanos). Fecha de extensión 25 de julio de 2005.

    5.2 Estancia Los Colorados y Potrerillos: Otorgado por la Dirección de Obras Municipales (DOM) de Alto del Carmen, acreditando que el predio se encuentra en zona rural (fuera de los límites urbanos). Fecha de extensión 25 de julio de 2005.

6. Memoria Técnica Agronómica

La Memoria Técnica Agronómica incluye el Plano con el "Proyecto de Cambio de Uso" y otros referidos a condiciones ambientales y de infraestructura.

Los mapas se presentan a escala señalada, georreferenciados con coordenadas referidas al Datum Sudamérica Prov. 56 Huso 19.

Los mapas se muestran debidamente acotados en todos sus deslindes o con indicación de vértices y el punto de acceso desde camino público, según corresponda.

Los mapas, por ser temáticos se han designado con el nombre de láminas y se encuentran basados en las Cartas del Instituto Geográfico Militar a escala 1:50.000.

La base cartográfica corresponde a las cartas del Instituto Geográfico Militar a escala 1:50.000:

- Río de Las Tres Quebradas (2915 – 6955)
- Río Chollay (2900 – 7000)

Las cartas topográficas comprenden curvas de nivel con equidistancia de 50 m.

A continuación, en la Tabla siguiente, se indica el listado de Láminas que se incluyen en el Apéndice respectivo, que son parte de la presente solicitud de cambio de uso del suelo:

Listado de Láminas Contenidas en la Solicitud de Cambio de Uso del Suelo

Lámina	Nombre	Escala	Contiene
1	Ubicación general del proyecto y cuencas hidrográficas de la parte alta del río Huasco	1:600.000	- Localización del proyecto en la cuenca del río Huasco - Rutas de acceso - Principales centros urbanos y localidades - Cuencas hidrográficas río del Carmen y río Del Tránsito y principales formativos de estos
2	Estancias sector Pascua	1:250.000	- Delimitación predial de la Estancia Chañarcillo y Estancia de Colorado y Potrerillos - Área de Protocolo - Sector a desafectar
3	Obras del Proyecto y su relación con el área a desafectar	1:20.000	- Área a desafectar - Obras del proyecto
4	Unidades de Suelo en el Área de Cambio de Uso del Suelo	1:50.000	- Unidades de suelo para el polígono por el cual se solicita el cambio de uso de suelo
5	Vegetación Río del Estrecho	1:60.000	- Pisos vegetacionales cuenca del río del Estrecho
6	Carta de Ocupación de Tierras	1:50.000	- Unidades vegetacionales
7	Especies Florísticas con Problemas de Conservación	1:60.000	- Pisos vegetacionales - Localización de poblaciones de especies con problema de conservación - Localización de *Chaetanthera acheno-hirsuta*, especie
8	Vegas y su Relación con el Proyecto	1:40.000	- Vegas andinas - Áreas de intervención del Proyecto
9	Sitios de Muestreo de Fauna	1:125.000	- Sitios entorno a los cuales se realizaron los transectos de herpetozoos (reptiles y anfibios)

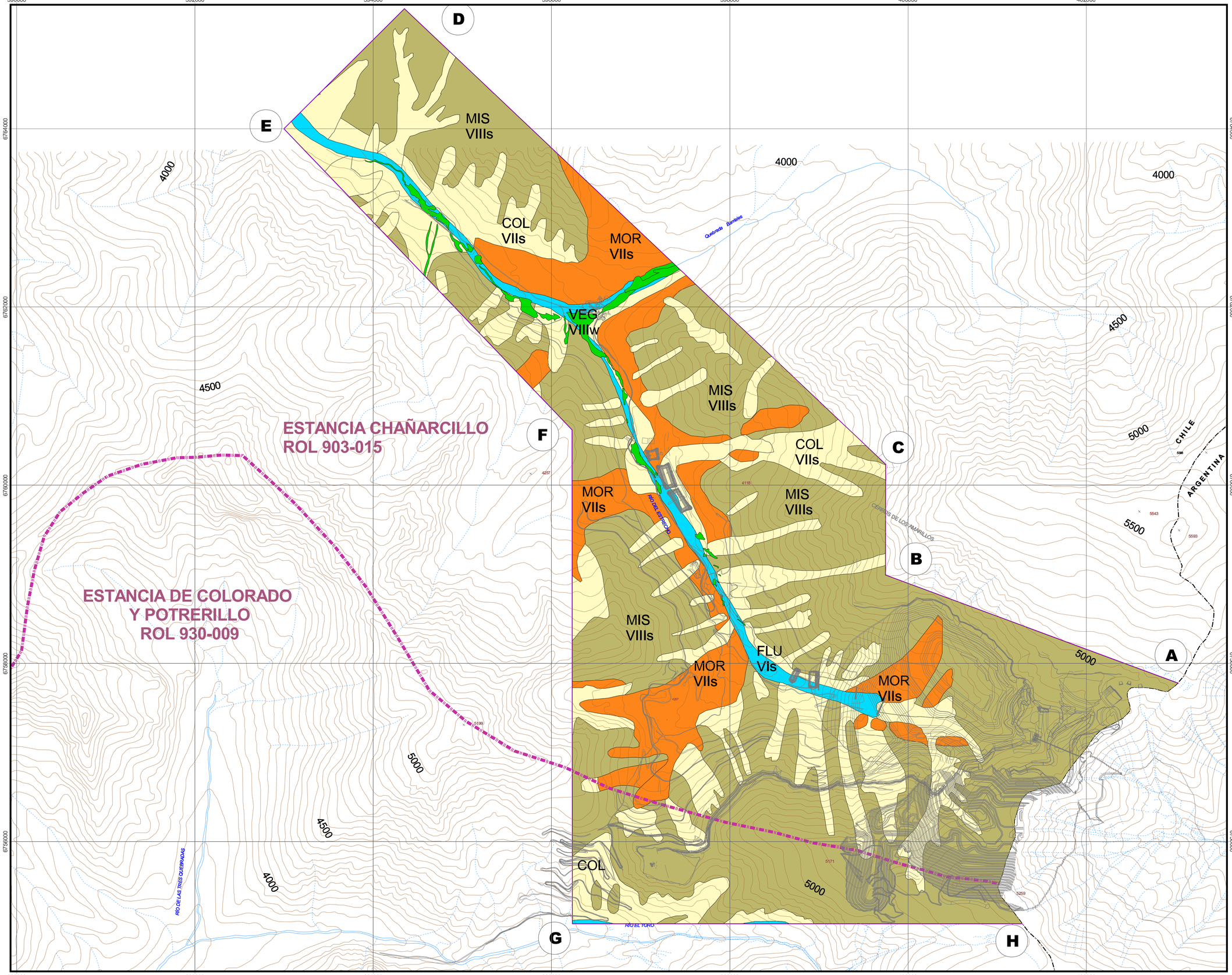
POR TANTO,

Solicitamos AUTORIZACIÓN PARA CAMBIAR EL USO DEL SUELO de los predios señalados, ubicados en la localidad de Pascua, Comuna de Alto del Carmen, con el objeto de destinarlos a uso minero.

Se despide atentamente de Ud.

Derek Riehm
RUT 21.624.090-1

Laura Emery
RUT 14.598.411-4



LEYENDA BASE TOPOGRÁFICA

- Curvas de nivel
- Cursos de agua existentes
- Caminos
- Límite Internacional
- Instalaciones del Proyecto

Nota: El trazado del límite internacional no es oficial.

CUADRO DE VÉRTICES

VERTICE	COORDENADAS UTM (METROS) NORTE	ESTE
A	*	*
B	N 6.758.989	E 399.745
C	N 6.760.233	E 399.747
D	N 6.765.344	E 394.349
E	N 6.764.000	E 393.000
F	N 6.760.620	E 396.232
G	N 6.755.079	E 396.236
H	N 6.755.079	*

* Corresponde al límite internacional con Argentina.

AREA A DESAFECTAR

NOTA: Se exceptúa del cambio de uso del suelo el alveo o cauce natural.

LEYENDA TEMÁTICA

- SUELOS COLUVIO - ALUVIALES DE LOS VALLES DE ALTURA (COL)
- SUELOS MORRÉNICOS ANDINOS (MOR) Morrenas retrabajadas Y depósitos glaciales
- SUELOS ALUVIALES DE LOS VALLES ANDINOS DE ALTURA
  - Suelos de vega (VEG)
  - Suelos fluviales (FLU)
- SUELOS MISCELÁNEOS (MIS)
- Límites Estancias

400 m 0 400 800 1200 m

1:20000

PROYECCION UNIVERSAL TRANSVERSAL DE MERCATOR

N

Rep. Legal : Laura Emery
Rut: 14.598.411-4

Rep. Legal : Derek Riehm
Rut: 21.624.090-1

Profesional : Mario Urra S.
Rut: 5.786.915-1
Agrónomo I.C.I.A. nº 3.706
Ms. Medio Ambiente

ÁREA CAMBIO DE USO DEL SUELO

LAMINA 3

ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL
PROYECTO MODIFICACIÓN PASCUA LAMA

BARRICK

ARCADIS GEOTECNICA

Autor :
Dibujo : J. Moraga

Fecha : Octubre 2005

274\Especialidad\ Cambio uso suelo\ Lamina 3.apr

PISCINAS PARA LODOS

PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA

NE-2a

PISCINA DE PULIDO

CANAL DE DERIVACION

N 6760000

PISCINAS DE ALMACENAMIENTO DE AGUA DE CONTACTO (FIG.5-9)

TUBERIA HACIA PISCINAS DE ALMACENAMIENTO DE AGUA DE CONTACTO (FIG.5-9)

Río del Estrecho

PISCINA DE SEDIMENTACION NORTE (FIG.4-5)

NE-5

ZANJA CORTAFUGA Y TUBERIA DE DRENAJE (FIG.5-7)

ZANJA DE DRENAJE DE PIE (FIG.5-7)

CANAL PERIMETRAL NORTE TRAMO INFERIOR (FIG.4-1)

GLACIAR ESTRECHO

LIMITE BOTADERO DE ESTERIL AL AÑO 5

LIMITE ULTIMO DE BOTADERO DE ESTERIL AL AÑO 11

CANAL PERIMETRAL NORTE TRAMO SUPERIOR (FIG.4-1)

PISCINA DE AGUA DE CONTACTO DE LOS ACOPIOS DE MINERAL (FIG.5-1)

LIMITE DE LOS ACOPIOS DE MINERAL

SISTEMA AUXILIAR DE POZOS DE CONTINGENCIA Y MONITOREO

CANAL DE CONEXION (FIG.5-7)

LIMITE BOTADERO DE ESTERIL AL AÑO 2

ZANJAS COLECTORAS Y POZOS POR ETAPAS (FIG.5-5)

CANAL DE RECOLECCION DE LAS PILAS DE ACOPIO DE MINERAL (FIG.5-1)

LIMITE ULTIMO BOTADERO DE ESTERIL

CAMINO DE ACCESO SUR

AREA DE CHANCADO

PISCINA DE SEDIMENTACION SUR (FIG.4-5)

TUBERIA

CANAL PERIMETRAL SUR (FIG.4-1)

LIMITE ULTIMO DEL RAJO

RAJO PASCUA

RAJO ESPERANZA

GLACIAR ESPERANZA

Quebrada La Olla

Quebrada Amarilla

Quebrada Pedro

Nevado

N 6758000

N 6756000

LEYENDA:

- CURVAS DE NIVEL
- DRENAJE PRIMARIO
- DRENAJE SECUNDARIO
- GLACIAR
- ESTACION FLUVIOMETRICA CMN
- LIMITE DE CUENCA
- CANAL PERIMETRAL
- TUBERIA
- TUBERIA DE AGUA DE CONTACTO
- CANAL DE COLECCION DE AGUA DE CONTACTO
- LIMITE ULTIMO DE RAJO
- LIMITE INTERNACIONAL
- CAMINOS DE ACCESO
- ZANJA COLECTORA DE AGUA DE CONTACTO
- POZOS DE RECOLECCION Y MONITOREO DE AGUA SUBTERRANEA
- POZOS DE ALIVIO
- ENTRADA CANALES (FIG. 4-3)
- OBRA INTERMEDIA (FIG. 4-3)
- DESCARGA CANAL (FIG.4-4)

DESCRIPCION	AREA (Km^2)
ESTACION NE-5	15,5
ESTACION NE-2a	33,6

ZANJA DE COLECCION

POZOS DE MINITOREO	PERIODO DE USO (AÑOS)
①	0 HASTA FIN DE AÑO 2
②	0 HASTA FIN DE AÑO 5
③	5 HASTA FIN DE AÑO 11
TUBERIA DE DRENAJE	0 HASTA POST-CIERRE

PLANTA GENERAL

ESCALA 1:20.000

200 100 0 100 200

ESCALA 1:20.000

NOTAS :
- TOPOGRAFIA PROPORCIONADA POR COMPAÑIA MINERA NEVADA, RESTITUCION 2m.
- PROYECCION UTM SAD 56 ZONA 19

Golder Associates — Compañía Minera Nevada — BARRICK

PROYECTO PASCUA LAMA

SISTEMA DE MANEJO DE AGUAS PARA OPERACIONES

PLANO	DIBUJO	APROBO
FIGURA 3-1	G. VERGARA	D.J.M.
PROYECTO N° 059-2701 / FECHA OCTUBRE. 2005	DISEÑO T. JONES	ESCALA 1: 20.000

PISCINAS PARA LODOS

PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA

NE-2a

PISCINA DE PULIDO

CANAL DE DERIVACION

PISCINA DE ALMACENAMIENTO DE AGUA DE CONTACTO (FIG.5-9)

TUBERIA HACIA PISCINAS DE ALMACENAMIENTO DE AGUA DE CONTACTO (FIG.5-9)

Río del Estrecho

NE-5

LIMITE ULTIMO BOTADERO DE ESTERIL

SISTEMA AUXILIAR DE POZOS DE CONTINGENCIA Y MONITOREO

ZANJA CORTAFUGA Y TUBERIA DE DRENAJE (FIG.5-7)

CANAL DE CONEXION (FIG.5-7)

ZANJA DE DRENAJE DE PIE (FIG.5-7)

ZANJAS COLECTORAS Y POZOS ENTERRADOS

CANAL PERIMETRAL SUR (FIG.4-2)

CAMINO DE ACCESO SUR

CANAL PERIMETRAL NORTE SECCION 2 (FIG.4-2)

GLACIAR ESTRECHO

CANAL PERIMETRAL NORTE SECCION 1 (FIG.4-2)

LIMITE ULTIMO DEL RAJO

RAJO PASCUA

RAJO ESPERANZA

GLACIAR ESPERANZA

Quebrada La Olla

Quebrada Nevada

Quebrada Amarilla

Quebrada Pedro

Q1 Q2 Q3 Q4 Q5

N 6760000

N 6758000

N 6756000

N W E S

LEYENDA:

- CURVAS DE NIVEL
- DRENAJE PRIMARIO
- DRENAJE SECUNDARIO
- GLACIAR
- ESTACION FLUVIOMETRICA CMN
- LIMITE DE CUENCA
- CANAL PERIMETRAL
- TUBERIA DE AGUA DE CONTACTO
- LIMITE ULTIMO DE RAJO
- LIMITE INTERNACIONAL
- CAMINOS DE ACCESO
- POZOS DE RECOLECCION Y MONITOREO DE AGUA SUBTERRANEA
- POZOS DE ALIVIO

DESCRIPCION	AREA (Km2)
ESTACION NE-5	15,5
ESTACION NE-2a	33,6

PLANTA GENERAL

ESCALA 1:20.000

200 100 0 100 200

ESCALA 1:20.000

NOTAS :
- TOPOGRAFIA PROPORCIONADA POR COMPAÑIA MINERA NEVADA, RESTITUCION 2m.
- PROYECCION UTM SAD 56 ZONA 19

Golder Associates — Compañía Minera Nevada — BARRICK

PROYECTO PASCUA LAMA

SISTEMA DE MANEJO DE AGUAS PARA EL CIERRE

PLANO		DIBUJO	APROBO
FIGURA 3-2		G. VERGARA	D.J.M.
N° PROYECTO	FECHA	DISEÑO	ESCALA
059-2701	OCTUBRE, 2005	T.JONES	1: 20.000