

**ESTUDIO DE INVERSION EN PASCUA LAMA**

**MODELACION PREDICTIVA DE LA  
GEOQUIMICA DE LAS FILTRACIONES DE  
LAS INSTALACIONES DE ROCA ESTERIL**

# **ESTUDIO DE INVERSION EN PASCUA LAMA**

## **MODELACION PREDICTIVA DE LA GEOQUIMICA DE LAS FILTRACIONES DE LAS INSTALACIONES DE ROCA ESTERIL**

**Agosto de 2004**

3301/R3

Preparado para:

Barrick  
Av Ricardo Lyon 222, Piso 11  
Providencia, Santiago  
Chile

Preparado por:

Water Management Consultants Ltda  
Alcantara 44, Piso 3  
Las Condes, Santiago  
Chile

## CONTENIDO

---

	Página
<b>1 INTRODUCCION</b>	<b>1</b>
1.1 Antecedentes	1
1.2 Objetivos	1
<b>2 ENTORNO DEL PROYECTO</b>	<b>3</b>
2.1 Ubicación	3
2.2 Geología	3
2.2.1 Geología regional	3
2.2.2 Geología distrital	3
2.2.3 Mineralización y alteración	4
2.3 Geoquímica ambiental	5
2.3.1 Generación de ácidos	5
2.3.2 Estabilización	6
<b>3 DESCRIPCIONES DE LAS ESCOMBRERAS DE ROCA ESTERIL</b>	<b>9</b>
3.1 Ubicación y capacidad	9
3.2 Clasificación y composición de la roca estéril	9
3.3 Configuraciones de las escombreras de roca estéril	11
3.3.1 Escombrera Estrecho	11
3.3.2 Escombrera El Morro	12
<b>4 CARACTERIZACION HIDROLOGICA DE LAS ESCOMBRERAS DE ROCA ESTERIL</b>	<b>13</b>
4.1 Antecedentes	13
4.1.1 Componentes del modelo	14
4.2 Estimación de los volúmenes de descarga desde las escombreras	14
4.2.1 Drenaje	14
4.2.2 Infiltración	15
4.2.3 Resumen del régimen hidrológico de las escombreras	16
4.2.4 Consecuencia de los datos de caudales de las escombreras de roca estéril para el diseño del proyecto	16
4.3 Caracterización de la interacción agua - roca	17
4.3.1 Visión general	17
4.3.2 Granulometría	17
4.3.3 Infiltración y dimensiones de las vías de drenaje	18

<b>5</b>	<b>CARACTERIZACION GEOQUIMICA DE LA ROCA ESTERIL</b>	<b>19</b>
5.1	Fuentes de los datos	19
5.2	Procedimiento para los ensayos de celdas de humedad	20
5.3	Resultados de los ensayos HCT	20
5.3.1	Tendencias de las series cronológicas	20
5.3.2	Normalización de los datos	21
<b>6</b>	<b>MODELACION DE LA QUIMICA DE LAS SOLUCIONES DE LIXIVIACION DE LAS INSTALACIONES</b>	<b>23</b>
6.1	Conceptualización	23
6.2	Mezcla en equilibrio de masa	23
6.2.1	Metodología	23
6.2.2	Escenarios modelados	24
6.2.3	Resultados	24
6.3	Restricciones termodinámicas	25
6.3.1	Metodología	25
6.3.2	Equilibrio de las fases gaseosas y sólidas	29
6.3.3	Resultados de PHREEQC	29
6.3.4	Efectos de la sorción	35
6.4	Consecuencias de los resultados del modelo geoquímico	35
6.4.1	Visión general	35
6.4.2	Vida útil inicial de la mina	35
6.4.3	Etapas finales de la vida útil de la mina y post-cese	36
6.5	Consideraciones adicionales en la interpretación de los datos de las filtraciones desde las instalaciones	38

<b>TABLAS</b>	<b>Página</b>
2.1	Concentraciones de sulfuro y sulfato en los conjuntos de alteración de Pascua Lama (SRK, 2000)
	6
3.1	Sistema de clasificación de la litología-alteración de la roca de Pascua Lama
	10
3.2	Tonelajes que se entregarán a las escombreras de roca estéril de Pascua, clasificados según el conjunto de alteración
	11
3.3	Areas de las huellas de las escombreras Estrecho y El Morro
	12
4.1	Drenaje y volúmenes de infiltración rápida (l/s) pronosticados para las escombreras Estrecho y El Morro
	15
4.2	Area transversal/longitudinal de los canales de drenaje
	18
4.3	Area/longitud de los canales de infiltración rápida
	18
5.1	Base de datos de los ensayos geoambientales para el proyecto Pascua
	19
5.2	Muestras usadas en los ensayos de celdas de humedad
	20
5.3	Tasas de lixiviación promedio (mg/m <sup>2</sup> /sem) de solutos definidas por los ensayos de HCT de Pascua para grupos de muestras clasificados según el conjunto de alteración (semanas 1 y 21-29)
	22
6.1	Cálculos de la carga química en equilibrio de masa (mg/l) para la escombrera de roca estéril Estrecho (suponiendo una desviación del 70% del drenaje)
	26
6.2	Cálculos de la carga química en equilibrio de masa (mg/l) para la escombrera de roca estéril El Morro
	27

<b>TABLAS (continuación)</b>	<b>Página</b>
6.3 Cálculos de la carga química en equilibrio de masa (mg/l) para la escombrera de roca estéril Estrecho: Años 1-6 (suponiendo una desviación del 70% del drenaje)	28
6.4 Químicas de las filtraciones de PHREEQC (mg/l) para la escombrera Estrecho suponiendo una desviación del 70% del drenaje	30
6.5 Químicas de las filtraciones de PHREEQC (mg/l) para la escombrera El Morro	31
6.6 Químicas de las filtraciones de PHREEQC (mg/l) para la escombrera Estrecho suponiendo una roca estéril compuesta sólo de material calentado por vapor	33
6.7 Precipitación y disolución de los minerales pronosticadas por las simulaciones PHREEQC para las aguas de descarga de las escombreras de roca estéril Estrecho y El Morro	34
6.8 Resumen de las químicas de las filtraciones de las escombreras de roca estéril de Pascua Lama. Los valores para el mejor y el peor de los casos se han extraído de las ejecuciones del modelo adaptadas a una diversidad de condiciones climáticas, intervalos de tiempo para la vida útil de la mina y procesos geoquímicos	37

<b>FIGURAS</b>	<b>Después de la página</b>
1.1 Entorno regional del área del proyecto Pascua Lama	2
3.1 Areas de la huella de las escombreras de roca estéril de Pascua-Lama en el intervalo de tiempo del año 8 de desarrollo de la mina	12
3.2 Tonelajes que se entregarán a las escombreras de roca estéril de Pascua, Clasificados según el conjunto de alteración	12
3.3 Areas de la huella de las escombreras Estrecho y el Morro	12
3.4 Areas de la huella de las escombreras de roca estéril de Pascua-Lama después del cese	12
4.1 Relación entre el área de la huella de las escombreras de roca estéril y el área de captación de aguas arriba, según lo definido por WMC 2000	18
4.2 Relación entre el área de aguas arriba de las escombreras de roca estéril y el volumen de drenaje, según lo definido por WMC 2000 (símbolos abiertos) y 2000a (símbolos cerrados)	18
4.3 Relación entre la infiltración rápida (l/s) y la superficie de las escombreras de roca estéril, según lo definido por WMC (símbolos abiertos) y 2000a (símbolos cerrados)	18
4.4 Análisis de la fragmentación de la roca estéril para el proyecto Veladero (de WMC, 2002)	18
5.1 pH de las series cronológicas para los tipos de alteración de la roca estéril de Pascua	22
5.2 Perfiles de las tasas de lixiviación de SO <sub>4</sub> para los tipos de alteración de la roca estéril de Pascua	22
5.3 Perfiles de las tasas de lixiviación de Fe para los tipos de alteración de la roca estéril de Pascua	22
6.1 Dependencia del pH de la sorción de elementos trazas por hidróxidos de fierro (el rango de pH definido por la modelación PHREEQC de las aguas de las escombreras de roca estéril de Pascua-Lama se indica mediante las líneas verticales cortadas)	38

***ESTA PAGINA HA SIDO DEJADA EN BLANCO INTENCIONALMENTE***

## 1 INTRODUCCION

---

### 1.1 Antecedentes

Pascua Lama es un yacimiento de oro de primera clase ubicado en el límite de los altos Andes entre Chile Central y Argentina (Figura 1.1). En 2003, Barrick inició un Estudio de Inversión para determinar la factibilidad de la explotación del yacimiento. El plan de desarrollo de la mina para el 'caso base' contempla una única operación a rajo abierto, con escombreras de roca estéril emplazados en la cabecera del Río del Estrecho (Chile) y el sistema El Morro – Turbio (Argentina). Se instalará un depósito de colas en el sector bajo del valle del Turbio en Argentina.

### 1.2 Objetivos

El volumen y composición química de la descarga (escorrentía y/o filtración basal) de las escombreras de roca estéril de Pascua-Lama probablemente constituyan un factor importante en los costos de inversión de capital, operación y post-cese del proyecto. Basándose en la geología del yacimiento Pascua, se considera que la generación de aguas de contacto de bajo pH en las escombreras de roca estéril es inevitable. Se requieren predicciones confiables del volumen preciso, la carga de contaminantes y los impactos potenciales aguas abajo de estas aguas de contacto para definir las responsabilidades ambientales a largo plazo asociadas con el drenaje ácido de roca (DAR) derivado de las escombreras de roca estéril de Pascua y para el diseño de una estrategia de mitigación de impactos apropiada.

En enero de 2004, Water Management Consultants (WMC) fue contratada para llevar a cabo una modelación hidrogeoquímica de las escombreras de roca estéril de Pascua-Lama, basándose en las especificaciones de diseño de las escombreras provistas por SNC Lavalin (28 de enero de 2004). La metodología y resultados de este ejercicio de modelación constituyen los principales aspectos de este informe.

Los principales objetivos del ejercicio de modelación de WMC son los siguientes:

- 1) Afinamiento de los modelos hidrológicos preexistentes de la infiltración a largo plazo y la dinámica de las filtraciones para las escombreras de roca estéril de Pascua Lama (WMC, 1999; 2000) para cumplir con las configuraciones específicas de las instalaciones definidas por SNC Lavalin (28 de enero de 2004).

- 2) Aplicación de los resultados del modelo hidrológico para determinar la capacidad de almacenamiento y los criterios de descarga de efluentes a las piletas de captación/evaporación de DAR aguas abajo para la escombrera Estrecho.
- 3) Desarrollo de un modelo geológico/composicional de cada escombrera de roca estéril de Pascua y estimación de las cargas químicas móviles que se producirán probablemente por efecto de la meteorización de los conjuntos de roca estéril en intervalos de tiempo seleccionados durante la vida útil de la mina.
- 4) Modelación de la interacción entre el agua que se infiltra y la carga química móvil en cada escombrera y predicción de la química de las filtraciones resultantes.
- 5) Obtención de una gama de datos de los químicos de las filtraciones para el mejor y el peor de los casos, para ser utilizados por Barrick (y los consultores designados) en el diseño de la planta de tratamiento de aguas ácidas (AWTP) para las escombreras de roca estéril Estrecho y El Morro.
- 6) Aplicación de un modelo de mezcla en planilla de cálculo con el fin de evaluar los probables impactos sobre la calidad del drenaje superficial aguas abajo de la captación asociados a la descarga de agua de las filtraciones tratada en la AWTP.

En este informe técnico se detallan los resultados de las investigaciones de WMC en el contexto de los objetivos 1 – 5 descritos más arriba. Los resultados de un análisis preliminar de los impactos aguas abajo se informan en un Memorándum Técnico independiente de WMC.





## 2 ENTORNO DEL PROYECTO

---

### 2.1 Ubicación

La propiedad de Pascua-Lama se encuentra ubicada en el límite entre la IV Región de Chile y la provincia argentina de San Juan. La propiedad se extiende a cotas de entre 3.800 y 5.200 m (Figura 1.1). El sector propuesto para el rajo Pascua separa un interfluvio principal. La descarga desde las principales instalaciones mineras llegará a ambos lados de esta divisoria. Al oeste, la cuenca del Estrecho recibirá descarga desde la escombrera Estrecho. Al este, la cuenca del Turbio (un tributario del Río de las Taguas) recibirá toda la descarga proveniente de la escombrera El Morro. Durante la vida útil de la mina, sin embargo, las filtraciones desde la escombrera El Morro llegarán al depósito de almacenamiento de colas de Pascua Lama. Esta instalación se diseñará como un sistema de 'contención total' y, por lo tanto, los impactos de las filtraciones desde las escombreras de roca estéril en el sistema de drenaje del Turbio, probablemente sólo se producirán después del cese de la mina.

### 2.2 Geología

#### 2.2.1 Geología regional

Pascua-Lama se ubica en el sector norte del Cinturón de El Indio, una provincia metalogénica distintiva con dirección N-S, que traspasa los Andes de Chile Central y Argentina. El cinturón evolucionó en una cuenca volcánica terciaria que fue penetrada por numerosas intrusiones de rocas ígneas y complejos subvolcánicos y que actualmente está rellena por una serie de flujos volcánicos. La estructura del Cinturón de El Indio está dominada por conjuntos de fallas y fracturas compresivas con tendencia N-S y por fallas extensionales con tendencia E-O. Las intersecciones de estas estructuras formaron puntos focales para el emplazamiento de intrusiones de rocas ígneas y subvolcánicas y para la circulación de los fluidos hidrotermales metalíferos.

#### 2.2.2 Geología distrital

El yacimiento de Au-Ag-Cu de Pascua Lama está alojado en un entorno local definido por eventos intrusivos, subvolcánicos y eruptivos sucesivos del Paleozoico Superior al Terciario Superior. La unidad más antigua mineralizada del área del yacimiento es un flujo de ceniza ácido (dacita-riolita) del Pérmico, en el cual penetró un plutón extensivo, el Complejo Granitoide de Pascua Lama, en el Triásico.

Este conjunto de litologías granitoides forma el principal huésped para el sistema de alta sulfuración de Pascua Lama. En el Oligoceno, se emplazaron una serie de intrusiones de rocas ígneas de diorita, seguidas en el Mioceno por una gran cantidad de diques y finalmente la depositación de flujos de ceniza dacítica. La actividad hidrotermal mineralizadora siguió a la depositación de estos flujos de ceniza alrededor de 8–9 Ma.

### 2.2.3 Mineralización y alteración

En Pascua Lama, la mineralización está controlada por una serie de fallas de gran ángulo y, en particular, por sus intersecciones. La mineralización se produjo en varios centros discretos (cada uno asociado a un conducto de fluido hidrotermal estructural), más específicamente la Brecha Central, Brecha Pedro, Frontera, Esperanza Norte, Seis Esquinas, Brecha Sur, Central Norte y Esperanza Sur. Estos centros de mineralización se unen en gran medida, formando un 'núcleo' mineralizado más o menos continuo. Algunos centros, incluyendo la Brecha Central, están asociados a pipas de brecha hidrotermal multifásica estructuralmente confinadas. Estas se interpretan como un producto de la actividad freatomagmática explosiva durante las etapas de declinación del volcanismo mioceno.

Pascua-Lama puede considerarse como un sistema epitermal clásico de alta sulfuración, caracterizado por una serie hipogénica de sulfuros y sulfatos. La mineralización de sulfuro constituye el 20-50% de la zona mineralizada y la roca de caja alterada, con hasta un 50% del conjunto de sulfuro compuesto de pirita y tetrahidrita-tenantita (SRK, 1999). El yacimiento muestra evidencia de fases de alteración sucesivas, tanto con depositación concomitante de metales preciosos como sin ella. La alteración argílica avanzada inicial estuvo caracterizada predominantemente por cuarzo-alunita-pirita. Este evento inicial fue seguido de brechización y, posteriormente, una segunda etapa de alteración argílica avanzada caracterizada por alunita-pirita-enargita. Esta se yuxtapuso a gran parte de la zona preexistente de alteración de cuarzo-alunita-pirita.

El núcleo yuxtapuesto del sistema de Pascua Lama va variando su composición hacia fuera hasta una zona de alteración argílica más débil y finalmente propilítica. Gran parte de la zona de alteración argílica avanzada se extiende bajo una capa de sílice, cuyo espesor varía de 100 a 300 m. La alteración calentada por vapor predomina en una zona elongada con dirección E-O en la superficie del sistema, centrado en la Brecha Central. Las áreas de alteración calentada por vapor están tipificadas por un bajo contenido de alunita y hasta varios porcentajes de S nativo.

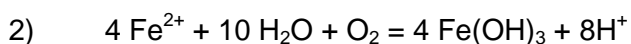
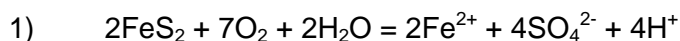
La mineralización aurífera ocurrió preferentemente en las zonas de silicificación intensa. La mineralogía de la ganga en estas zonas se encuentra dominada por fases de alteración, quedando pocos minerales huéspedes primarios. Los minerales de ganga abundantes incluyen el cuarzo, la alunita, la caolinita, la illita, la smectita, la diquita, la pirofilita y la jarosita.

## 2.3 Geoquímica ambiental

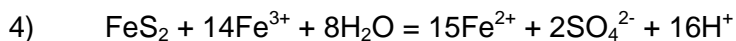
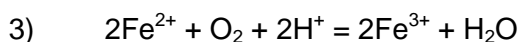
Pascua Lama se distingue de los demás sistemas epitermales de alta sulfuración, por una abundancia inusual tanto de sulfatos magmáticos primarios (por ejemplo, szomolnokita) como de minerales sulfatados hipogénicos (por ejemplo, coquimbita, volteita, alunita, jarosita), varios de los cuales son de alta solubilidad. Esto tiene importantes consecuencias para la geología ambiental del yacimiento. Dentro del contexto específico de las filtraciones de las escombreras de roca estéril, es probable que la evolución química de las aguas de contacto esté controlada por una compleja gama de procesos que incluyen la oxidación de los sulfuros y la disolución de los sulfatos. Si bien estos dos grupos de procesos generalmente constituyen reacciones que generan protones, la meteorización de los minerales tales como la alunita puede provocar una importante reacción de estabilización (manteniendo el pH en alrededor de 3,5) en los conjuntos que contienen pirita y carecen de estabilizadores más eficaces tales como los carbonatos o los hidróxidos de Fe.

### 2.3.1 Generación de ácidos

La oxidación de los sulfuros formará indudablemente la principal reacción de generación de ácidos en la roca estéril de Pascua Lama. En ausencia de fases de estabilización, estas reacciones deprimirán el pH de las filtraciones de las instalaciones a <pH 2. Se ha observado una depresión del pH relativamente incontrolada en las soluciones de lixiviación de los ensayos de 'crib' en terreno a partir de la roca estéril de Pascua-Lama (valores de pH entre 1,6 y 2,3) y aparece como particularmente característica de aquellos conjuntos que contienen abundancia de minerales sulfurosos/sulfatados en matrices silíceas con un contenido de alunita relativamente bajo. El potencial de generación de ácidos (AP) está controlado predominantemente por pirita, que genera protones inicialmente a través de la oxidación directa del O<sub>2</sub>:



A medida que el proceso de oxidación avanza, la oxidación bacteriana del Fe ferroso y la posterior oxidación sulfurosa por el Fe férrico, lleva el pH de la solución de lixiviación a niveles mucho menores a través de las siguientes reacciones:

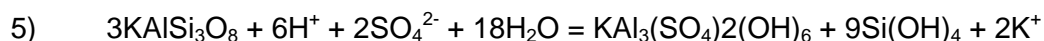


A valores de pH inferiores a 2,5, la reacción (3) es controlada completamente por la actividad de los *T ferro-oxidantes*, en tanto que la reacción (4) está completamente controlada por la reacción (3).

### 2.3.2 Estabilización

El potencial de neutralización (NP) en la mayoría de los conjuntos de roca estéril es atribuible a los carbonatos de la matriz de la roca mineralizada o el conjunto de ganga. Sin embargo, en Pascua Lama, el carbonato está prácticamente ausente. Otras fases de estabilización comunes, tales como los hidróxidos de Al y Fe, también están presentes a concentraciones extremadamente bajas (debido a la alta fugacidad de los sulfatos de los fluidos hidrotermales que controlan la mineralización). Bajo estas condiciones, el conjunto con abundantes sulfatos que tipifica la mayoría de las unidades de litología-alteración Pascua pueden constituir un mediador particularmente importante del proceso de acidificación de las aguas de contacto descrito en la Sección 2.3.1 (anterior).

Los datos de las pruebas estáticas para los conjuntos de roca estéril de Pascua Lama (WMC, 2003 y Tabla 2.1) indican que las unidades de litología-alteración no oxidadas generalmente contienen concentraciones de sulfatos que son iguales a o levemente superiores a las concentraciones de sulfuros. Los conjuntos oxidados tienen concentraciones de sulfatos que corresponden aproximadamente al doble de la concentración de sulfuros. Leonardson et al (2004) propusieron que las zonas con contenido de cuarzo-alunita típicamente reemplazaban a los feldespatos de formación de la roca y los minerales máficos de la roca mineralizada (a lo largo de las intersecciones estructurales) a través del siguiente proceso:

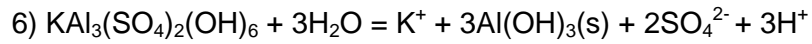


La reacción (5) modela la formación de alunita hipogénica por la reacción de los fluidos hidrotermales ácidos ricos en sulfatos con los feldespatos K de la roca madre.

**Tabla 2.1 Concentraciones de sulfuro y sulfato en los conjuntos de alteración de Pascua Lama (SRK, 2000)**

Tipo de alteración	Sulfuro (% como S)	Sulfato (% como S)	Número de muestras
Calentada por vapor	1,1	2,5	31
Silicificación	2,1	2,5	77
Cuarzo-alunita (no oxidada)	3,1	3,2	25
Cuarzo-alunita (oxidada)	1,9	4,1	45
Propilítica	1,7	2,7	9
Material de fallas	1,3	5,5	8

Se sabe que la disolución de la alunita estabiliza el drenaje ácido de roca (DAR) a alrededor de pH 3,5 en muchos sistemas que de otro modo estarían dominados por la oxidación de la pirita. La reacción 6 muestra una reacción de disolución de la alunita que puede servir ya sea como fuente o sumidero para los protones en solución:



En presencia de un fuerte flujo de protones asociado a la oxidación de los sulfuros (reacción 4), la reacción 6 es llevada de derecha a izquierda, consumiendo protones durante la disolución de la alunita. El campo de estabilidad de la alunita varía de menor a 4 hasta cerca de 6, dependiendo de otros factores tales como las actividades del sulfato y el potasio.

***ESTA PAGINA HA SIDO DEJADA EN BLANCO INTENCIONALMENTE***

### 3 DESCRIPCIONES DE LAS ESCOMBRERAS DE ROCA ESTÉRIL

---

#### 3.1 Ubicación y capacidad

En base al análisis del Estudio de Inversión de Barrick, el rajo de Pascua Lama dará una masa de roca estéril de aproximadamente 1,5 mil millones de toneladas durante una vida útil operacional de la mina de 20 años. Los planes de transporte de roca estéril entregados a WMC por SNC Lavalin (28 de enero de 2004) indican que aproximadamente el 85% de este tonelaje se transportará a la escombrera Estrecho y la roca estéril restante se enviará a El Morro. Durante los seis primeros años de producción, toda la roca estéril será almacenada en la escombrera Estrecho. En las Figuras 3.1 a 3.4 se indican las huellas de las escombreras de roca estéril para los intervalos de tiempo de 8, 12 y 20 años y post-cese.

#### 3.2 Clasificación y composición de la roca estéril

Para efectos de la modelación geoquímica de las escombreras de roca estéril, la roca estéril de Pascua Lama se clasificó utilizando un proceso en dos etapas. La primera contempló la asignación de clases litológicas y de alteración a todos los tipos de roca estéril basándose en la nomenclatura geológica estándar de Barrick para el proyecto de Pascua Lama (Tabla 3.1). Posteriormente WMC resolvió este sistema con un modelo geológico simplificado, fundado estrechamente en el trabajo de Leonardson (2004). El modelo simplificado comprende lo siguiente:

- 1) Una zona de alteración proximal dominada por alunita, adyacente a las principales zonas mineralizadas y consistente en grupos de alteración de cuarzo-alunita, cuarzo-alunita-diquita, cuarzo-alunita-caolinita (la diquita o la caolinita van variando hacia fuera a mayor profundidad a pirofilita).
- 2) Un conjunto distal con bajo contenido de alunita, fuera del conjunto con dominio de alunita, e incluyendo tipos de alteración de cuarzo-ilita, cuarzo-smectita y propilíticos y la roca madre no alterada.
- 3) Una capa de sílice, que se extiende sobre las unidades proximal y dictal.



- 4) Un conjunto con alteración calentada por vapor, dominado por sulfuros, cuarzo, caolinita y menor alunita relictas. Este se extiende sobre la capa de sílice.
- 5) Una zona de oxidación de sulfuros con abundante jarosita presente como una yuxtaposición a los conjuntos de alteración más profundos.

**Tabla 3.1 Sistema de clasificación de la litología-alteración de la roca de Pascua Lama**

Litología	Código	N°	Alteración	N°
Depósitos coluviales	Rc	1	Yuxtaposición de AK	14
Diques	D	2	Calentada por vapor	13
Flujos de ceniza volcánica	Qaf	10	Sílice opalito	12
	Qlaf	11	Sílice	11
	Raf	12	Jarosita	10
	Rlaf	13	Alunita	9
	Rafp	14	Pirrofilita	8
Rocas volcánicas indif.	Ai	15	Diquita	7
Sedimentos/rocas volcánicas indif.	Vbxc	16	Caolinita	6
	Vbxs	16	Ilita-smectita	5
	Mhs	16	Ilita	4
Toba porfídica dacítica	Dpt	17	Sericita	3
Granito A	Ga	20	Propilítica	2
Granito B	Gb	21	No alterada	1
Granito C	Gc	22		
Granito D	Gd	23		
Granito/diorita híbridos	Hydg	24		
Diorita	Di	25		
	Di2	25		
	Pdi	25		
Pórfido dacítico	Dp1	27		
	Dp2	27		
	Dp3	27		
Rocas intrusivas indif.	Rb	28		
Brecha pre-min	Hbx1f	30		
	Hbxib	31		
Brecha post-min	Hbx2	32		
	Hbx2c	33		
	Hbx2f	34		
	Hbx2n	35		
	Hbx2p	36		
Brecha tectónica	Tbx	37		
Brecha indif.	Rbx	38		

La composición prevista de la roca estéril con respecto al conjunto de alteración, según lo definido utilizando el sistema de clasificación geológica simplificado de WMC, se resume en la Tabla 3.2. Al momento del cese, el conjunto proximal (dominado por alunita) constituirá aproximadamente el 40% del tonelaje contenido en las escombreras de roca estéril Estrecho y El Morro. El conjunto distal (pobre en alunita) constituirá aproximadamente el 25% del tonelaje total y el conjunto de óxidos, la capa de sílice y el conjunto calentado por vapor constituirán el resto.

Debido a que el conjunto calentado por vapor es una unidad superficial somera, el desmonte inicial contemplará la remoción de una alta proporción de este material. Por lo tanto, el transporte de roca estéril a la escombrera Estrecho durante los 6 primeros años de operación de la mina contemplará la depositación de un conjunto en el cual hasta un 40% de la masa total de roca podría corresponder a material calentado por vapor. Se prevé que esta cifra descenderá a alrededor del 20% hacia el año 8.

**Tabla 3.2 Tonelajes que se entregarán a las escombreras de roca estéril de Pascua, clasificados según el conjunto de alteración**

	Conjunto distal ausencia de alunita	Conjunto proximal dominio de alunita	Conjunto de óxidos	Capa de sílice	Calentado por vapor	Toneladas acumuladas
<b>Códigos de los modelos de bloques</b>	1,2,4,5	6,7,8,9,14	10	11,12	13	
<b>Año de operación</b>	<b>Estrecho</b>					
8	196	186	57	97	130	667
	29%	28%	9%	14%	20%	
12	269	281	78	142	149	919
	29%	31%	9%	15%	16%	
20	291	485	159	208	149	1291
	23%	37%	12%	16%	12%	
21	291	486	161	208	149	1295
	23%	37%	12%	16%	12%	
	<b>El Morro</b>					
8	1	32	1	2	0	36
	3%	89%	2%	6%	0%	
12	60	63	13	16	2	154
	39%	41%	9%	11%	1%	
20	71	88	22	33	4	218
	31%	42%	11%	15%	2%	
21	71	88	22	33	4	218
	31%	42%	11%	15%	2%	
<b>Total toneladas</b>						1512,6

### 3.3 Configuraciones de las escombreras de roca estéril

#### 3.3.1 Escombrera Estrecho

La escombrera Estrecho ocupará los sectores de las cabecera de la cuenca del Estrecho (Figuras 3.1 a 3.4). Está diseñado como una instalación de relleno de valle que se construirá volteando la roca estéril hacia atrás desde las mayores alturas hacia afuera, agregándose bancos sucesivos a las menores cotas durante la vida útil de la mina. En la Tabla 3.3 se resumen las áreas de la huella de la escombrera Estrecho previstas para los intervalos de tiempo de 8, 12 y 20 años y post-cese para el proyecto.

El área de captación de aguas arriba de la escombrera Estrecho se extenderá principalmente al este del macizo de roca estéril. Esta área está cubierta en una importante proporción por un glaciar. El desgaste del hielo glacial estacionalmente constituye la principal fuente de descarga al sistema superior del Estrecho. Barrick propone un canal de desviación para reducir el volumen de agua superficial desde esta área del sector superior de la captación que ingresa a la huella de la escombrera Estrecho. El sistema de desviación se extenderá aproximadamente a lo largo de la línea del camino de acceso a la escombrera y estará diseñado para capturar alrededor del 70% de la escorrentía natural aguas arriba. Todas las simulaciones de la modelación geoquímica realizadas por WMC para la escombrera Estrecho han supuesto un caso base en el cual este sistema de desviación se encuentra en operación.

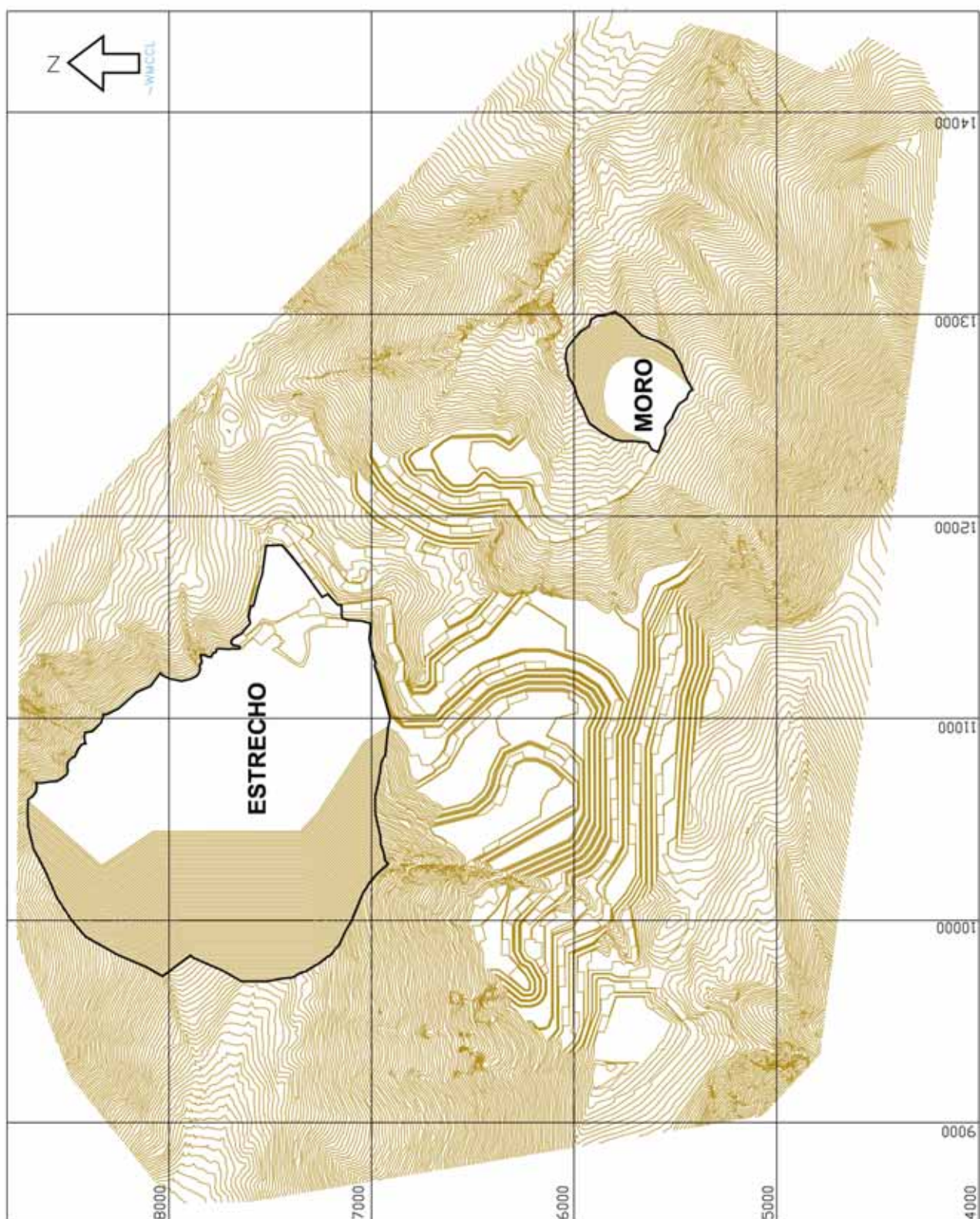
**Tabla 3.3 Áreas de las huellas de las escombreras Estrecho y El Morro**

Intervalo de tiempo (años)	Estrecho	El Morro
8	2,45 km <sup>2</sup>	0,27 km <sup>2</sup>
12	2,89 km <sup>2</sup>	0,32 km <sup>2</sup>
20	3,82 km <sup>2</sup>	1,28 km <sup>2</sup>
Post-cese	3,86 km <sup>2</sup>	1,29 km <sup>2</sup>

### 3.3.2 Escombrera El Morro

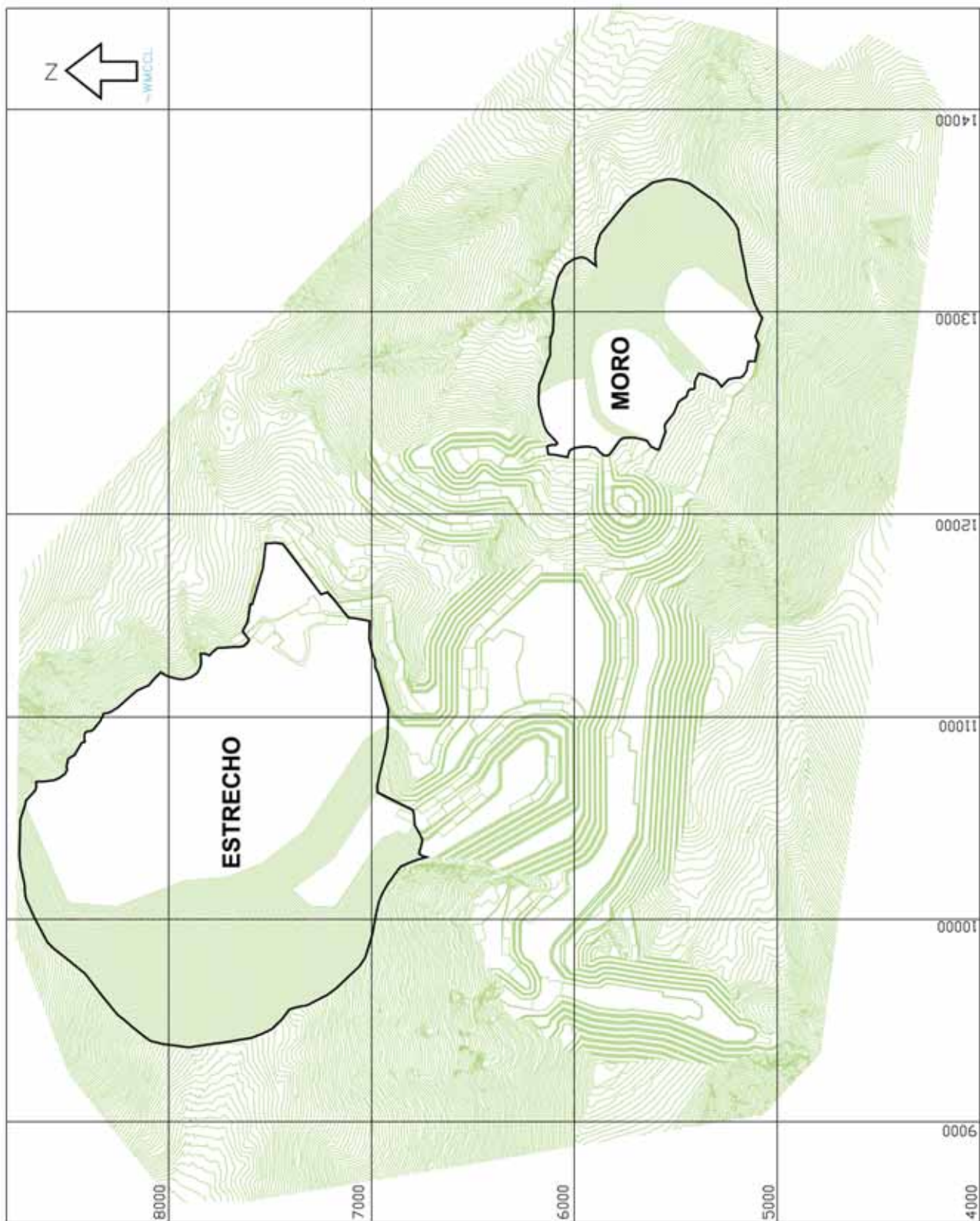
La escombrera El Morro está diseñada como una instalación en la ladera del valle, ubicada en la cabecera de un tributario menor del sistema del Arroyo Turbio al este del sector del rajo Pascua. En las Figuras 3.1 a 3.4 se indica la huella propuesta para El Morro en los intervalos de tiempo de 8, 12 y 20 años y post-cese para el proyecto. Las estimaciones del área de la huella se presentan en la Tabla 3.3. El desarrollo de la escombrera El Morro se iniciará en el año 7 de operación de la mina y comprenderá el volteo hacia atrás de la roca estéril desde una altura superior más o menos considerable.

**Figura 3.1** Areas de la huella de las escombreras de roca estéril de Pascua Lama en el intervalo de tiempo del año 8 de desarrollo de la mina

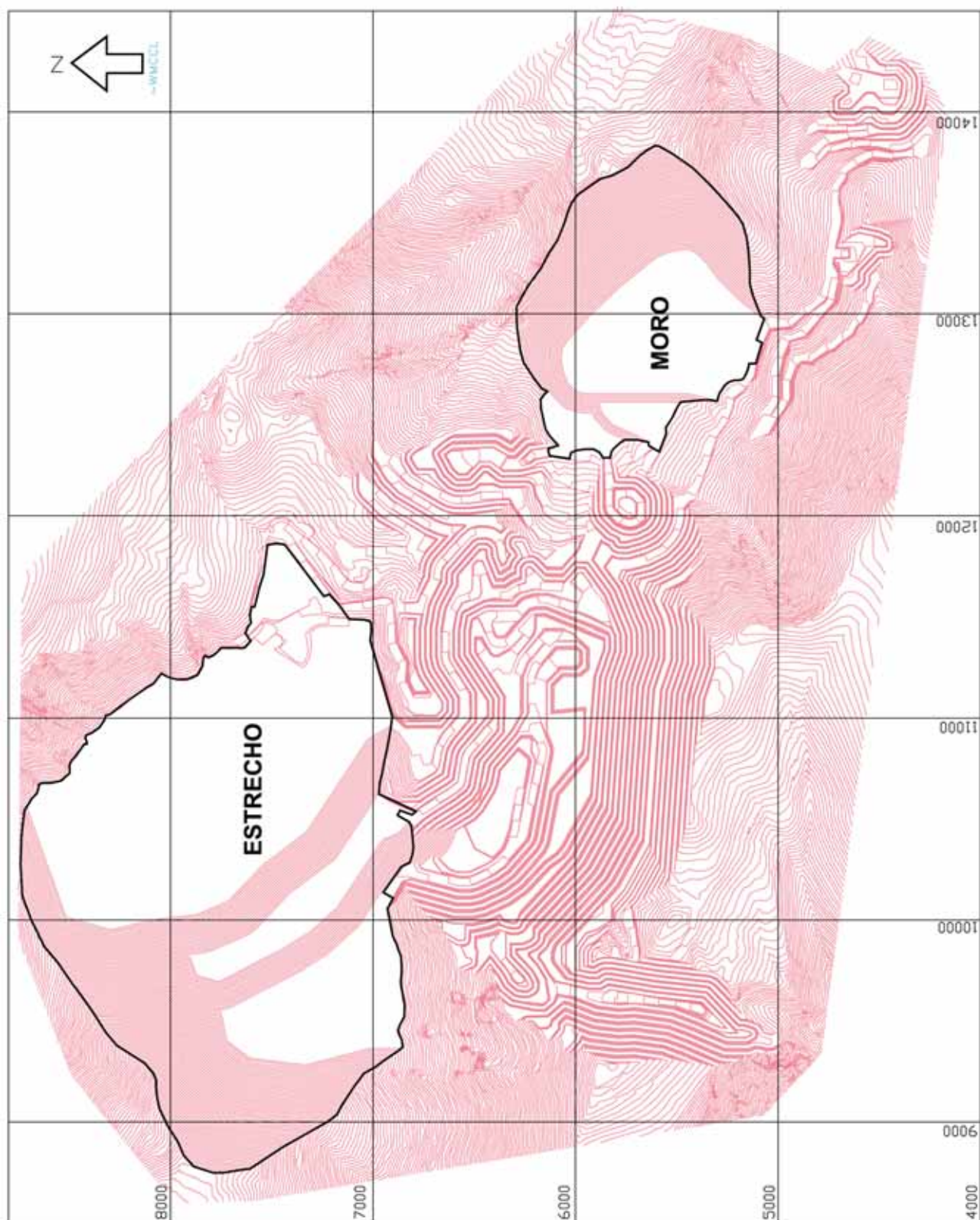




**Figura 3.2 Áreas de la huella de las escombreras de roca estéril de Pascua Lama en el intervalo de tiempo del año 12 de desarrollo de la mina**

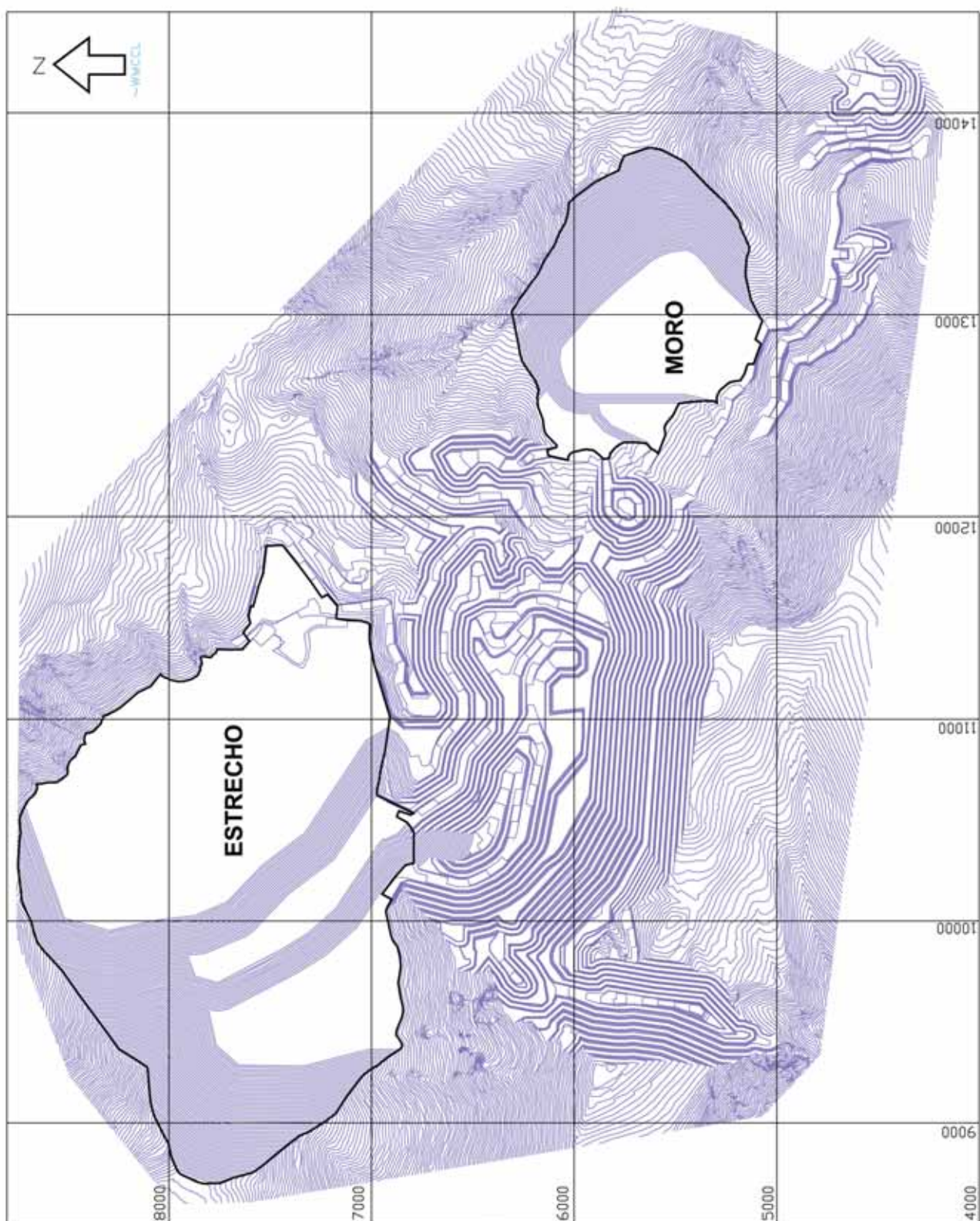


**Figura 3.3 Áreas de la huella de las escombreras de roca estéril de Pascua Lama en el intervalo de tiempo del año 20 de desarrollo de la mina**





**Figura 3.4 Áreas de la huella de las escombreras de roca estéril de Pascua Lama después del cierre**



## **4 CARACTERIZACION HIDROLOGICA DE LAS ESCOMBRERAS DE ROCA ESTERIL**

---

### **4.1 Antecedentes**

La caracterización de la hidrología de las escombreras de roca estéril de Pascua Lama se realizó como un componente del ejercicio de modelación geoquímica de WMC en el 2004 con el fin de:

- Predecir los volúmenes de descarga desde las escombreras de roca estéril y su variabilidad temporal, y
- Definir la proporción de la masa total de agua-roca que probablemente interactuará con agua (y, por lo tanto, movilizará contaminantes desde la matriz).

Los modelos hidrológicos de las escombreras de roca estéril de Pascua Lama desarrollados por WMC en 1999 y 2000 se aplicaron para los propósitos anteriores. WMC (2000, Informe 3137/R1a) definió las características hidrológicas para tres sitios de almacenamiento de roca estéril, dos de los cuales (Nevada Norte y Penélope) están ubicados en las cuencas que alojarán las configuraciones Estrecho y El Morro definidas para el Estudio de Inversión 2004.

Para efectos del ejercicio de modelación geoquímica de 2004 de WMC, se supuso que las propiedades hidráulicas de las escombreras de roca estéril Estrecho y El Morro corresponden a aquellas establecidas anteriormente por WMC (2000). WMC (2000) simuló las condiciones hidráulicas de las escombreras de roca estéril en cuatro intervalos de tiempo de la vida útil de la mina (los años 8, 12, 20 y 21 o post-cese) y tres regímenes climáticos (eventos de precipitación normal, 10 años lluviosos y 7 años secos). Para efectos de consistencia, estos escenarios se mantuvieron para ser utilizados en el presente estudio.



#### 4.1.1 Componentes del modelo

La modelación hidrológica (WMC 1999, 2000) se realizó utilizando un algoritmo de balance hídrico convencional. Los componentes del balance hídrico para cada escombrera incluyeron lo siguiente:

- La escorrentía influente desde aguas arriba, que ingresa a las escombreras principalmente como de drenaje inferior.
- La precipitación directa a las superficies de las escombreras.
- La evaporación/sublimación.
- La infiltración ya sea como un proceso difuso o a través de vías preferenciales.

La descarga total desde las escombreras de roca estéril se conceptualizó como la suma de (a) el flujo pasante que emana desde el área de aguas arriba y (b) la infiltración en la superficie y/o en las laderas de las escombreras.

## 4.2 Estimación de los volúmenes de descarga desde las escombreras

### 4.2.1 Drenaje

Con el fin de aplicar el modelo hidrológico preexistente de WMC (1999, 2000) a las configuraciones de las escombreras de roca estéril Estrecho y El Morro definidas para el Estudio de Inversión 2004, todos los resultados del modelo se transformaron con el fin de considerar las diferencias de las áreas de la huella y la captación contribuyente.

WMC (1999, 2000) supuso que la precipitación sobre las áreas de captación de aguas arriba de las escombreras de roca estéril constituiría la principal fuente de drenaje por debajo de las escombreras. La radiación, flujo termal, humedad, velocidad del viento, presión de vapor, temperatura y albedo se cuantificaron con una resolución mensual. Sujeto a las diferencias de cada uno de estos parámetros en función de la cota, se supuso que el volumen de escorrentía desde las áreas de captación de aguas arriba estaba en función directa de la superficie. Puesto que la escombrera Estrecho se construirá desde arriba hacia abajo, el área sobre la cabeza de la instalación generalmente no sufrirá ninguna modificación a medida que se expande la escombrera. Sin embargo, aumentarán las áreas de las paredes laterales del cañón. La escombrera El Morro es una escombrera en la ladera del valle. Por lo tanto, a medida que se llena, el área de aguas arriba aumentará a medida que se expande la escombrera hacia el piso del valle.

En la Figura 4.1 se presenta un diagrama simplificado del área de aguas arriba versus el tamaño de la escombrera para Nevada Norte (fin del pre-desmonte, año 20 y post-cese) y El Morro/Penélope (año 20 y post-cese) según lo definido por WMC (2000). Las ecuaciones derivadas de las líneas de tendencia mostradas en la Figura 4.1 se utilizaron en el ejercicio de modelación actual de WMC para estimar las superficies de aguas arriba para las configuraciones de las escombreras Estrecho y El Morro provistas por SNC Lavalin (enero de 2004).

WMC (2000) prevé que el volumen de drenaje inferior bajo ambas escombreras estará más o menos en función lineal del área de las huellas. En la Figura 4.2 se muestra esta relación para cuatro condiciones climáticas y una gama de intervalos de tiempo para la vida útil de la mina. Las líneas de tendencia para cada condición climática modelada por WMC (2000) se aplicaron para determinar las relaciones entre las huellas y los volúmenes de drenaje para las configuraciones específicas de las escombreras Estrecho y El Morro definidas para ser usadas en el presente estudio (Tabla 4.1).

#### 4.2.2 Infiltración

El modelo hidráulico de WMC (2000) para las escombreras de roca estéril de Pascua Lama estimó que la infiltración difusa a través de la matriz de las escombreras sería negativa en todos los escenarios climáticos. Por lo tanto, se pronosticó que el ingreso de humedad a través de la superficie de las escombreras ocurriría sólo cuando vías de flujo preferencial discretas facilitasen una infiltración rápida. En base a una búsqueda en la literatura análoga, se supuso que estas vías probablemente ocurrirían con una frecuencia espacial suficiente para el ingreso del 5% de la precipitación neta. Las vías de flujo preferenciales se conceptualizaron en el modelo de WMC (2000) como fracturas, cuya frecuencia total y longitud de canal estarían en función directa con la superficie de las escombreras.

En la Figura 4.3 se presenta la relación entre el área de las huellas versus los volúmenes de infiltración rápida pronosticados por WMC (2000). Las líneas de tendencia establecidas para cada una de las cuatro condiciones climáticas modeladas se utilizaron en el presente estudio para estimar los volúmenes de infiltración rápida para las configuraciones de las escombreras Estrecho y El Morro definidas por SNC Lavalin (enero de 2004). Las predicciones de los volúmenes de infiltración rápida resultantes se muestran en la Tabla 4.1 para los años 8, 12 y 20 y post-cese.

**Tabla 4.1 Drenaje y volúmenes de infiltración rápida (l/s) pronosticados para las escombreras Estrecho y El Morro**

	Estrecho				El Morro			
Años	8	12	20	21+	8	12	20	21+
Área de la escombrera km <sup>2</sup>	2,45	3,03	3,82	3,86	0,27	1,01	1,29	1,29
	Infiltración				Infiltración			
Normal	0,35	0,44	0,55	0,56	0,04	0,15	0,19	0,19
10 años lluviosos	0,96	1,2	1,5	1,5	0,11	0,40	0,51	0,51
7 años secos	0,09	0,11	0,14	0,14	0,01	0,04	0,05	0,05
	Drenaje				Drenaje			
Normal	6,01	6,36	6,74	6,75	2,64	4,00	4,68	4,68
10 años lluviosos	16,20	17,12	18,15	18,19	7,11	10,79	12,60	12,62
7 años secos	1,59	1,68	1,78	1,79	0,70	1,06	1,24	1,24
	Total				Total			

**Tabla 4.1 Drenaje y volúmenes de infiltración rápida (l/s) pronosticados para las escombreras Estrecho y El Morro (continuación)**

	Estrecho				El Morro			
Normal	6,37	6,79	7,29	7,31	2,68	4,15	4,86	4,87
10 años lluviosos	17,16	18,31	19,66	19,71	7,22	11,18	13,10	13,13
7 años secos	1,68	1,80	1,93	1,93	0,71	1,10	1,29	1,29
	% de drenaje				% de drenaje			
Normal	94%	94%	92%	92%	99%	96%	96%	96%
10 años lluviosos	94%	94%	92%	92%	99%	96%	96%	96%
7 años secos	95%	94%	93%	93%	99%	97%	96%	96%

#### 4.2.3 Resumen del régimen hidrológico de las escombreras

Los datos presentados en la Tabla 4.1 muestran claramente que la infiltración (a través de vías de flujo preferenciales) constituye un componente menor de la descarga total de las escombreras en todos los escenarios climáticos e intervalos de tiempo modelados para la vida útil de la mina. La infiltración rápida varía de <0,01 l/s para el escenario de 20 años secos en la escombrera El Morro a un máximo de 1,5 l/s en la escombrera Estrecho para la condición de 10 años lluviosos. El drenaje para los mismos períodos varía de casi 1 l/s a más de 18 l/s. En general, se pronostica que el drenaje variará de 92% a 97% del volumen total de descarga desde las escombreras para ambas instalaciones.

#### 4.2.4 Consecuencia de los datos de caudales de las escombreras de roca estéril para el diseño del proyecto

Las predicciones de los volúmenes de descarga desde las escombreras de roca estéril para las configuraciones específicas de las escombreras Estrecho y El Morro que se consideran en el Estudio de Inversión de Pascua Lama 2004 de Barrick, sugieren que los caudales correspondientes a la condición de 10 años lluviosos al momento del cese serían del orden de 20 y 13 l/s respectivamente. WMC considera que estos valores proporcionan criterios de diseño apropiados para las piletas de retención/evaporación de aguas ácidas y otra infraestructura de manejo de aguas superficiales asociadas a las escombreras de roca estéril de Pascua.

Los diseños a nivel de pre-factibilidad para las piletas de captación de DAR para Estrecho se han basado hasta la fecha en una capacidad de 160.000 m<sup>3</sup>. Esto se ajusta a un flujo entrante de agua superficial total estimado de 315.000 m<sup>3</sup>, menos las pérdidas evaporáticas naturales y aumentadas de 162.000 m<sup>3</sup> (Golder, 2001). La estimación de WMC de la descarga total desde la escombrera Estrecho para 10 años lluviosos al momento del cese (19,7 l/s) daría una cifra del orden de 300.000 m<sup>3</sup> netos de evaporación (suponiendo pérdidas a la misma tasa aplicada por Golder, 2001). En base a esta estimación, se requeriría un caudal de descarga de 20 l/s (por ejemplo, a una AWTP) para mantener la capacidad de almacenamiento.

### 4.3 Caracterización de la interacción agua - roca

#### 4.3.1 Visión general

Los modelos geoquímicos de instalaciones de roca estéril generalmente implican la estimación de la calidad de las aguas de contacto a través de la integración de:

- Datos geoquímicos o mineralógicos que indiquen la propensión a la movilización de la carga química desde el conjunto de roca estéril.
- Datos hidrológicos que indiquen el volumen del agua de contacto (drenaje y/o infiltraciones) que interactúa con el conjunto de roca estéril.

La superficie reactiva de la roca estéril con la cual interactúa el agua es, por lo tanto, un importante factor adicional con respecto a la carga química que probablemente se movilizará. Esta superficie reactiva se estima convencionalmente en base a un análisis de granulometría o un análisis de fragmentación por tronadura. En los casos específicos de las escombreras de roca estéril Estrecho y El Morro, también se requiere alguna estimación de las superficies y dimensiones de los canales de infiltración preferenciales.

#### 4.3.2 Granulometría

A la fecha, no se ha llevado a cabo ningún análisis de tronadura detallado con respecto a la roca estéril de Pascua Lama. Por lo tanto, los datos para describir las características probables de la granulometría del material que se almacenará en las escombreras de roca estéril Estrecho y El Morro se derivaron de los valores establecidos para el yacimiento de oro epitermal adyacente Veladero en la provincia argentina de San Juan (véase WMC 2003, 3193/R24).

En la Figura 4.4 se presenta un resumen de la distribución de la granulometría de la roca estéril de Veladero, basado en el análisis de los materiales utilizados para los ensayos geoquímicos en una serie de 'cribs' en terreno (WMC, 2002). Se supuso una distribución similar para caracterizar la roca estéril típica para utilizarlo en el ejercicio de la modelación actual de Pascua Lama. Es posible que se produzca una separación durante y después del volteo de la roca estéril, dando como resultado una tendencia a que las fracciones más gruesas predominen en la base de las escombreras de roca estéril de Pascua y las fracciones más finas sean dominantes en las capas superficiales y las caras. Por lo tanto, para efectos de la modelación geoquímica de las instalaciones, WMC extrapoló tentativamente el análisis de fragmentación de Veladero aplicando los siguientes supuestos:

- Los canales de drenaje estarán compuestos de fragmentos de >1.000 mm (1 m).
- Las vías de infiltración estarán compuestas por un conjunto de todas las demás fracciones de tamaños en las proporciones pronosticadas para Veladero (Figura 4.4).

En base a lo anterior, se calculó una distribución final de los tamaños utilizando el software GRAIN 2.0. Los resultados indican que los fragmentos del drenaje tendrán una superficie promedio de  $1,88 \text{ m}^2/\text{m}^3$ . Se pronostica que los fragmentos presentes en los canales de infiltración tendrán una superficie promedio de  $26,15 \text{ m}^2/\text{m}^3$ .

#### 4.3.3 Infiltración y dimensiones de las vías de drenaje

Es probable que el drenaje bajo las escombreras de Pascua y la infiltración rápida a través de éstos sean complejos. Para efectos de simular la interacción entre el agua y la roca, WMC adoptó modelos de canales lineales simplificados para cada caso. Estos suponen que el interior de los canales probablemente estará relleno o cementado con finos. Se supuso que el volumen de los canales ( $m^3$ ) multiplicado por las superficies reactivas de los granos individuales que forman las paredes de los canales ( $m^2/m^3$ , suponiendo una porosidad del 30%) proporciona una estimación del área reactiva total de los canales para cada intervalo de tiempo discreto y escenario climático.

El modelo hidrológico de WMC (WMC, 2000) ofrece estimaciones de las áreas transversales de los canales de drenaje. Dado que los volúmenes de los caudales de aguas arriba no cambiarán significativamente para los cuatros períodos de tiempo y escenarios climáticos modelados, las áreas transversales de WMC seguirán siendo las mismas a través del tiempo. Las estimaciones de las longitudes de los canales se basaron en la distancia de los canales medida desde el ápice en el caso de la escombrera Estrecho y en el ancho máximo de la escombrera para El Morro.

El modelo hidrológico de WMC (WMC 2000) supone que el 5% de la precipitación neta pasará a través de las escombreras de Pascua como infiltración rápida. Desde el punto de vista conceptual, la infiltración rápida puede visualizarse como agua que fluye a través de canales verticales, distribuida en forma pareja a través del área de las escombreras. Para efectos de la modelación, la longitud vertical de cada vía de flujo se calculó suponiendo un espesor promedio de las escombreras. En las Tablas 4.2 y 4.3 se resumen las dimensiones de los canales estimadas para una infiltración rápida y drenaje.

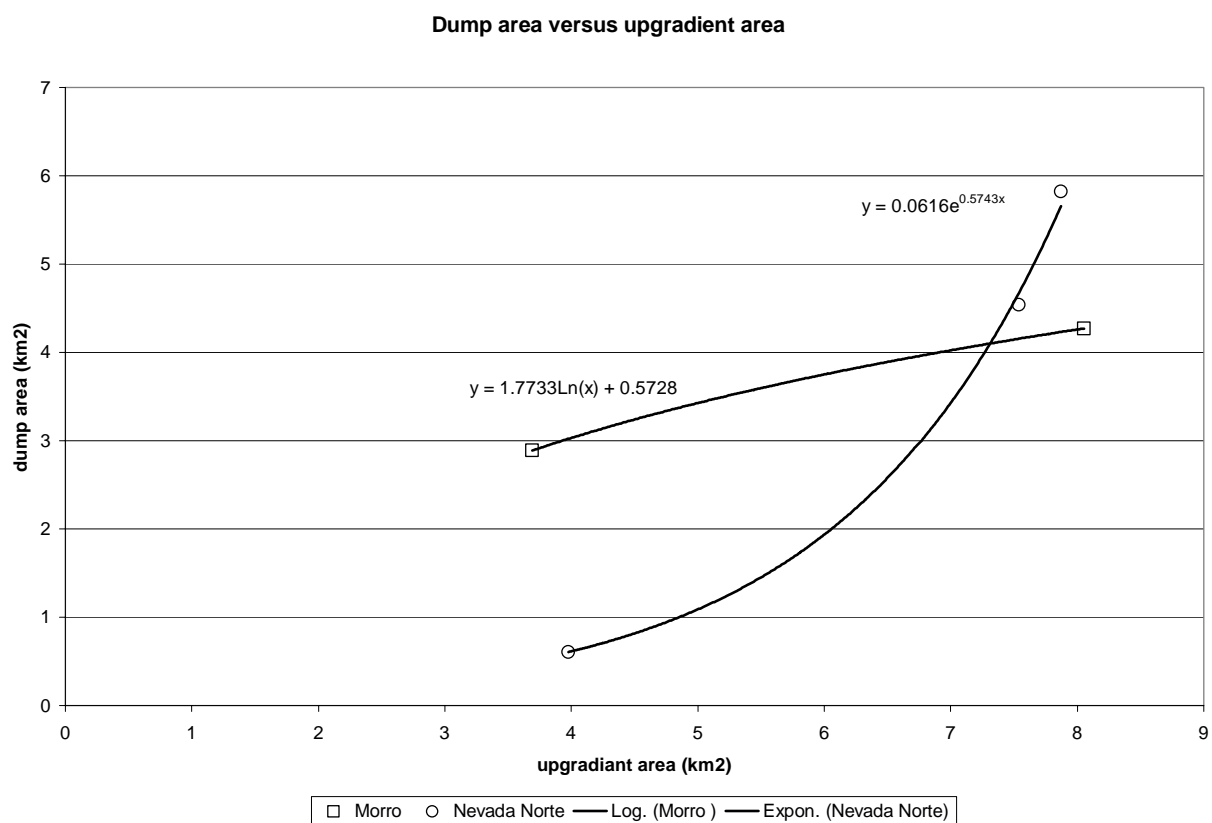
**Tabla 4.2 Área transversal/longitudinal de los canales de drenaje**

	Estrecho				El Morro			
Años	8	12	20	21+	8	12	20	21+
	M <sup>2</sup> /km	M <sup>2</sup> /km	M <sup>2</sup> /km	m <sup>2</sup> /km	M <sup>2</sup> /km	m <sup>2</sup> /km	m <sup>2</sup> /km	m <sup>2</sup> /km
Normal	10/2,2	10/2,5	10/3,1	10/3,2	5/,74	5/1,0	5/1,5	10/1,5
10 años lluv	10/2,2	10/2,5	10/3,1	10/3,2	10/,74	10/1,0	10/1,5	10/1,5
7 años sec	5/2,2	5/2,5	5/3,1	5/3,2	5/,74	5/1,0	5/1,5	5/1,5

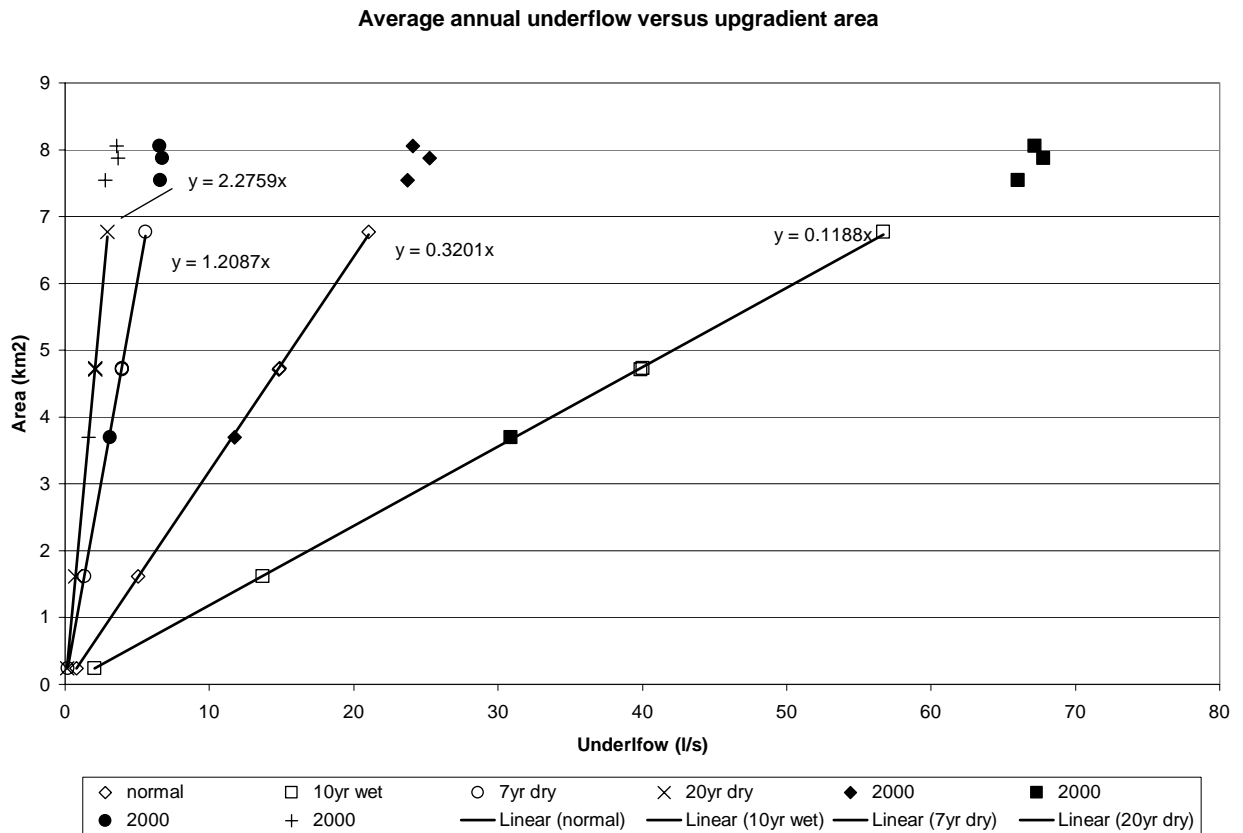
**Tabla 4.3 Área/longitud de los canales de infiltración rápida**

	Estrecho				El Morro			
Años	8	12	20	21+	8	12	20	21+
	m	m	m	M	m	m	m	M
Altura máx del bot	560	600	720	720	160	360	480	480
Profundidad prom	132	141	170	170	38	85	113	113
Área estimada	122.630	151.295	191.240	192.825	13.695	50.630	64.385	64.560

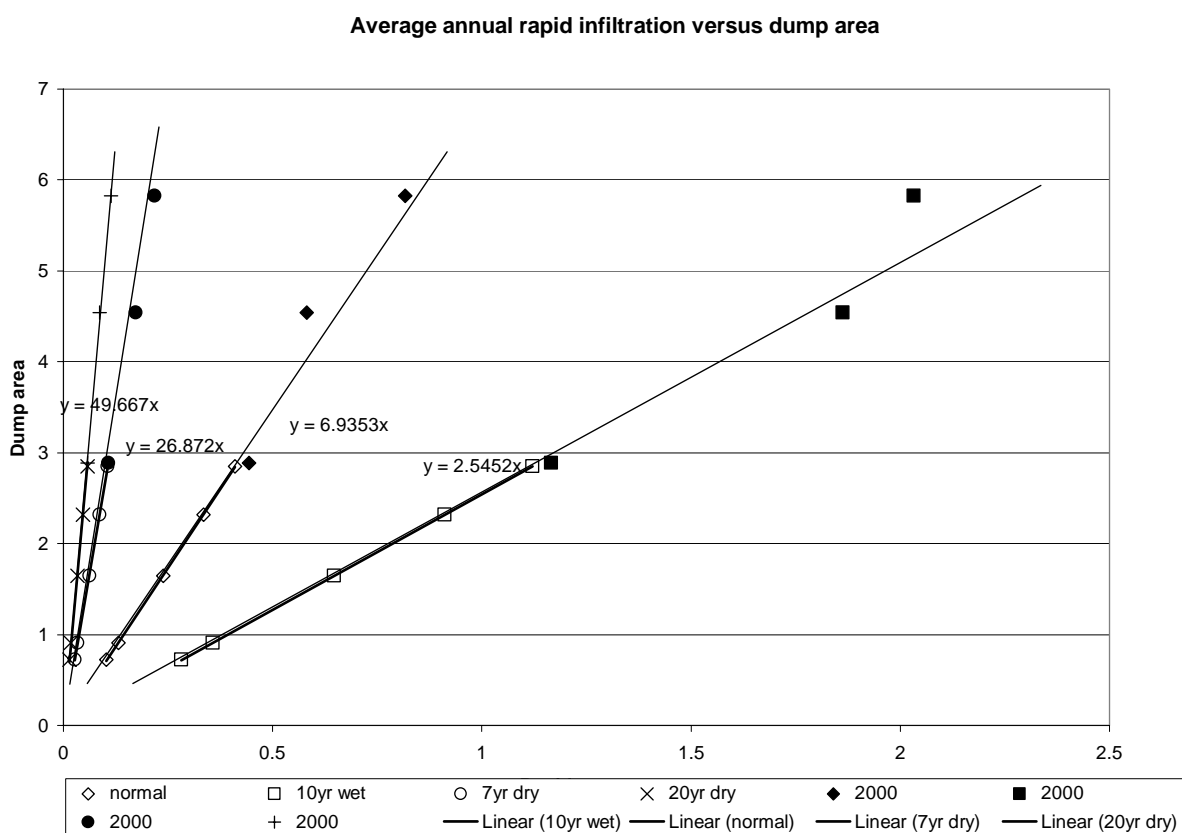
**Figura 4.1 Relación entre el área de la huella de las escombreras de roca estéril y el área de captación de aguas arriba, según lo definido por WMC 2000**



**Figura 4.2 Relación entre el área de aguas arriba de las escombreras de roca estéril y el volumen de underflow, según lo definido por WMC 2000 (símbolos abiertos) y 2000a (símbolos cerrados)**

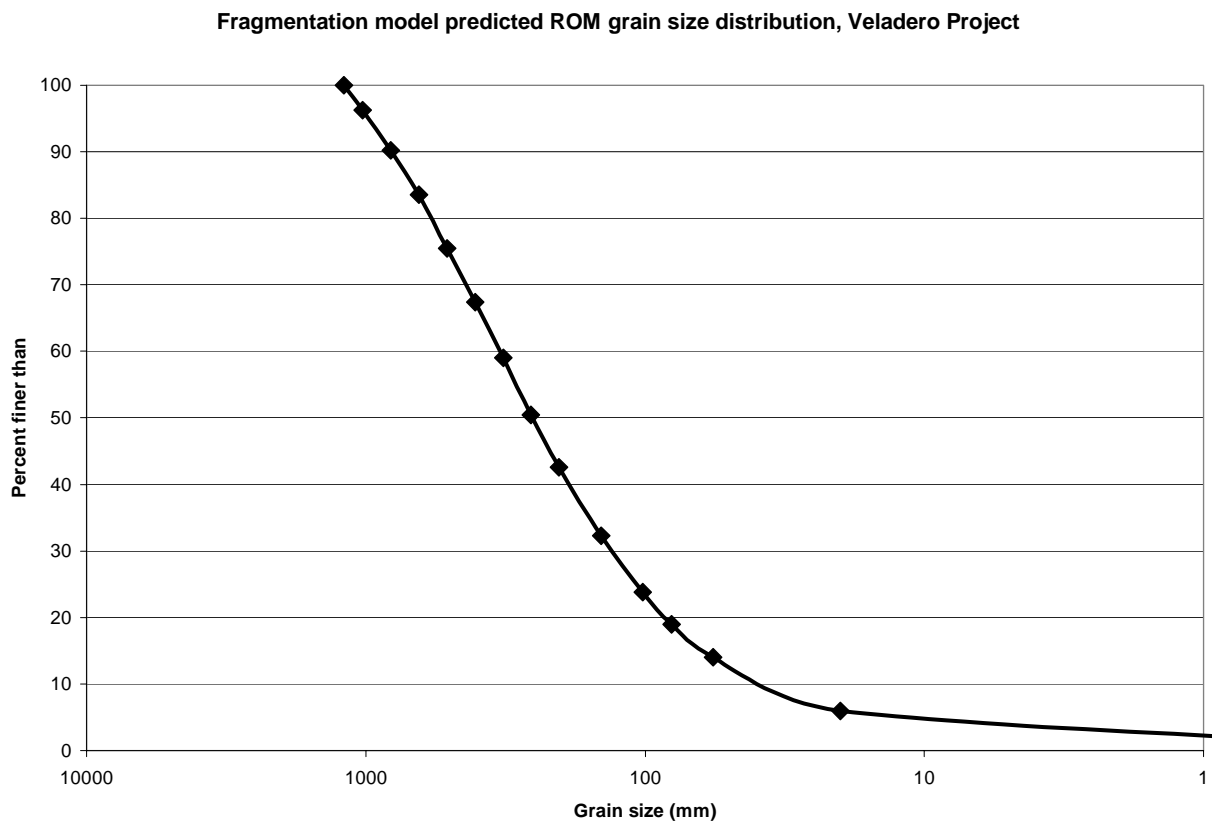


**Figura 4.3 Relación entre la infiltración rápida (l/s) y la superficie de las escombreras de roca estéril, según lo definido por WMC (símbolos abiertos) y 2000a (símbolos cerrados)**





**Figura 4.4** Análisis de la fragmentación de la roca estéril para el proyecto Veladero (de WMC, 2002)



## 5 CARACTERIZACION GEOQUIMICA DE LA ROCA ESTERIL

### 5.1 Fuentes de los datos

Barrick y consultores designados llevaron a cabo una serie de programas de ensayos geoambientales para la caracterización de las propiedades de las soluciones de lixiviación de la roca estéril de Pascua Lama durante el período 1994 – 1999 (Rescan, 1994; Terramatrix, 1996; ARCADIS, 1999; Steffen, Robertson y Kirsten, 1999). Todos los datos fueron revisados y recopilados en una base de datos común por WMC (2003). En la Tabla 5.1 se resumen los ensayos realizados.

**Tabla 5.1 Base de datos de los ensayos geoambientales para el proyecto Pascua**

	<b>Rescan</b>	<b>Terramatrix</b>	<b>ARCADIS</b>	<b>Barrick</b>	<b>SRK</b>
ABA	16	135	35	16	24
NAG					24
MWMP		49	35	16	
Enjuague de SRK					18
Celdas de humedad	3		6		2
Ensayos de 'crib'					1

Los datos de las cargas químicas para ser usados en la modelación geoquímica de las filtraciones de las escombreras de roca estéril de Pascua-Lama se derivaron exclusivamente a partir de los ensayos cinéticos realizados por Rescan y ARCADIS durante el período del 1996 a 1999. Los datos para los ensayos de las celdas de humedad de SRK fueron recibidos por WMC en marzo de 2004. Si bien no se incorporaron en el ejercicio de modelación, estos resultados se revisaron y se encontró que eran estrechamente concordantes con las tendencias establecidas en base al conjunto de datos de Rescan y ARCADIS.

## 5.2 Procedimiento para los ensayos de celdas de humedad

Los ensayos de celdas de humedad (HCT) se utilizan ampliamente en la industria de los minerales para la caracterización geoquímica de la roca estéril (por ejemplo, MEND, 2001). Estos ensayos requieren masas de muestra relativamente pequeñas (alrededor de 1 kg) y tienen la capacidad de simular, dentro de un período de semanas, los procesos de meteorización que se producen a través de años o décadas en condiciones de terreno. La serie de muestras de celdas de humedad de Pascua-Lama comprendió 11 muestras de 11 sondajes ubicados alrededor del cuerpo mineralizado. En la Tabla 5.2 se resume la distribución de las muestras de celdas de humedad por tipo de roca y alteración, utilizando la nomenclatura correspondiente a la definida por el modelo geológico conceptual de WMC del yacimiento Pascua (Sección 3.2).

**Tabla 5.2 Muestras usadas en los ensayos de celdas de humedad**

Nomenclatura de WMC	Distales ausencia de alunita		Proximales ricas en alunita	Oxidadas	Capa de sílice		Calentadas por vapor
	Propilitica	Cuarzo alunita caolinita	Cuarzo alunita no oxidada	Cuarzo alunita oxidada	Silic. selectiva	Silic. penetrante	Calentada por vapor
Tobas	RDH-66A				RDH-50		
Pórf de cuarzo (Gran. A)				RDH-664			
Monzonita (Gran. B)				RDH-665			RDH-646
Granodiorita (Gran. C)				RDH-668		SRK-5	
Granito (Granito D)			SRK-6				
Brecha							RDH-642, P3
Falla							
Diorita			RDH-45				
Dacita							

Todos los HCT se ejecutaron durante un mínimo de 26 semanas. Durante cada ciclo de 7 días, se generaron condiciones húmedas cálidas durante 3 días, seguido de inyección de aire seco durante 3 días. Se circuló un volumen de 1 litro de agua destilada a través de las celdas en forma continua y se drenó el séptimo día de cada ciclo para análisis. El fluido fue reemplazado entonces al inicio del ciclo de lixiviación subsiguiente. Se realizaron análisis de pH, sulfatos y conductividad en las soluciones de lixiviación por HCT con una frecuencia semanal, realizándose un análisis de ICP-MS mensual detallados de los solutos mayores y trazas.

## 5.3 Resultados de los ensayos HCT

### 5.3.1 Tendencias de las series cronológicas

Los resultados completos de los HCT para Pascua Lama han sido informados por SRK (1999) y WMC (2003). Para efectos de la modelación de las filtraciones de las instalaciones, se utilizaron datos de las semanas 1 y 21-29 en el presente estudio.

Los datos de la semana 1 para las muestras calentadas por vapor se utilizaron para obtener una estimación conservadora de la química de las filtraciones durante el desarrollo inicial de la escombrera Estrecho. Los resultados promediados de las semanas 21 y 29 se utilizaron para todos los demás escenarios de intervalos de tiempo de las escombreras de roca estéril, puesto que se considera que estos datos entregan la mejor indicación disponible de la movilización de la carga química bajo condiciones de meteorización en régimen estacionario (es decir, no afectadas por el lavado inicial de las sulfosales).

Los resultados de las series cronológicas para el pH, los sulfatos y el Fe, que muestran la progresión de las soluciones de lixiviación en las celdas en condiciones de régimen estacionario, se ilustran en las Figuras 5.1 – 5.3. Para la mayoría de las muestras, el pH está confinado generalmente a un rango estrecho de 3 – 4, consistente con un fuerte control de estabilización de la alunita (refiérase a la Sección 2.3). Es evidente una excepción para la muestra calentada por vapor RDH-P3, que arrojó una solución de lixiviación con muy bajo pH (alrededor de 1) durante las primeras semanas de la secuencia de HCT. Esto es análogo al pH de las soluciones de lixiviación de los ensayos de 'crib' en terreno informados por SRK (1999), cuyos datos también se incluyen en la Figura 5.1. En ambos casos, el régimen de bajo pH se atribuye a una falta de estabilización de la alunita para contrarrestar la depresión del pH derivada ya sea de la disolución inicial de las sulfosales o la oxidación a largo plazo de los sulfuros en las matrices de roca calentadas por vapor.

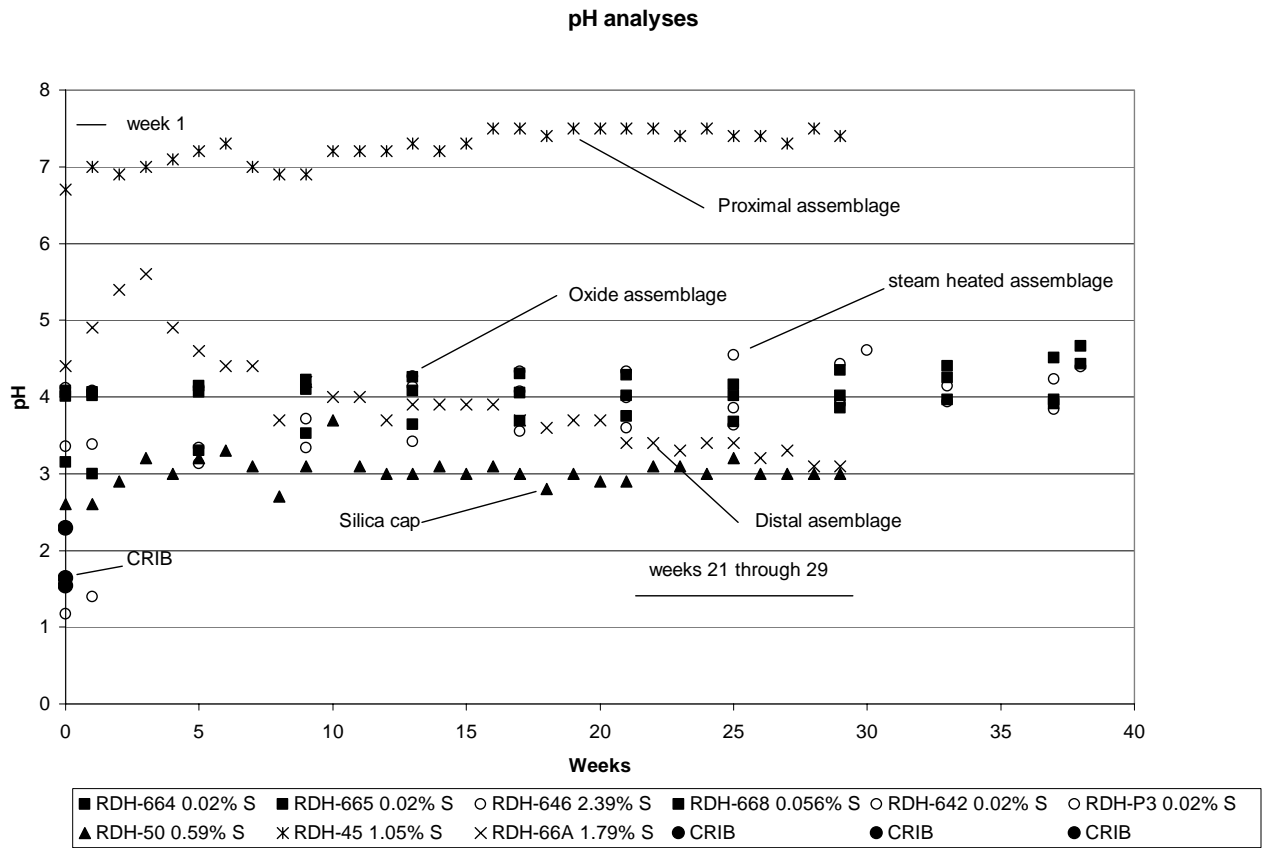
### 5.3.2 Normalización de los datos

Los datos de las concentraciones de las soluciones de lixiviación de las celdas generalmente no son aptos para la inter-comparación directa debido a diferencias de (a) la masa de muestra, (b) la granulometría y, por ende, (c) la superficie reactiva. Las muestras de HCT para Pascua Lama no se caracterizaron granulométricamente antes del inicio de los ensayos, lo que creó alguna dificultad para la normalización entre las muestras. En la Tabla 5.2 se presenta un resumen de las químicas de las soluciones de lixiviación para las etapas inicial (semana 1) y final (semanas 21 a 29) para todos los conjuntos principales de alteración de roca estéril, después de la normalización tentativa para considerar las variaciones entre las muestras tanto de la masa como de la granulometría. Los resultados para las muestras de celdas con un tipo de alteración común se promediaron antes del proceso de normalización y se recalcularon posteriormente en términos de las tasas de lixiviación (LR) por m<sup>2</sup> de superficie reactiva, por semana. En ausencia de análisis de granulometría específicos de las muestras, el proceso de normalización se llevó a cabo aplicando un factor de superficie estimado de 20 m<sup>2</sup>/kg (derivado de los análisis de la granulometría de las muestras de celdas de humedad del proyecto Veladero) a todas las muestras de HCT de Pascua.

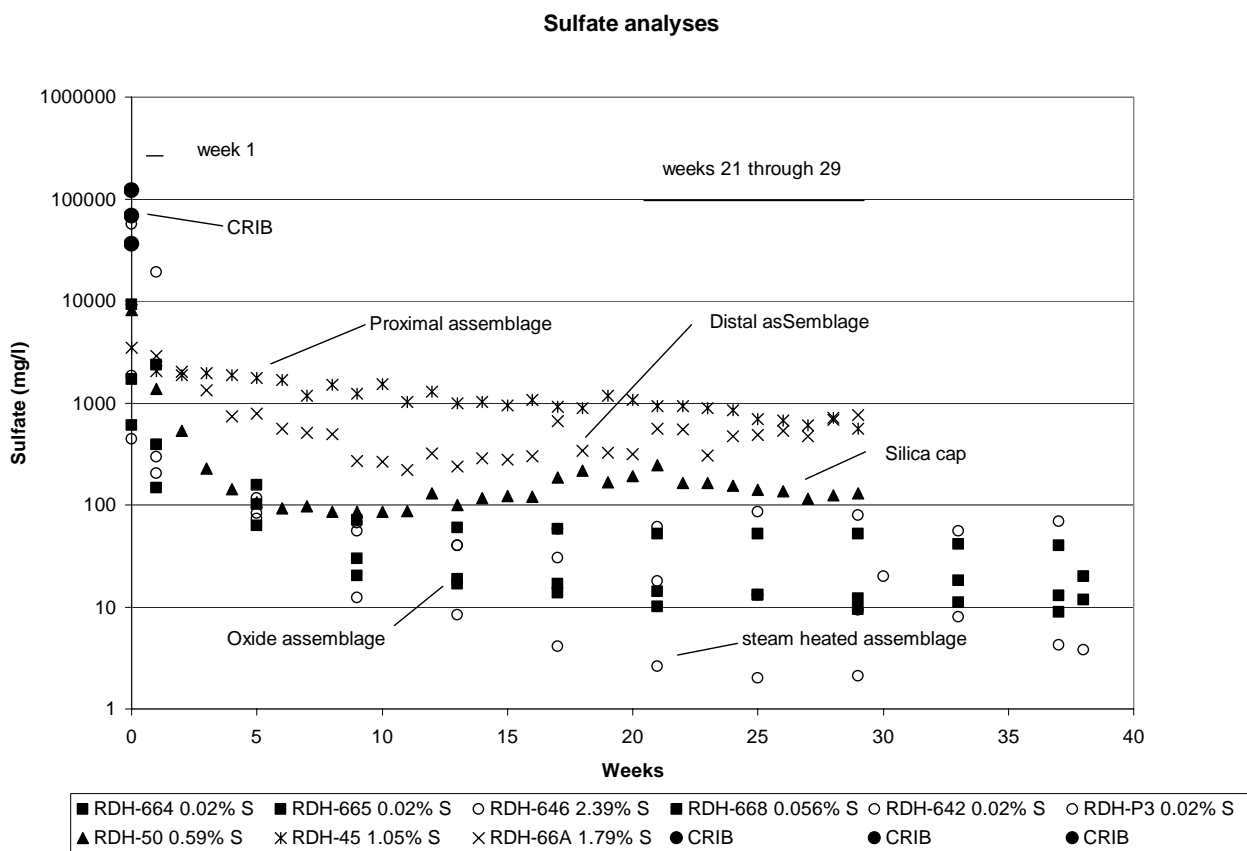
**Tabla 5.3 Tasas de lixiviación promedio (mg/m<sup>2</sup>/sem) de solutos definidas por los ensayos de HCT de Pascua para grupos de muestras clasificados según el conjunto de alteración (semanas 1 y 21-29)**

	Semana 1	Semanas 21- 29				
	Calentadas por vapor	Distales	Proximales	Oxidadas	Capa de sílice	Calentadas por vapor
HCO <sub>3</sub>	0,067	0	2,7	0,05	0	0,056
pH	2	3	7	4	3	4
SO <sub>4</sub>	653	54	76,1	2,5	15,3	3,0
Ag	0,0002	0,0001	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002
Al	2,4	1,1	0,1	0,1	0,1	0,2
As	0,43	0,0008	0,0002	0,0010	0,0002	0,0152
Ba	0,003	0,01	0,005	0,013	0,005	0,024
Be	0,001	0,003	0,0001	0,00003	0,00005	0,00005
Ca	0,798	5,39	29,3	0,042	0,031	0,013
Cd	0,0090	0,0024	0,0001	0,0002	0,0001	0,0004
Co	0,078	0,01	0,001	0,001	0,001	0,001
Cr	0,0352	0,0016	0,0017	0,0001	0,002111	0,0001
Cu	1,719	0,037	0,001	0,005	0,010	0,003
Fe	271,813	3,633	0,10	0,24	1,48	0,42
Hg	0,133	0,00004	0,00004	0,00007	0,00004	0,00002
K	1,08	0,33	0,36	0,31	0,25	0,31
Mg	2,954	1,94	0,620	0,034	0,003	0,010
Mn	0,67	1,93	0,08	0,005	0,004	0,002
Mo	0,013	0,00	0,0011	0,0001	0,001	0,000
Na	1,388	0,17	0,100	0,332	0,050	0,130
Ni	0,042	0,015	0,0007	0,0008	0,0028	0,0008
P	0,06	0,05	0,05	0,0003	0,050	0,001
Pb	0,0238	0,003	0,003	0,035	0,009	0,0023
S	246	0,92	0,92	0,82	0,92	1,02
Sb	0,001	0,003	0,004	0,001	0,003	0,001
Se	0,026	0,0006	0,0006	0,001	0,001	0,001
Si	0,646	0,597	0,597	0,681	0,597	0,513
Sn	0,0042	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0006
Sr	0,08	0,0024	0,1036	0,04	0,0008	0,04
Te	0,0558	0,0004	0,0004	0,00025	0,0004	0,0006
Ti	0,050	0,050	0,05	0,05	0,0500	0,05
V	0,0007	0,0005	0,0005	0,0005	0,001	0,0005
Zn	0,52	0,391	0,007	0,017	0,009	0,043

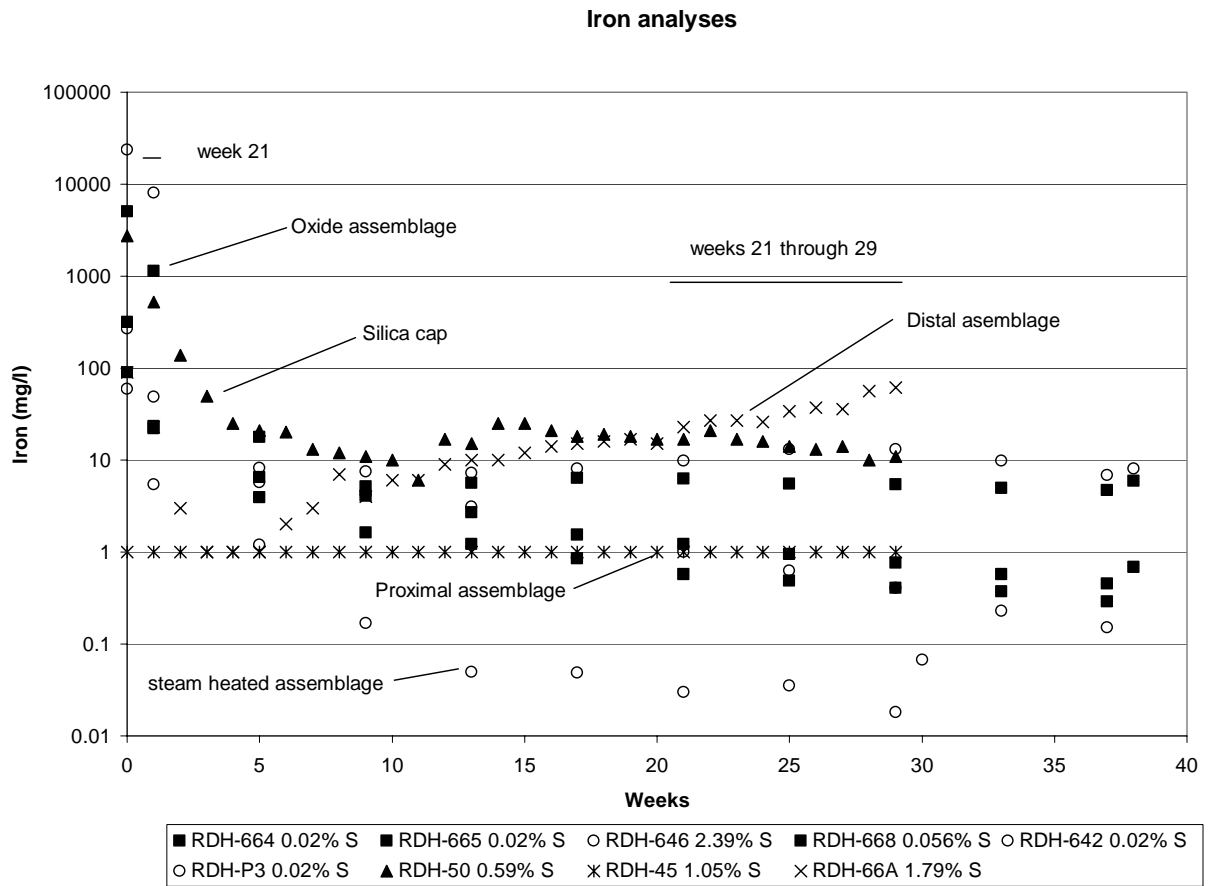
**Figura 5.1 pH de las series cronológicas para los tipos de alteración de la roca estéril de Pascua**



**Figura 5.2 Perfiles de las tasas de lixiviación de  $\text{SO}_4$  para los tipos de alteración de la roca estéril de Pascua**



**Figura 5.3 Perfiles de las tasas de lixiviación de Fe para los tipos de alteración de la roca estéril de Pascua**





## 6 MODELACION DE LA QUIMICA DE LAS SOLUCIONES DE LIXIVIACION DE LAS INSTALACIONES

---

### 6.1 Conceptualización

La química de las soluciones de lixiviación del material estéril de la mina está controlada fundamentalmente por (a) la composición y reactividad de la matriz y (b) el volumen y la hidrodinámica del solvente interactivo. En el caso de Pascua-Lama, se desarrolló un modelo que permite la integración de los datos de caudales de filtración previstos con las estimaciones de las cargas geoquímicas temporales (de los ensayos de celdas de humedad) para determinar la química probable de las soluciones de lixiviación del material estéril en una diversidad de condiciones climáticas durante las operaciones y con posterioridad al cese.

En el presente estudio, se adoptó un procedimiento en etapas, incorporándose o considerándose controles de caudales adicionales sobre la evolución de las soluciones de lixiviación en cada etapa. Las principales etapas de esta secuencia fueron:

- Mezcla en equilibrio de masa (régimen estacionario) del agua que se infiltra y las cargas químicas móviles.
- Modelación de las restricciones termodinámicas y los efectos de la sorción sobre el transporte de solutos.

### 6.2 Mezcla en equilibrio de masa

#### 6.2.1 Metodología

Los cálculos del equilibrio de masa definen las concentraciones teóricas de solutos que se alcanzarían en el agua de las filtraciones en ausencia de restricciones termodinámicas o cinéticas. Los cálculos se realizan como la función en régimen estacionario de:

$$\text{Conc. elemento } X = \text{Carga móvil } X \text{ (mg/unidad de tiempo)} / \text{volumen lixivante (L/unidad de tiempo)}$$

Sobre la base de la conceptualización de WMC de la hidrología de las escombreras de roca estéril de Pascua Lama, la interacción del agua de contacto con la carga móvil se producirá sólo en las áreas de drenaje activo y a lo largo de las vías de infiltración preferenciales a través de las escombreras (Sección 4). Por lo tanto, los cálculos del equilibrio de masa apropiado para cada instalación pueden expresarse de la siguiente manera:

$$\text{Carga de la escombrera Estrecho o Morro (mg/l)} = (X \text{ mg/m}^2/\text{sem} \times \text{m}^2 \text{ canal de drenaje}) / (\text{drenaje l/s}) + (X \text{ mg/m}^2/\text{sem} \times \text{m}^2 \text{ canal de infiltración}) / (\text{infiltración l/s})$$

### 6.2.2 Escenarios modelados

Se seleccionaron tres escenarios climáticos específicos para ser utilizados en la modelación del equilibrio de masa (para cada uno de los intervalos de tiempo de 8, 12, 20 y post-cese). Estos comprendieron condiciones de precipitación normal, 10 años lluviosos y 7 años secos. Las tasas de generación de carga química móvil se establecieron en base a los resultados promediados de los ensayos de HCT para las semanas 21 a 29, normalizados a unidades de mg/m<sup>2</sup>/sem (Tabla 5.2). Estos datos se mezclaron basado en los criterios de infiltración, drenaje y superficie reactiva definidos en las Tablas 4.1 – 4.3 (Sección 4). Las químicas de equilibrio de masa para los dos componentes de flujo discretos se establecieron en forma independiente y se mezclaron posteriormente para producir una química de descarga final. En el caso de Estrecho, el componente de drenaje se modeló en base al supuesto del ‘caso base’ de 70% de desviación de la escorrentía desde el área superior de la captación.

Se modeló un intervalo de tiempo adicional para Estrecho para simular la descarga durante el desarrollo inicial de la instalación (años 1-6). El escenario involucró el uso de la química de las soluciones de lixiviación de la semana 1 derivada de las muestras de los ensayos de celdas calentadas por vapor y se pretendió que simulara (conservadoramente) los efectos del lavado inicial desde la instalación de Estrecho en una etapa de la vida útil de la mina en la cual una alta proporción de la matriz de las escombreras tendrá ese tipo de mineralogía.

### 6.2.3 Resultados

Los resultados del equilibrio de masa para las escombreras de roca estéril de Pascua en todos los escenarios de intervalos de tiempo y climáticos modelados se presentan en las Tablas 6.1 - 6.3. Debido a que la carga química movilizada teóricamente (por unidad de tiempo) es una constante, las variaciones de las concentraciones de solutos (en mg/l) ocurren en directa concordancia con el volumen de descarga aplicado y las dimensiones de la superficie reactiva definidas para cada intervalo de tiempo. Por lo tanto, las concentraciones máximas coinciden con los períodos de mínimo flujo de filtraciones en todos los casos.

### 6.3 Restricciones termodinámicas

#### 6.3.1 Metodología

Independientemente de la masa interactiva de material estéril incorporada en los cálculos del equilibrio de masa, los datos de salida tienen una utilidad limitada para la predicción de las químicas de las filtraciones a largo plazo desde las escombreras de roca estéril en condiciones de terreno, debido a que no consideran las restricciones termodinámicas sobre las cargas de solutos. Para cada condición climática y escenario de intervalo de tiempo, WMC aplicó el código de saturación-especiación PHREEQC para incorporar estas influencias. El procedimiento involucró lo siguiente:

- Equilibrio de las soluciones de entrada de equilibrio de masa con los gases atmosféricos.
- Equilibrio con fases minerales seleccionadas que se sabe que están presentes en el conjunto de roca estéril de Pascua.
- Cálculo del pH de las soluciones y el régimen de Eh después del equilibrio de las fases gaseosas y sólidas.
- Especiación de las fases acuosas y nuevo cálculo de las concentraciones de solutos en equilibrio después de (a) la precipitación de las fases sobresaturadas seleccionadas y/o (b) la disolución de las fases subsaturadas.

**Tabla 6.1 Cálculos de la carga química en equilibrio de masa (mg/l) para la escombrera de roca estéril Estrecho (suponiendo una desviación del 70% del drenaje)**

Intervalo de tiempo	Año normal				10 años lluviosos				7 años secos			
	8	12	20	Cese	8	12	20	Cese	8	12	20	Cese
Acidez	810	994	1177	1180	300	369	437	438	3066	3774	4468	4471
Alcalinidad	85	114	196	197	31	42	73	73	320	434	743	746
pH	3.49	3.48	3.52	3.52	3.49	3.48	3.52	3.52	3.49	3.48	3.52	3.52
SO <sub>4</sub>	4406	5716	8393	8432	1633	2122	3114	3130	16678	21714	31866	31936
Ag	0,021	0,026	0,038	0,038	0,008	0,010	0,014	0,014	0,079	0,098	0,143	0,144
Al	48,0	58,5	68,4	68,6	17,8	21,7	25,4	25,5	181,7	222,2	259,6	259,8
As	0,37	0,39	0,42	0,43	0,14	0,15	0,16	0,16	1,41	1,49	1,61	1,61
Ba	1,03	1,19	1,57	1,58	0,38	0,44	0,58	0,59	3,91	4,51	5,96	5,98
Be	0,11	0,14	0,15	0,15	0,04	0,05	0,06	0,06	0,42	0,52	0,58	0,58
Ca	1076	1435	2336	2349	399	533	867	872	4075	5453	8870	8896
Cd	0,09	0,11	0,13	0,13	0,04	0,04	0,05	0,05	0,36	0,44	0,50	0,50
Co	0,43	0,53	0,63	0,63	0,16	0,20	0,23	0,23	1,61	2,00	2,38	2,38
Cr	0,14	0,18	0,26	0,26	0,05	0,07	0,09	0,10	0,52	0,68	0,97	0,97
Cu	1,48	1,82	2,15	2,16	0,55	0,68	0,80	0,80	5,59	6,92	8,18	8,19
Fe	156	192	227	228	58	71	84	85	589	729	862	862
Hg	0,004	0,005	0,008	0,008	0,002	0,002	0,003	0,003	0,016	0,021	0,031	0,031
K	35,6	44,1	62,7	63,0	13,2	16,4	23,3	23,4	134,8	167,6	237,9	238,7
Mg	82,6	104,0	130,5	131,0	30,6	38,6	48,4	48,6	312,7	394,9	495,4	496,0
Mn	65,1	80,4	90,2	90,4	24,1	29,8	33,4	33,6	246,4	305,2	342,3	342,3
Mo	0,06	0,08	0,12	0,12	0,02	0,03	0,04	0,04	0,23	0,30	0,45	0,45
Na	15,2	18,5	26,7	26,9	5,6	6,9	9,9	10,0	57,5	70,4	101,4	101,9
Ni	0,58	0,72	0,83	0,84	0,21	0,27	0,31	0,31	2,20	2,72	3,16	3,17
P	3,97	5,14	7,35	7,38	1,47	1,91	2,73	2,74	15,05	19,54	27,89	27,94
Pb	0,70	0,88	1,49	1,51	0,26	0,33	0,55	0,56	2,66	3,33	5,67	5,72
S	102	126	177	178	38	47	66	66	388	479	672	673
Sb	0,26	0,33	0,49	0,49	0,10	0,12	0,18	0,18	0,98	1,27	1,87	1,87
Se	0,07	0,09	0,12	0,12	0,03	0,03	0,05	0,05	0,27	0,34	0,47	0,47
Si	65	80	115	116	24	30	43	43	245	305	436	438
Sn	0,06	0,07	0,10	0,10	0,02	0,03	0,04	0,04	0,23	0,28	0,40	0,40
Sr	4,38	5,62	9,18	9,24	1,62	2,08	3,41	3,43	16,56	21,34	34,87	35,01
Te	0,05	0,06	0,09	0,09	0,02	0,02	0,03	0,03	0,19	0,24	0,32	0,32
Ti	5,50	6,80	9,62	9,67	2,04	2,52	3,57	3,59	20,81	25,82	36,52	36,63
V	0,05	0,07	0,10	0,10	0,02	0,03	0,04	0,04	0,21	0,26	0,37	0,37
Zn	14,1	17,2	19,2	19,3	5,2	6,4	7,1	7,2	53,4	65,3	73,1	73,1

Nota: Los datos para el pH son aproximados, ya que el método basado en el equilibrio de masa no es apropiado para el cálculo exacto de dichos valores.

Tabla 6.2 Cálculos de la carga química en equilibrio de masa (mg/l) para la escombrera de roca estéril El Morro

Intervalo de tiempo	Año normal				10 años lluviosos				7 años secos			
	8	12	20	21	8	12	20	21	8	12	20	21
Acidez	12	370	464	466	4	137	173	173	44	1397	1754	1758
Alcalinidad	20	49	73	74	7	18	27	27	75	186	277	278
pH	4,11	3,50	3,50	3,50	4,11	3,50	3,50	3,50	4,11	3,50	3,50	3,50
SO <sub>4</sub>	581	2395	3292	3301	216	888	1223	1224	2195	9036	12426	12460
Ag	0,002	0,008	0,013	0,013	0,001	0,003	0,005	0,005	0,007	0,032	0,047	0,047
Al	1,1	22,7	27,5	27,6	0,4	8,4	10,2	10,2	4,0	85,8	103,9	104,2
As	0,00	0,03	0,05	0,05	0,00	0,01	0,02	0,02	0,01	0,12	0,18	0,18
Ba	0,04	0,26	0,40	0,40	0,02	0,10	0,15	0,15	0,16	1,00	1,49	1,50
Be	0,001	0,059	0,069	0,069	0,000	0,022	0,025	0,025	0,004	0,223	0,259	0,259
Ca	217	626	900	902	81	232	334	335	820	2361	3396	3406
Cd	0,002	0,046	0,054	0,054	0,001	0,017	0,020	0,020	0,006	0,173	0,205	0,205
Co	0,01	0,22	0,26	0,27	0,00	0,08	0,10	0,10	0,04	0,82	1,00	1,00
Cr	0,01	0,07	0,10	0,10	0,01	0,03	0,04	0,04	0,05	0,25	0,37	0,37
Cu	0,02	0,72	0,89	0,89	0,01	0,27	0,33	0,33	0,08	2,72	3,36	3,37
Fe	2	73	91	92	1	27	34	34	9	276	345	346
Hg	0,0004	0,0019	0,0028	0,0029	0,0001	0,0007	0,0011	0,0011	0,0013	0,0073	0,0107	0,0108
K	2,9	14,9	21,3	21,4	1,1	5,5	7,9	7,9	11,1	56,3	80,6	80,8
Mg	5,0	45,1	55,8	55,9	1,9	16,7	20,7	20,7	18,8	170,3	210,6	211,2
Mn	1,0	34,9	40,6	40,7	0,4	13,0	15,1	15,1	3,6	131,8	153,4	153,8
Mo	0,01	0,03	0,04	0,04	0,003	0,01	0,02	0,02	0,03	0,12	0,17	0,17
Na	0,9	6,3	9,0	9,0	0,3	2,3	3,3	3,3	3,2	23,8	33,9	33,9
Ni	0,010	0,291	0,353	0,354	0,004	0,108	0,131	0,131	0,037	1,099	1,333	1,337
P	0,41	2,01	2,83	2,84	0,15	0,75	1,05	1,05	1,53	7,60	10,69	10,72
Pb	0,04	0,28	0,47	0,47	0,01	0,10	0,18	0,18	0,14	1,06	1,78	1,79
S	8	41	59	59	3	15	22	22	29	154	222	223
Sb	0,03	0,13	0,18	0,18	0,01	0,05	0,07	0,07	0,12	0,48	0,69	0,69
Se	0,005	0,028	0,040	0,041	0,002	0,010	0,015	0,015	0,020	0,106	0,153	0,153
Si	5	27	39	39	2	10	15	15	19	102	148	148
Sn	0,005	0,024	0,035	0,035	0,002	0,009	0,013	0,013	0,017	0,091	0,131	0,132
Sr	0,77	2,09	3,14	3,15	0,29	0,77	1,17	1,17	2,91	7,87	11,86	11,89
Te	0,00	0,02	0,03	0,03	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,07	0,10	0,10
Ti	0,42	2,24	3,23	3,24	0,15	0,83	1,20	1,20	1,57	8,44	12,20	12,23
V	0,004	0,022	0,032	0,032	0,002	0,008	0,012	0,012	0,016	0,084	0,122	0,122
Zn	0,1	7,0	8,2	8,3	0,1	2,6	3,1	3,1	0,6	26,6	31,1	31,2

Nota: Los datos para el pH son aproximados, ya que el método basado en el equilibrio de masa no es apropiado para el cálculo exacto de dichos valores.

**Tabla 6.3 Cálculos de la carga química en equilibrio de masa (mg/l) para la escombrera de roca estéril Estrecho:  
Años 1-6 (suponiendo una desviación del 70% del drenaje)**

	<b>Año normal</b>	<b>10 años lluviosos</b>	<b>7 años secos</b>
<b>Intervalo de tiempo</b>	<b>6</b>	<b>6</b>	<b>6</b>
Acidez	129689	48067	490941
Alcalinidad	7	3	28
pH	1,87	1,87	1,87
SO <sub>4</sub>	71851	26630	271996
Ag	0,022	0,008	0,083
Al	264	98	999
As	47,7	17,7	180,6
Ba	0,36	0,13	1,35
Be	0,12	0,05	0,47
Ca	88	33	332
Cd	0,99	0,37	3,76
Co	8,63	3,20	32,67
Cr	3,87	1,43	14,64
Cu	189	70	716
Fe	29892	11079	113156
Hg	14,7	5,4	55,5
K	119	44	451
Mg	325	120	1230
Mn	73,6	27,3	278,8
Mo	1,44	0,533	5,44
Na	153	57	578
Ni	4,62	1,71	17,48
P	6,62	2,45	25,05
Pb	2,62	0,97	9,92
S	27049	10025	102396
Sb	0,09	0,03	0,35
Se	2,9	1,1	10,9
Si	71	26	269
Sn	0,46	0,17	1,73
Sr	8,76	3,25	33,17
Te	6,14	2,28	23,24
Ti	5,50	2,04	20,81
V	0,07	0,03	0,28
Zn	58	21	218

### 6.3.2 Equilibrio de las fases gaseosas y sólidas

El equilibrio de las aguas se permitió en PHREEQC sólo con respecto a lo siguiente:

- Los gases y minerales para los cuales la cinética de la disolución/precipitación probablemente facilita el equilibrio durante el tiempo de residencia estimado del agua que se infiltra en las escombreras de roca estéril de Pascua Lama.
- Las especies que están presentes en las matrices de las escombreras de roca estéril con una abundancia suficiente como para facilitar el equilibrio.

En base a las investigaciones geológicas del sistema hidrotermal de Pascua-Lama (Leonardson et al, 2004), se incluyó la alunita como un control mineralógico clave en todas las simulaciones debido a la abundancia del mineral en la mayoría de los conjuntos de alteración de roca. Se investigó la jarosita como una fase controladora potencial durante las ejecuciones preliminares del modelo PHREEQC, pero se eliminó de las simulaciones posteriores debido a que se descubrió que el mineral precipitaba en un grado no observado empíricamente en ningún material de ensayo de Pascua Lama. En el procedimiento de modelación se permitió el equilibrio de varias otras fases, incluyendo la barita, el yeso, la ferrihidrita, la caolinita y el cuarzo, sujeto a la presencia de elementos constituyentes en concentraciones suficientes en los datos de entrada del equilibrio de masa (Tablas 6.1 a 6.3). La pirita y la ferrihidrita se utilizaron exclusivamente para la simulación inicial de la vida útil de la mina para la escombrera Estrecho.

Cabe señalar que las cargas químicas en equilibrio de masa que formaron los conjuntos de datos de entrada para PHREEQC contienen considerables errores de equilibrio de carga. Esto se rectificó antes del proceso de modelación a través del equilibrio sintético de la carga utilizando  $\text{SO}_4$ .

### 6.3.3 Resultados de PHREEQC

En las Tablas 6.4 a 6.6 se muestran las químicas previstas de las soluciones de lixiviación generadas por PHREEQC utilizando los conjuntos de datos de entrada de equilibrio de masa de Estrecho y El Morro. Se pronostica que las cargas de solutos estarán sujetas a modificación por una gama de reacciones favorecidas termodinámicamente, de las cuales las siguientes son prácticamente universales:

- Precipitación de ferrihidrita, con excepción de las simulaciones para el año 8 para la escombrera Estrecho.
- Estabilización del pH a niveles dentro de un rango típico de los sistemas en equilibrio con respecto a la alunita (3,3–4,4).

En la Tabla 6.7 se presenta un resumen de las principales reacciones de equilibrio pronosticadas.

**Tabla 6.4 Químicas de las filtraciones de PHREEQC (mg/l) para la escombrera Estrecho suponiendo una desviación del 70% del drenaje**

Intervalo de tiempo	Año normal				10 años lluviosos				7 años secos			
	8	12	20	21	8	12	20	21	8	12	20	21
pH	3,94	3,92	3,92	3,92	4,03	4,01	4,01	4,01	3,85	3,84	3,85	3,85
Pe	12,35	12,36	12,36	12,36	12,25	12,27	12,27	12,27	12,43	12,44	12,44	12,44
Alcalinidad	-9,65	-10,45	-10,96	-10,97	-6,80	-7,29	-7,54	-7,54	-17,14	-19,09	-20,68	-20,68
Al	73,81	90,22	98,66	98,84	28,63	34,66	37,47	37,56	281,35	348,91	388,32	388,13
Sb	0,26	0,34	0,50	0,50	0,10	0,12	0,18	0,18	1,01	1,32	1,97	1,98
As	0,06	0,06	0,06	0,06	0,04	0,04	0,04	0,04	0,11	0,10	0,10	0,11
Ba	0,003	0,003	0,003	0,003	0,004	0,004	0,003	0,003	0,002	0,002	0,002	0,002
Be	0,112	0,138	0,155	0,155	0,041	0,051	0,057	0,057	0,433	0,540	0,610	0,610
Cd	0,095	0,116	0,133	0,133	0,035	0,043	0,049	0,049	0,367	0,452	0,525	0,525
Ca	313	298	284	284	375	362	351	350	231	220	210	210
Cl	368	368	370	370	366	366	367	367	375	378	385	385
Cr	0,138	0,180	0,260	0,261	0,051	0,066	0,095	0,096	0,535	0,700	1,025	1,027
Cu	1,48	1,83	2,17	2,18	0,55	0,68	0,80	0,80	5,69	7,11	8,55	8,56
F	0,50	0,50	0,51	0,51	0,50	0,50	0,50	0,50	0,51	0,52	0,53	0,53
Fe	2,26	2,46	2,53	2,53	1,51	1,63	1,68	1,68	4,22	4,72	4,94	4,94
Pb	0,60	0,74	1,25	1,27	0,23	0,29	0,48	0,49	2,12	2,64	4,52	4,57
Mg	460	532	623	624	287	313	346	347	1245	1535	1907	1909
Mn	65,6	81,1	91,4	91,7	24,2	29,9	33,6	33,7	253	316	361	361
Hg	0,004	0,005	0,008	0,008	0,002	0,002	0,003	0,003	0,017	0,021	0,032	0,032
Ni	0,58	0,72	0,84	0,85	0,22	0,27	0,31	0,31	2,26	2,82	3,34	3,34
NO <sub>3</sub>	73,1	73,2	73,6	73,6	72,7	72,8	72,9	72,9	74,6	75,2	76,6	76,6
P	0,20	0,23	0,32	0,32	0,15	0,17	0,23	0,23	0,35	0,42	0,60	0,61
K	0,00001	0,00001	0,00001	0,00001	0,00004	0,00003	0,00003	0,00003	0,000002	0,000002	0,000001	0,000001
Se	0,07	0,09	0,12	0,13	0,03	0,03	0,05	0,05	0,28	0,35	0,49	0,49
Si	4,36	4,35	4,34	4,34	4,38	4,38	4,38	4,38	4,26	4,22	4,18	4,18
Ag	0,021	0,026	0,038	0,039	0,008	0,010	0,014	0,014	0,081	0,102	0,151	0,152
Na	15,30	18,71	27,08	27,29	5,64	6,91	9,96	10,04	59,07	72,97	106,95	107,53



**Tabla 6.4 Químicas de las filtraciones de PHREEQC (mg/l) para la escombrera Estrecho suponiendo una desviación del 70% del drenaje (continuación)**

Intervalo de tiempo	Año normal				10 años lluviosos				7 años secos			
	8	12	20	21	8	12	20	21	8	12	20	21
SO <sub>4</sub>	2394	2769	3175	3182	1505	1627	1758	1761	6903	8545	10361	10367
Zn	14,20	17,36	19,51	19,57	5,24	6,41	7,18	7,20	54,84	67,68	77,06	77,10
Co	0,43	0,53	0,63	0,63	0,16	0,20	0,23	0,23	1,61	2,00	2,38	2,38
Mo	0,06	0,08	0,12	0,12	0,02	0,03	0,04	0,04	0,23	0,30	0,45	0,45
S	102	126	177	178	38	47	66	66	388	479	672	673
Sn	0,060	0,074	0,104	0,105	0,022	0,027	0,039	0,039	0,227	0,281	0,395	0,397
Sr	4,38	5,62	9,18	9,24	1,62	2,08	3,41	3,43	16,56	21,34	34,87	35,01
Te	0,051	0,062	0,085	0,086	0,019	0,023	0,032	0,032	0,194	0,237	0,324	0,325
Ti	5,50	6,80	9,62	9,67	2,04	2,52	3,57	3,59	20,81	25,82	36,52	36,63
V	0,1	0,1	0,1	0,1	0,02	0,03	0,04	0,04	0,2	0,3	0,4	0,4

**Tabla 6.5 Químicas de las filtraciones de PHREEQC (mg/l) para la escombrera El Morro**

Intervalo de tiempo	Año normal				10 años lluviosos				7 años secos			
	8	12	20	21	8	12	20	21	8	12	20	21
PH	4,98	4,01	3,99	3,99	4,91	4,11	4,10	4,10	5,28	3,89	3,89	3,89
Pe	11,30	12,28	12,29	12,29	11,37	12,17	12,19	12,19	11,00	12,39	12,40	12,40
Alcalinidad	-0,65	-7,46	-7,93	-7,93	-0,78	-5,41	-5,71	-5,71	-0,21	-12,31	-13,37	-13,38
Al	0,49	37,15	43,47	43,58	0,58	15,25	17,59	17,61	0,20	136,10	161,20	161,65
Sb	0,03	0,13	0,18	0,18	0,01	0,05	0,07	0,07	0,12	0,49	0,71	0,71
As	0,002	0,009	0,012	0,012	0,001	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02
Ba	0,004	0,004	0,003	0,003	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,002	0,002	0,002
Be	0,001	0,059	0,069	0,069	0,0004	0,022	0,026	0,026	0,004	0,226	0,264	0,265
Cd	0,002	0,046	0,055	0,055	0,0006	0,017	0,020	0,020	0,006	0,175	0,209	0,210
Ca	433	358	344	344	438	404	395	395	416	271	256	256

Tabla 6.5 Químicas de las filtraciones de PHREEQC (mg/l) para la escombrera El Morro (continuación)

Intervalo de tiempo	Año normal				10 años lluviosos				7 años secos			
	8	12	20	21	8	12	20	21	8	12	20	21
Cl	365	366	367	367	365	366	366	366	366	370	373	373
Cr	0,014	0,068	0,097	0,098	0,005	0,025	0,036	0,036	0,052	0,259	0,373	0,374
Cu	0,02	0,72	0,89	0,89	0,01	0,27	0,33	0,33	0,08	2,75	3,41	3,42
F	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,51	0,51	0,51
Fe	0,12	1,68	1,79	1,79	0,14	1,15	1,22	1,22	0,06	2,96	3,18	3,18
Pb	0,03	0,25	0,41	0,41	0,01	0,10	0,16	0,16	0,05	0,89	1,48	1,48
Mg	200	322	362	363	193	236	251	251	232	707	863	865
Mn	1,0	35,1	40,9	41,0	0,4	13,0	15,1	15,1	3,7	134	157	157
Hg	0,0004	0,002	0,003	0,003	0,0001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,007	0,011	0,011
Ni	0,01	0,29	0,36	0,36	0,004	0,11	0,13	0,13	0,04	1,12	1,36	1,36
N(5)	72,6	72,8	72,9	72,9	72,6	72,7	72,7	72,7	72,8	73,7	74,1	74,1
P	0,30	0,18	0,22	0,22	0,13	0,14	0,17	0,17	0,93	0,28	0,37	0,37
K	0,048	0,00003	0,00002	0,00002	0,030	0,00010	0,00008	0,00008	0,334	0,000005	0,000004	0,000004
Se	0,01	0,03	0,04	0,04	0,00	0,01	0,02	0,02	0,02	0,11	0,16	0,16
Si	4,39	4,38	4,37	4,37	4,40	4,39	4,39	4,39	4,39	4,33	4,31	4,31
Ag	0,002	0,008	0,013	0,013	0,001	0,003	0,005	0,005	0,007	0,032	0,048	0,048
Na	0,86	6,33	9,02	9,04	0,32	2,34	3,34	3,34	3,26	24,13	34,55	34,65
SO4	1085	1675	1850	1852	1066	1270	1328	1328	1174	3762	4545	4556
Zn	0,15	7,07	8,28	8,30	0,05	2,62	3,07	3,07	0,56	26,97	31,73	31,82
Co	0,01	0,22	0,26	0,27	0,004	0,08	0,10	0,10	0,04	0,82	1,00	1,00
Mo	0,01	0,03	0,04	0,04	0,003	0,01	0,02	0,02	0,03	0,12	0,17	0,17
S	8	41	59	59	3	15	22	22	29	154	222	223
Sn	0,005	0,024	0,035	0,035	0,002	0,009	0,013	0,013	0,017	0,091	0,131	0,132
Sr	0,77	2,09	3,14	3,15	0,29	0,77	1,17	1,17	2,91	7,87	11,86	11,89
Te	0,004	0,019	0,028	0,028	0,001	0,007	0,010	0,010	0,014	0,073	0,104	0,104
Ti	0,42	2,24	3,23	3,24	0,15	0,83	1,20	1,20	1,57	8,44	12,20	12,23
V	0,004	0,02	0,03	0,03	0,002	0,01	0,01	0,01	0,02	0,1	0,1	0,1

**Tabla 6.6 Químicas de las filtraciones de PHREEQC (mg/l) para la escombrera Estrecho suponiendo una roca estéril compuesta sólo de material calentado por vapor**

	Año normal	10 años lluviosos	7 años secos
Intervalo de tiempo	1-6	1-6	1-6
PH	0,89	0,80	1,38
Pe	15,4	15,5	14,9
Alcalinidad	0,00	0,00	0,00
Al	295	102	1643
Sb	0,10	0,04	0,58
As	53,4	18,5	297
Ba	0,398	0,138	2,213
Be	0,138	0,048	0,769
Cd	1,11	0,38	6,18
Ca	98	34	546
Cl	409	381	600
Cr	4,33	1,50	24,07
Cu	212	73	1177
F	0,56	0,52	0,82
Fe	61493	39611	214039
Pb	2,93	1,01	16,32
Mg	364	126	2022
Mn	82,5	28,5	458,4
Hg	16, 4	5,7	91,3
Ni	5,17	1,79	28,75
N(5)	81,8	76,1	121,2
P	7,41	2,56	41,19
K	133	46	742
Se	3,22	1,11	17,91
Si	2,94	3,28	1,20
Ag	0,025	0,009	0,137
Na	171	59,1	950
SO <sub>4</sub>	183920	126667	587983
Zn	64,4	22,3	358
Co	8,63	3,20	32,67
Mo	1,44	0,53	5,44
S	27049	10025	102396
Sn	0,458	0,170	1,735
Sr	8,76	3,25	33,17
Te	6,14	2,28	23,24
Ti	5,50	2,04	20,81
V	0,1	0,03	0,3

**Tabla 6.7 Precipitación y disolución de los minerales pronosticadas por las simulaciones PHREEQC para las aguas de descarga de las escombreras de roca estéril Estrecho y El Morro (D = disuelto, P = precipitado)**

Escombrera	Pluviosidad	Intervalo de tiempo	Alunita	Barita	Ferrihidrita	Yeso	Caolinita	Cuarzo	Ferrihidrita	Pirita	Cuarzo
			Simulaciones para los años 8 a 21: Estrecho y El Morro						Simulación para el año 8: Estrecho		
Estrecho	Normal	8	P	P	P	P	D	P	—	D	P
		12	P	P	P	P	D	P			
		20	P	P	P	P	D	P			
		21	P	P	P	P	D	P			
	10 año lluv	8	P	P	P	P	D	P	—	D	P
		12	P	P	P	P	D	P			
		20	P	P	P	P	D	P			
		21	P	P	P	P	D	P			
	7 año sec	8	P	P	P	P	D	P	—	D	P
		12	P	P	P	P	D	P			
		20	P	P	P	P	D	P			
		21	P	P	P	P	D	P			
El Morro	Normal	8	P	P	P	D	D	P			
		12	P	P	P	P	D	P			
		20	P	P	P	P	D	P			
		21	P	P	P	P	D	P			
	10 año lluv	8	P	P	P	D	D	P			
		12	P	P	P	D	D	P			
		20	P	P	P	D	D	P			
		21	P	P	P	D	D	P			
	7 año sec	8	P	P	P	P	D	P			
		12	P	P	P	P	D	P			
		20	P	P	P	P	D	P			
		21	P	P	P	P	D	P			

#### 6.3.4 Efectos de la sorción

Los hidróxidos de hierro (HFO) proporcionan una matriz cargada en superficie para la sorción de As y los elementos de transición de la primera fila. La carga (y por ende la capacidad de barrido de los HFO con respecto a los metales/metaloideos disueltos individuales) es variable en función del pH, como se ilustra en la Figura 6.1. Se aplicó un modelo de sorción de dos capas (TLSM) a los datos de salida PHREEQC para todos los escenarios de filtraciones de las escombreras de roca estéril con el fin de cuantificar este efecto. Los sitios de sorción se calcularon utilizando la masa de ferrihidrita precipitado. Dentro del rango de pH definido por las aguas de las escombreras de roca estéril de Pascua-Lama, se pronostica una significativa adsorción de As, Pb y Cu. Las modificaciones de las químicas de PHREEQC para las aguas de las filtraciones de las escombreras Estrecho y El Morro como consecuencia de la sorción se incorporan en los datos presentados en las Tablas 6.4 a 6.6.

### 6.4 Consecuencias de los resultados del modelo geoquímico

#### 6.4.1 Visión general

En la Tabla 6.8 se presenta un resumen de las químicas para el mejor y peor de los casos para la descarga pronosticada desde las escombreras de roca estéril Estrecho y El Morro modelada en los cuatro intervalos de tiempo para la vida útil de la mina y los tres escenarios climáticos descritos anteriormente. A través de la vida útil de la mina, la acidez y la carga de solutos de las filtraciones derivan principalmente del componente de infiltración rápida de la descarga total desde el pie de las escombreras. Este componente de descarga volumétricamente pequeño y altamente contaminado es diluido en forma variable por el drenaje (que está sujeto a la interacción con una superficie de roca estéril reactiva relativamente pequeña). Por consiguiente, las filtraciones de peor calidad están asociadas casi universalmente al escenario climático de 7 años secos, en tanto que las menores concentraciones de contaminantes están asociadas a las condiciones de 10 años lluviosos.

#### 6.4.2 Vida útil inicial de la mina

Durante la vida útil inicial de la mina (años 1-6), toda la roca estéril será enviada a Estrecho. Se pronostican calidades extremadamente pobres de las infiltraciones para esta escombrera durante los primeros años de operación debido al alto aporte (alrededor del 50%) de roca estéril calentada por vapor a la masa total en dicho período. En contraste con otros tipos principales de litología-alteración del depósito de Pascua, las unidades calentadas por vapor no tienen un contenido abundante de alunita, la que actúa como un estabilizador del pH de las filtraciones durante la interacción entre el agua y la roca con otros litotipos. Por lo tanto, la oxidación de la pirita y la disolución de los sulfatos hipogénicos en la roca estéril calentada por vapor da como resultado la rápida depresión del pH del agua de contacto y la concomitante movilización de metales trazas.

En condiciones de bajo drenaje (por ejemplo, durante los episodios de años secos), se pronostica que las filtraciones durante la vida útil inicial de la mina desde Estrecho tendrán un pH tan bajo como 0,8%, con cargas máximas de solutos de >500.000 mg/l de SO<sub>4</sub>, 1.643 mg/l de Al, 297 mg/l de As, 6,1 mg/l de Cd, 1177 mg/l de Cu, >214.000 mg/l de Fe y 358 mg/l de Zn. Esta química es análoga a grandes rasgos con la observada en las soluciones de lixiviación derivadas de los ensayos de 'crib' de Pascua Lama (que también estaban dominados por material calentado por vapor). Durante el período de 1998-99, los ensayos 'crib' arrojaron un pH mínimo de 1,5, con 221.000 mg/l de SO<sub>4</sub>, 18.000 mg/l de Al, 17.000 mg/l de Fe, 900 mg/l de As y 4.700 mg/l de Cu (SRK, 1999).

Se pronostica que las condiciones climáticas normales y de 10 años lluviosos producirán cargas de solutos de hasta un orden de magnitud inferiores a las pronosticadas para las condiciones de 7 años secos. Sin embargo, estas aguas tendrían una calidad extremadamente pobre.

Durante las fases iniciales del desarrollo de la instalación Estrecho, los valores máximos previstos para las filtraciones desde el pie de la escombrera para el pH, Al, Sb, As, Cd, Cl, Cr, Cu, Fe, Hg, Pb, Mn, Ni, NO<sub>3</sub>, Se, SO<sub>4</sub>, Zn, Co y Mo no cumplirían con los criterios de descarga de la norma chilena DS90, lo que permitiría inferir un requisito directo de tratamiento. En la mayoría de los casos, los valores mínimos pronosticados para estos parámetros también excederían los límites formativos de DS90.

#### 6.4.3 Etapas finales de la vida útil de la mina y post-cese

Las predicciones de las filtraciones para las escombreras de roca estéril Estrecho y El Morro para los intervalos de tiempo de 8, 12 y 20 años y post-cese muestran una variación relativamente baja sobre aquella controlada por la condición climática. Para Estrecho, el rango de pH de las filtraciones se pronostica en aproximadamente 3,8–4,1, lo que es consistente con un sistema controlado principalmente por la estabilización de la alunite. Se prevé que las concentraciones máximas de sulfatos excederán los 10.000 mg/l en las condiciones de flujo de 7 años secos, con concentraciones mínimas de aproximadamente 1.500 mg/l durante las condiciones de 10 años lluviosos. Se prevé que las concentraciones máximas de Al, As, Cd, Cu, Fe y Zn serán de 418 mg/l, 1,7 mg/l, 0,5 mg/l, 8,6 mg/l, 4,9 mg/l y 77 mg/l respectivamente.

Las químicas de las filtraciones modeladas para la escombrera El Morro para los intervalos de tiempo de 8, 12 y 20 años y post-cese generalmente son de mejor calidad que las pronosticadas para Estrecho. Esto refleja la proporción muy baja de material calentado por vapor (<5%) que se depositará en el sitio El Morro durante la vida útil de la mina y el mayor factor de dilución del drenaje en la descarga total desde esta escombrera. El rango de pH pronosticado para las filtraciones de El Morro corresponde a alrededor de 3,8–5,2, con concentraciones máximas (7 años secos) de SO<sub>4</sub>, Al, Fe, As y Cu de 4.595 mg/l, 173 mg/l, 3,2 mg/l, 0,18 mg/l y 3,4 mg/l respectivamente.

**Tabla 6.8 Resumen de las químicas de las filtraciones de las escombreras de roca estéril de Pascua Lama. Los valores para el mejor y el peor de los casos se han extraído de las ejecuciones del modelo adaptadas a una diversidad de condiciones climáticas, intervalos de tiempo para la vida útil de la mina y procesos geoquímicos**

	Estrecho Años 1-6		Estrecho Año 8 a post-cese		Morro Año 8 a post-cese	
	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx
<b>PH</b>	1,38	0,8	4,03	3,83	5,28	3,88
<b>Alcalinidad</b>	0	0	0	0	0	0
<b>Al</b>	102	1643	28,6	418,0	0,2	173
<b>Sb</b>	0,04	0,58	0,1	1,9	0,01	0,71
<b>As</b>	18,5	297	0,04	1,7	0	0,18
<b>Ba</b>	0,138	2,213	0,002	0,003	0,004	0,004
<b>Be</b>	0,048	0,769	0,041	0,611	0	0,26
<b>Cd</b>	0,38	6,18	0,035	0,525	0,0006	0,21
<b>Ca</b>	34	546	210	351	256	438
<b>Cl</b>	381	600	366	385	365	373
<b>Cr</b>	1,5	24,07	0,051	1,027	0,005	0,37
<b>Cu</b>	73	1177	0,55	8,64	0,01	3,4
<b>F</b>	0,52	0,5	0,5	0,53	0,5	0,5
<b>Fe</b>	39611	214039	0,37	4,94	0,02	3,2
<b>Pb</b>	1,01	16,32	0,23	6,03	0,01	1,8
<b>Mg</b>	126	2022	287	1909	193	865
<b>Mn</b>	28,5	458,4	24	361	0,4	157
<b>Hg</b>	5,7	91,3	0,002	0,032	0	0,01
<b>Ni</b>	1,79	28,75	0,22	3,34	0	1,36
<b>NO<sub>3</sub></b>	76,1	121,2	72,7	76,6	72,6	74,1
<b>P</b>	2,56	41,19	0,15	29,47	0,13	10,9
<b>Se</b>	1,11	17,91	0,03	0,49	0	0,16
<b>Na</b>	60	950	5,6	108	1	35
<b>SO<sub>4</sub></b>	126000	587000	1505	10460	1066	4595
<b>Zn</b>	22	358	5,2	77,1	0,05	31,8
<b>Co</b>	3,2	32,6	0,16	2,38	0,01	1,0
<b>Mo</b>	0,53	5,44	0,02	0,45	0,001	0,17
<b>V</b>	0,03	0,30	0,02	0,4	0,002	0,1

Nota: Los valores de pH máximos y mínimos se han invertido con el fin de reflejar la concentración de H<sup>+</sup>.  
Las concentraciones de Al no son conservadoras debido a que se presume el equilibrio de la alunita.

## 6.5 Consideraciones adicionales en la interpretación de los datos de las filtraciones desde las instalaciones

Una aplicación significativa de los datos del modelo de filtraciones de las escombreras de roca estéril para Pascua Lama es la definición de una estrategia de mitigación apropiada a los riesgos de DAR a largo plazo, incluyendo el diseño de la AWTP. Las estimaciones de WMC de la química de las filtraciones modelada simulan, en la mayoría de los aspectos, la calidad del agua del pie de las instalaciones.

Esta puede diferir considerablemente del abastecimiento de entrada a la planta AWTP derivado de las piletas de colección/evaporación con tiempos de residencia característicamente prolongados. Pueden producirse modificaciones significativas de la química del agua durante el almacenamiento debido a:

- 1) La mezcla en las piletas (a lo largo de períodos de meses/años) de la descarga desde el pie de las escombreras generada en condiciones climáticas variables y con diferentes caudales de drenaje/infiltración desde las escombreras.
- 2) La precipitación de las fases sólidas (con pérdidas concomitantes de la carga disuelta) durante el equilibrio cinéticamente restringido de las aguas que ingresan inicialmente a las piletas de retención en estado de sobresaturación.
- 3) La precipitación de los metales durante la dilución de las aguas almacenadas con bajo pH con aguas con un mayor pH generadas durante los períodos de alto volumen de drenaje en las escombreras.
- 4) La adsorción de una diversidad de metales y metaloides, específicamente As y Cu, para precipitar los hidróxidos en las piletas, con una eficiencia controlada por el tiempo de residencia y el pH ambiente.

Además, es preciso recalcar que el enfoque de modelación de WMC contempló el equilibrio de todas las soluciones con respecto a una o más fases del Fe (Ferrihidrita, etc.). Esto puede traducirse en una subestimación de las concentraciones de Fe en el pie de las instalaciones debido a la supersaturación común de las aguas de mina en estrecha cercanía con su término de fuente. Sin embargo, la etapa de equilibrio del proceso de modelación podría representar con mayor fidelidad la carga de Fe del agua que ingresa a la AWTP, que ha estado sujeta a un almacenamiento prolongado en las piletas de retención. Por lo tanto, en general se espera que las desviaciones de las químicas modeladas por WMC derivadas del equilibrio de las soluciones supersaturadas sean consideradas como un aspecto principal en el diseño de la AWTP. Una excepción a esto puede ser el caso de la descarga desde Estrecho durante la vida útil inicial de la mina, para la cual se pueden anticipar considerables pérdidas de la carga disuelta de Fe, Al y otros metales en el ambiente de las piletas, debido a la precipitación tanto de precipitado de neutralización de cal sulfatado como de hidróxido.



**Figura 6.1 Dependencia del pH de la sorción de elementos trazas por hidróxidos de hierro (el rango de pH definido por la modelación PHREEQC de las aguas de las escombreras de roca estéril de Pascua Lama se indica mediante las líneas verticales cortadas)**

