



## Glaciares Rocosos:

### *La Base Científica para su Protección*

Alexander Brenning

Department of Geography and  
Environmental Management  
University of Waterloo  
Waterloo, Ontario, Canada

Waterloo



## Contenido

- Que es un Glaciar Rocoso?
- Distribucion e Importancia Hidrologica en Chile
- Intervenciones Mineras
- Hacia la Proteccion de Glaciares Rocosos
- Conclusiones

Waterloo



Que es un Glaciar  
Rocoso?

Waterloo

# Glaciar Rocosos (o de Roca, o de Escombros)

- Expresion geomorfológica del **permafrost reptante de montaña**
  - Velocidad del movimiento superficial: decímetros por año
  - ~40-60% hielo
  - **Permafrost** = suelo permanentemente congelado
- *Indicador* de permafrost de montaña
- Importantes almacenes de agua congelada



Foto: D. Trombotto, Mendoza

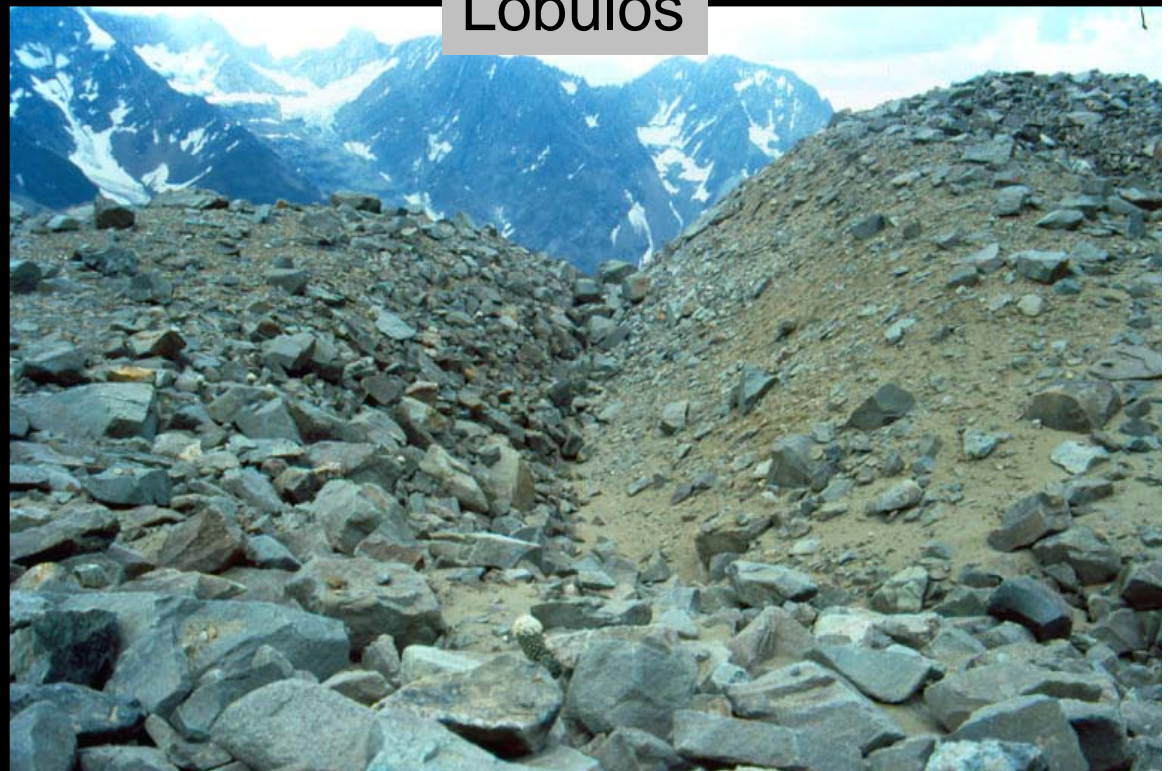
Vease p.ej. Barsch (1996)

# Waterloo

Escarpe frontal convexo



Lobulos



# Modelo de Desarrollo

- Acumulación de escombros
  - Escombros gravitacionales al pie de una vertiente
  - y/o escombros morenicos
- Desarrollo de hielo subterráneo perenne (permafrost)
  - Hielo sedimentario
  - Hielo de congelamiento
  - Hielo muerto



Barsch (1996)

# Cerro Catedral (4765 m)

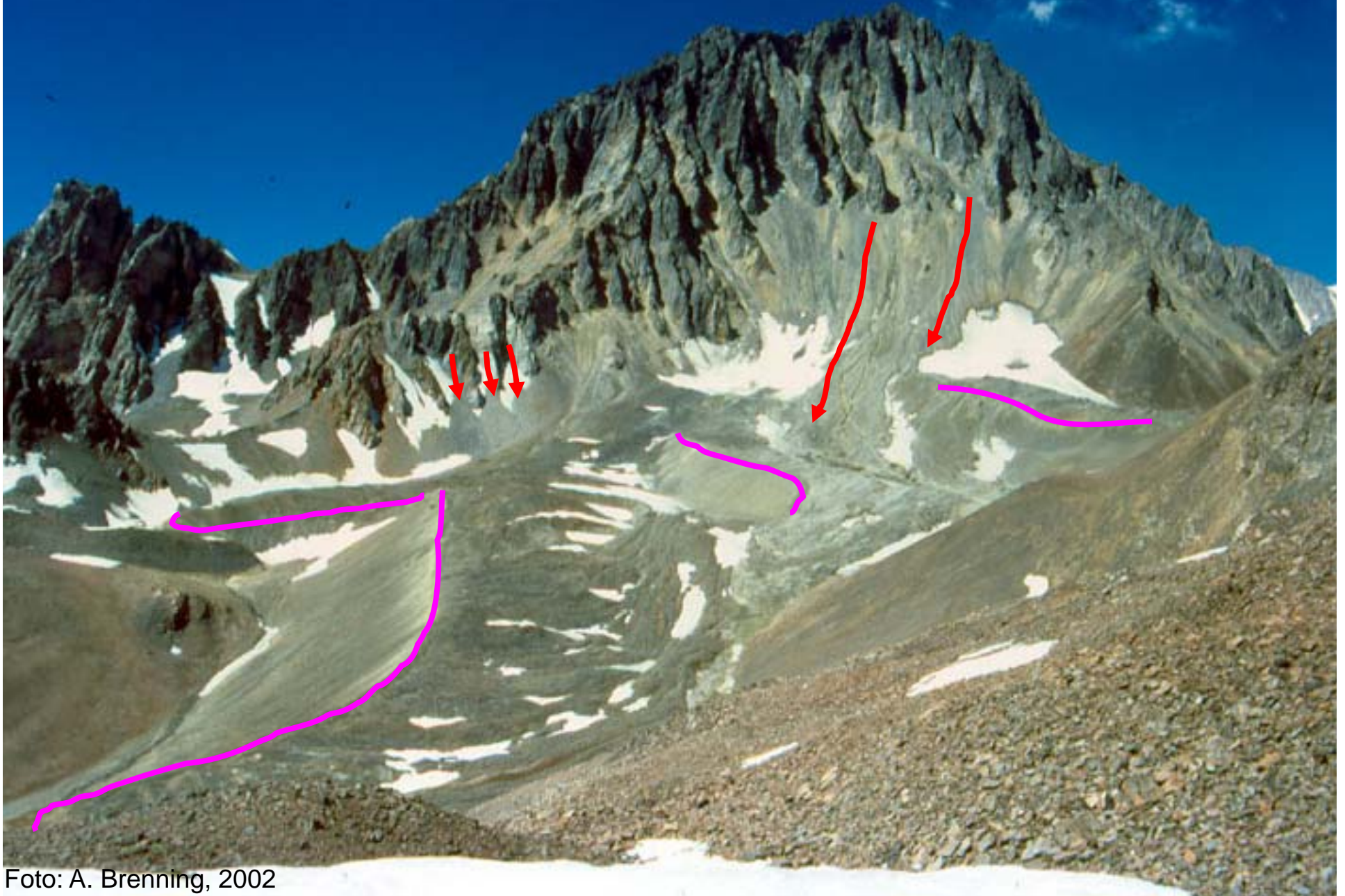


Foto: A. Brenning, 2002



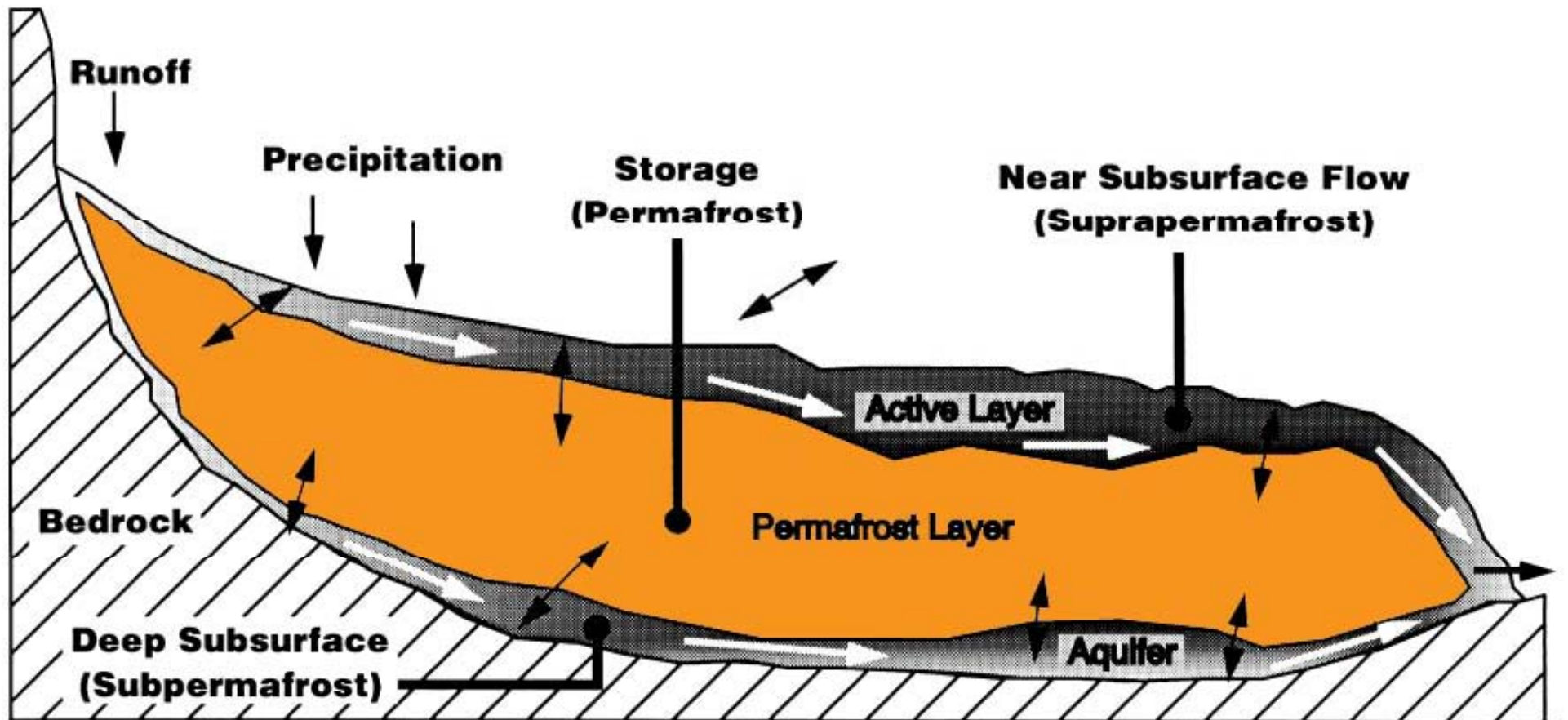
Foto: A. Brenning, 2002



# Waterloo



# Flujo de Agua en Glaciares de Escombros



Burger et al. (1999),  
basado en Haeberli (1985)

Waterloo

---

## Distribucion e Importancia en Chile



# Waterloo

# Cerro San Ramón



# Waterloo

Brenning (2005)

Glaciar Bello  
4,8 km<sup>2</sup>

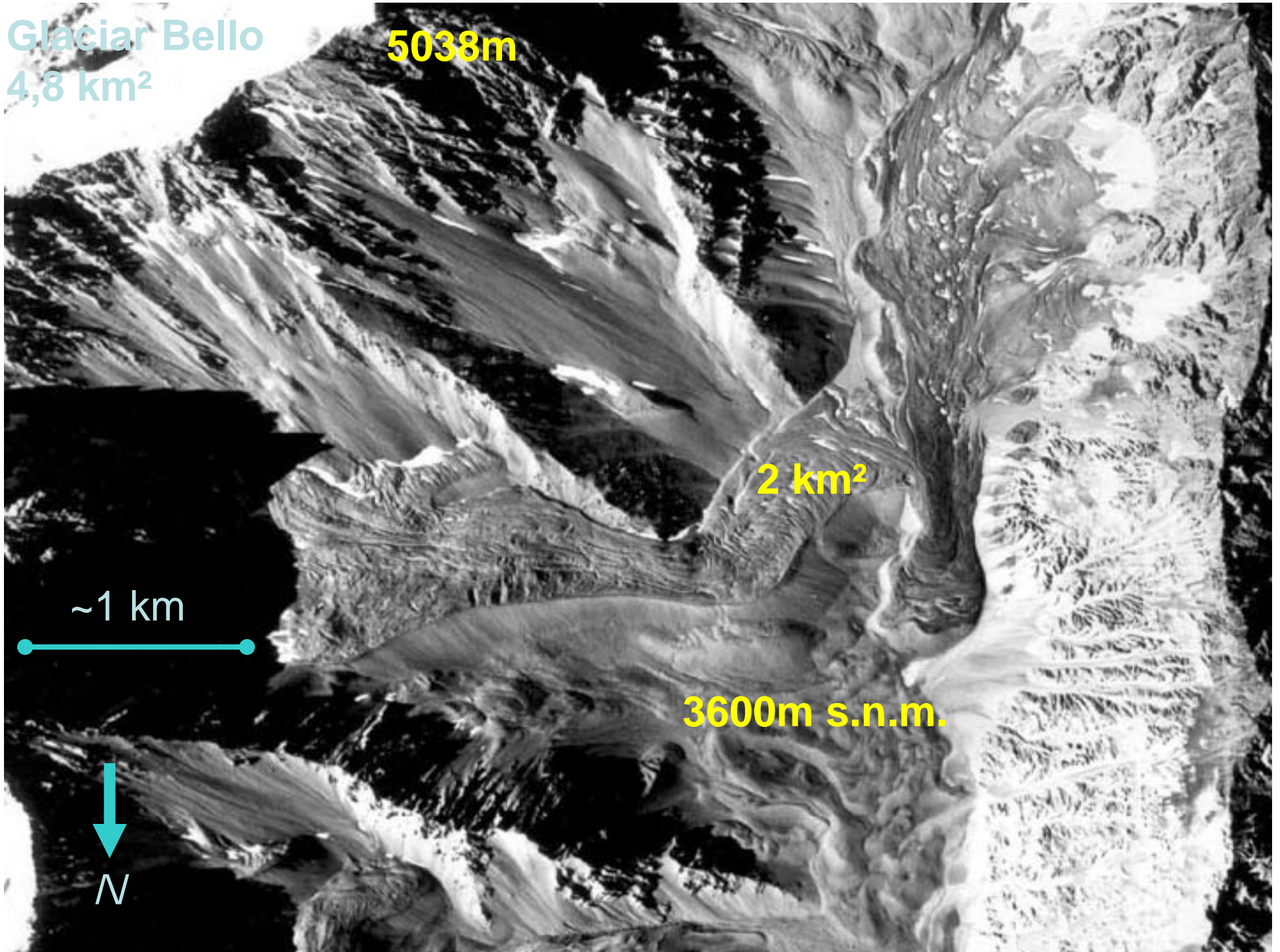
5038m

2 km<sup>2</sup>

~1 km

3600m s.n.m.

↓  
N



# Hacia el Norte

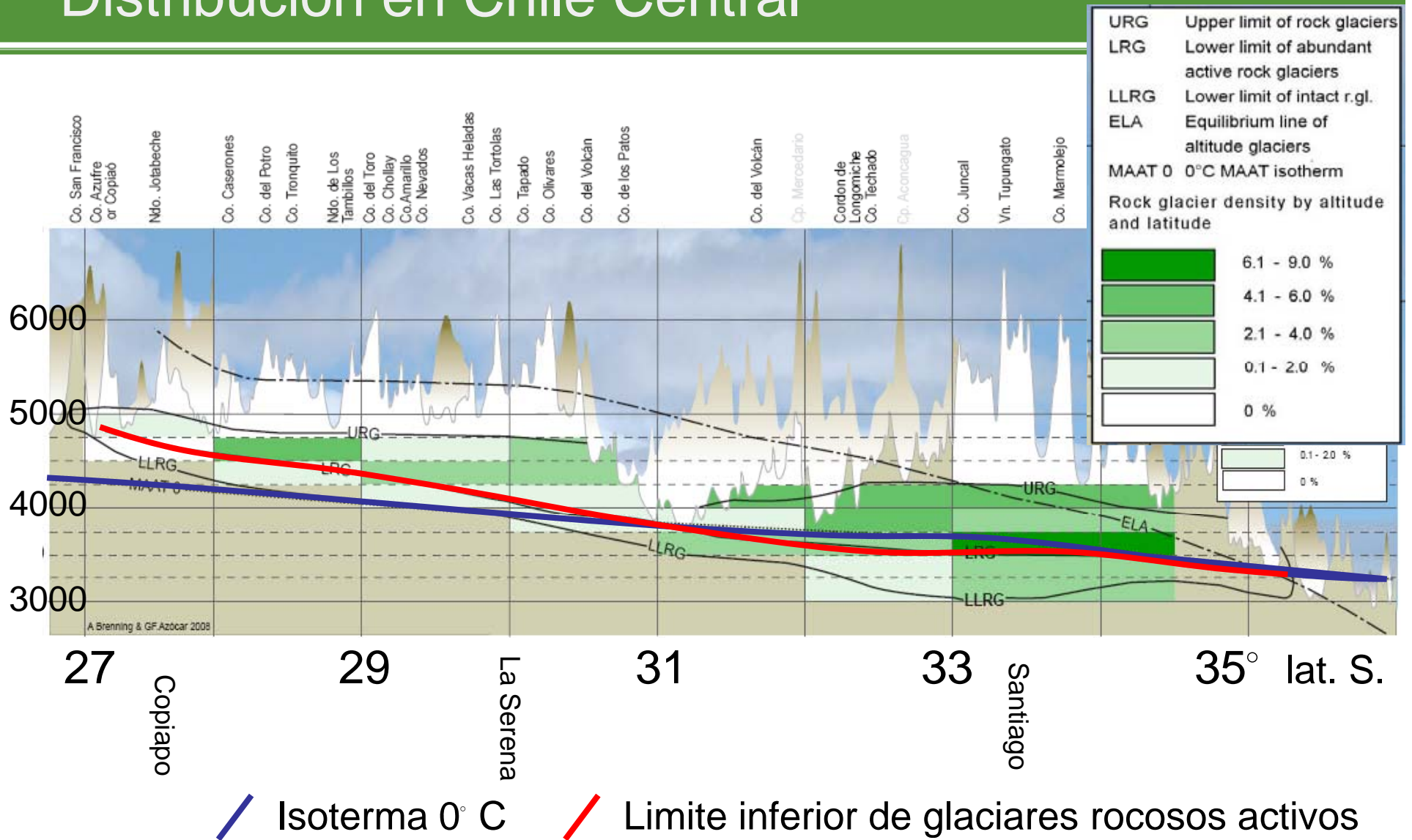


Imagen satelital del glaciar rocoso Barriales I, Pascua-Lama

- Excelentes condiciones para el desarrollo de GE en los Andes semiaridos hasta los  $28^{\circ}\text{S}$
- Distribucion interrumpida entre los  $27^{\circ}\text{S}$  y  $23.5^{\circ}\text{S}$   
Brenning (2005)

Waterloo

# Distribucion en Chile Central



# Area y Equivalente en Agua

Region	Area de GR	Equivalente en agua de GR	Relacion GR : glaciares
Chile, 27°-29°S	22 km <sup>2</sup>	350 mill. m <sup>3</sup>	1 : 3
Chile, 29°-32°S	70 km <sup>2</sup>	1130 mill. m <sup>3</sup>	<b>3 : 1</b>
Chile, 32°-33°S	55 km <sup>2</sup>	890 mill. m <sup>3</sup>	?
Chile, 33°-34.5°S	312 km <sup>2</sup>	3500 mill. m <sup>3</sup>	1 : 7
Alpes Suizos			1 : 83
Kazajistan / Kirgistan			1 : 31

No hay glaciares en las cuencas de los rios Limari y Choapa:  
Pero hay glaciares rocosos!

Azocar & Brenning (enviado),  
Brenning (2005)

# Waterloo



---

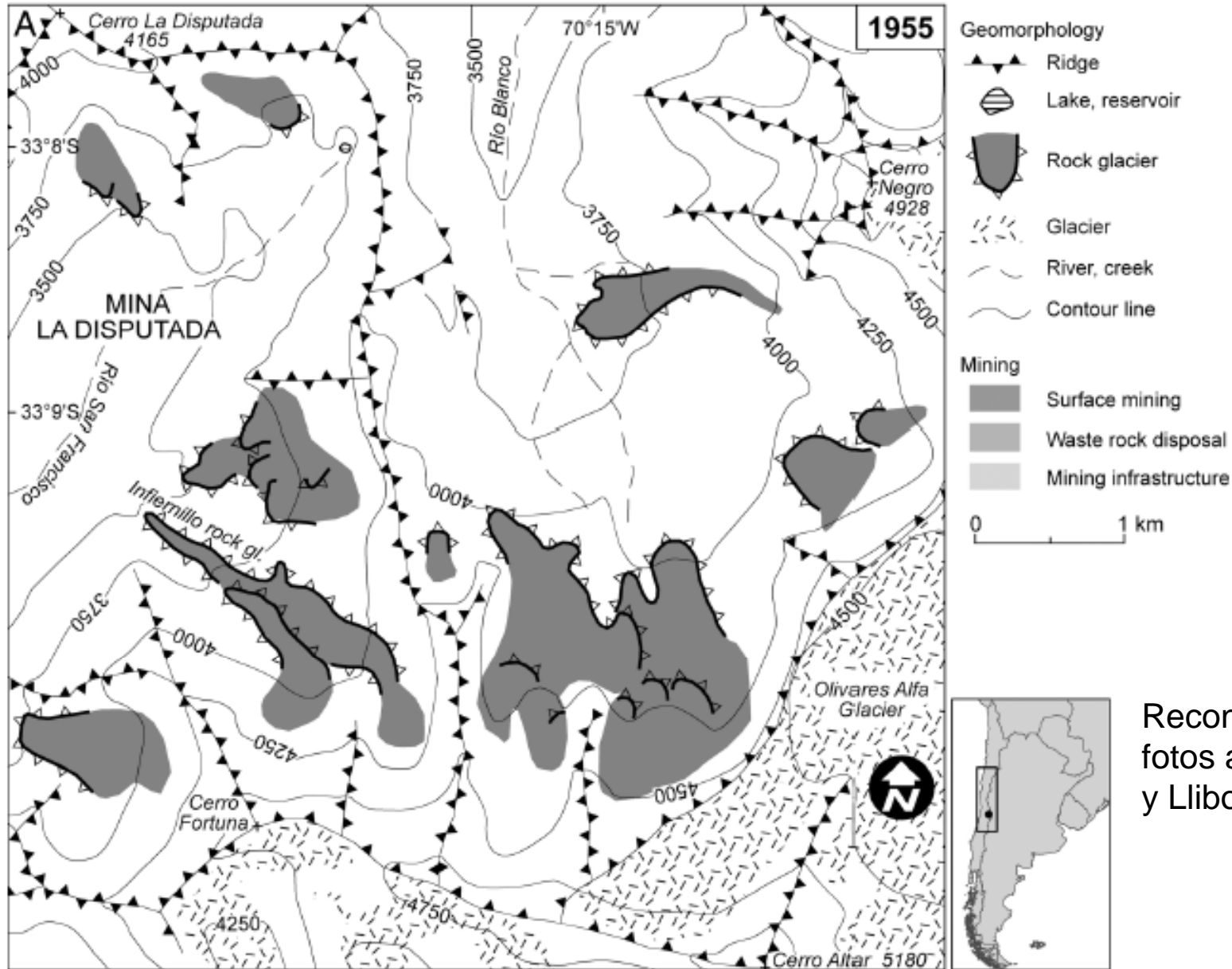
## Intervenciones Mineras en Glaciares Rocosos



Waterloo



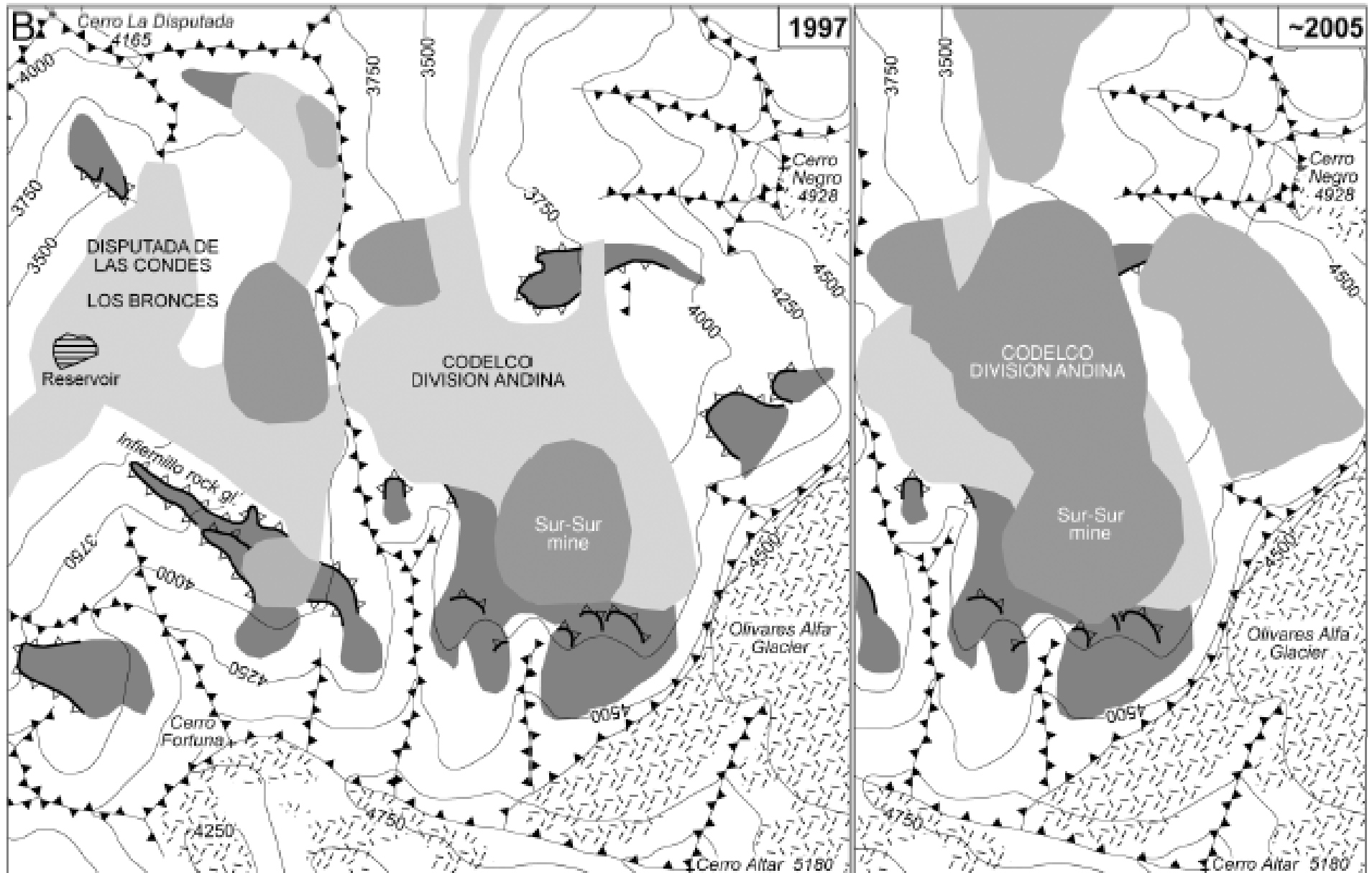
# Los Bronces, 1955 – Andes de Santiago



Reconstruido a partir de fotos aereas HYCON y Liboutry (1956)

# Los Bronces, 1997 / 2005

Basado en fotos aéreas GEOTEC (1997),  
y estudios de impacto ambiental



# Glaciares Rocosos Afectados por Minería

*Rock Glacier Area and Ice Volumes Affected by División Andina and Los Bronces Mines*

	DIVISIÓN ANDINA	LOS BRONCES
Original rock-glacier area <sup>a</sup> (km <sup>2</sup> )	2.6	1.9
Alteration until 1997 <sup>a</sup>		
Removed by open-pit mining (km <sup>2</sup> )	0.5	0.2
Covered by waste rock deposits (km <sup>2</sup> )	—	0.2
Affected by mining infrastructure (km <sup>2</sup> )	0.2	0.4
Water equivalent affected until 1997 <sup>b</sup> (10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )	>5	>6
Alteration 1997–2005 <sup>c</sup>		
Removed by open-pit mining (km <sup>2</sup> )	0.82	n.a.
Degraded (waste rock, infrastructure) (km <sup>2</sup> )	0.58	n.a.
Water equivalent affected 1997–2005 <sup>b</sup> (10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )	10	n.a.

<sup>a</sup>Calculated from aerial photographs (Hycon, no. 4300, and Geotec, flight Juncal, no. 5585) and the environmental impact studies of Geotécnica Consultores (1996) and Arcadis Geotécnica (2001).

<sup>b</sup>Calculated assuming a minimum permafrost thickness of 20 m, an ice content of at least 40%, and an ice density of 0.9 g/cm<sup>3</sup> (Brenning 2005b).

<sup>c</sup>Expansion project of División Andina, data from Arcadis Geotécnica (2001).

Brenning (2008)

# EIA Codelco Division Andina (2001)

## ARCADIS GEOTECNICA

EIA Proyecto Expansión

División Andina

Evaluación de Impactos Ambientales

Las superficies del glaciar de roca que serán afectadas por el proyecto de expansión se presentan en el siguiente cuadro:

SECTOR	SUPERFICIE
Superficie Total Glaciares de Roca Sur-Sur	3,17 Km <sup>2</sup>
Glaciares de Roca Sector Poniente (Glaciar de Roca Rincónada)	1,23 Km <sup>2</sup>
Glaciares de Roca Sector Oriente (Glaciar de Roca Río Blanco)	1,94 Km <sup>2</sup>
Superficie de Glaciares de Roca que serán Afectadas por Rajo Final Caso Expansión	0,82 Km <sup>2</sup>
Superficie de Glaciares de Roca que serán Afectadas por Botaderos Finales Caso Expansión	0,58 Km <sup>2</sup>
Superficie de Glaciares de Roca que Actualmente no ha sido Alterada y será Afectada por Caso Expansión	0,63 Km <sup>2</sup>
Superficie Total de Glaciares de Roca a ser Afectada por Caso Expansión	1,4 Km <sup>2</sup>

Fuente: IAL Ltda.

La extensión del rajo sur-sur hacia el Este y Sur-Este, aumentará la actual alteración sobre el Glaciar de Roca Río Blanco. La superficie del glaciar de roca que será alterada por este motivo es de 0,82 km<sup>2</sup>. Sobre el glaciar de roca Río Blanco se encuentra algunos botaderos que también tendrán que ser removidos por causa del aumento superficial del rajo. El botadero N° 2 se emplazará en un cuerpo de glaciar de roca. El área total de glaciares que será alterada por el proyecto expansión corresponde a 1,4 km<sup>2</sup>. Parte de esta área ya se encuentra alterada por los actuales botaderos o por la extensión del rajo sur-sur, por ello el área real que será afectada por este proyecto corresponde a 0,63 km<sup>2</sup>. No se afectarán glaciares de mantos de hielo de las altas cumbres.



# Codelco Division Andina / Disputada de las Condes

Foto aerea: Conaf-Conama, 2001



**Deposito de lastre  
GR Infiernillo**

# Glaciar Rocoso Infiernillo (Los Bronces)

INSTITUTO DE INGENIEROS DE MINAS DE CHILE

43a CONVENCION

DEPOSITO DE LASTRE GLACIAR INFIERNILLO SUR  
MINA LOS BRONCES

ALEJANDRO CONTRERAS C.  
Geólogo Senior, Area Los Bronces

CIA. MINERA DISPUTADA DE LAS  
CONDES S.A.

JOSE LUIS ILLANES N.  
Ingeniero Geotécnico  
GEOTÉCNICA CONSULTORES

LA SE

*Landslides: Evaluation and Stabilization, Lacerda, Ehrlich, Fontoura & Sayão (eds)  
© 2004 Taylor & Francis Group, London, ISBN 04 1535 665 2*

Stability issues in natural and man made slopes in mining

Luis Valenzuela  
*Arcadis Geotécnica (formerly Geotécnica Consultores), Chile*

# Depositos de Lastre sobre Glaciares Rocosos

## **Los Bronces: GR Infiernillo** (Contreras & Illanes, 1992; Valenzuela, 2004)

- 1988-1990: Creacion de dos depositos de lastre de 40 m de espesor a los 4000 m s.n.m.
  - 22 ha, 14 millones de toneladas
- Fuerte aumento de la velocidad inmediatamente despues del comienzo de la depositacion
  - **20 cm por dia, y 25 m por año!**
- Se abandono plan de depositar 44 millones de toneladas.
- En la actualidad, la tasa desplazamiento varia entre 1 y 13 m por año.



Waterloo

# Depositos de Lastre sobre Glaciares Rocosos

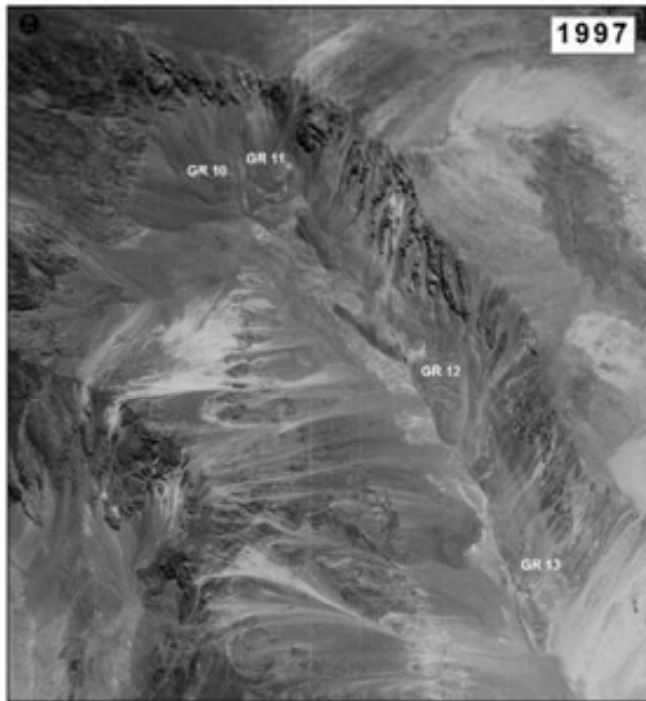
## **Division Andina** (Apablaza et al., 2001)

- Creacion de un deposito de lastre de 20 m de espesor hasta 1998.
- Tasa de desplazamiento maxima: **30-35 m por año**
- “...causando **inestabilidades** en las partes superiores del rajo y afectando las operaciones de la mina...” (Apablaza et al., 2001)
- Como consecuencia, comenzaron un monitoreo de los desplazamientos.
- Se removio material del deposito hasta reducir las tasas de desplazamientos a 20 m por año, lo que se considera controlable.



Waterloo



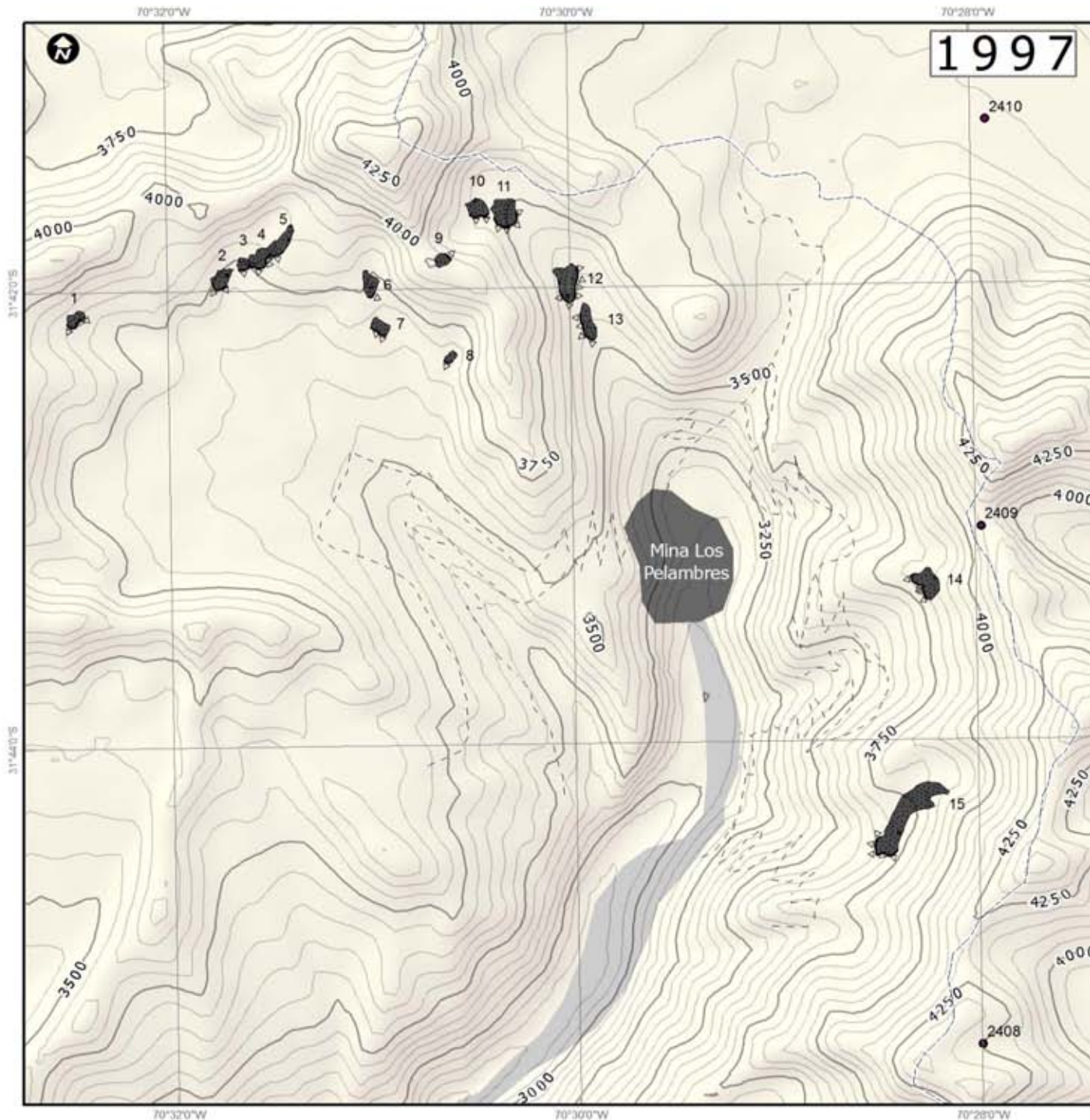


## Cia. Minera Los Pelambres

- 15 GR en la cuenca de Pelambres
- 4 GR casi completamente cubiertos por botaderos
- 2 GR afectados por caminos
- Principalmente en cercanías del rajo
- Equivalente en agua: 1.9 – 2.8 millones de m<sup>3</sup>
- Intervenciones posteriores a 2000
- Geoestudios (1998) identifica GR

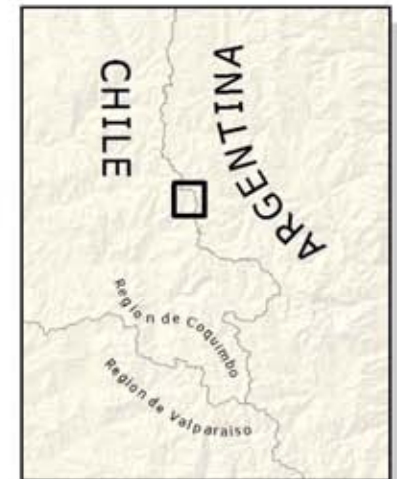
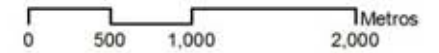
Azocar & Brenning (2008)

# Waterloo



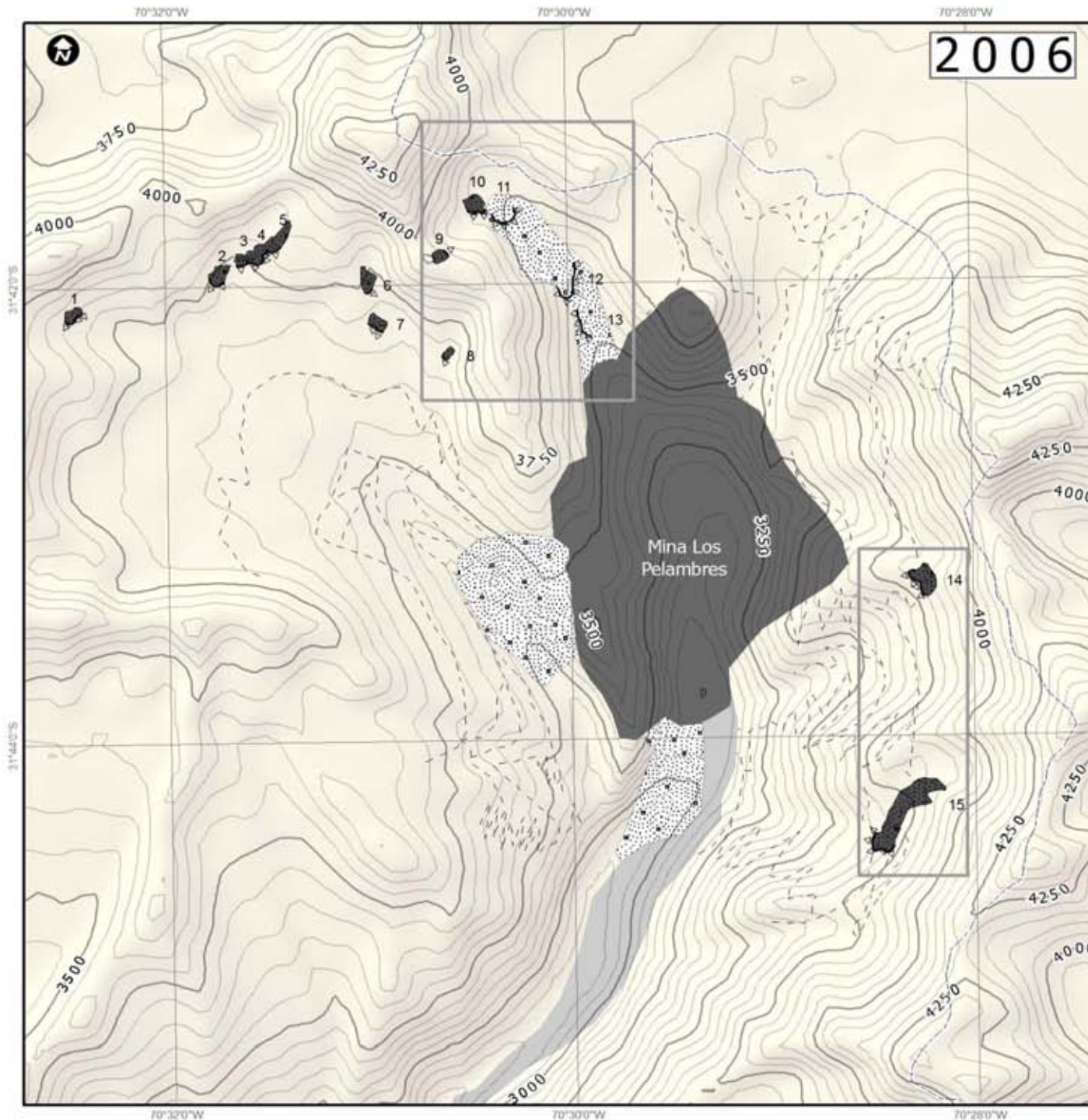
## LEGENDA

-  Glaciar Rocoso
-  Limite Internacional
-  Curva de nivel
- Mineria**
-  Area de explotación
-  Infraestructura minera
-  Caminos de exploración



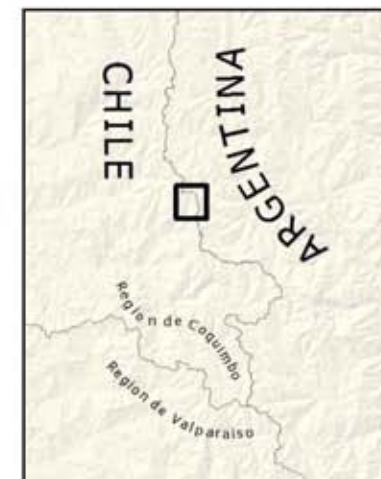
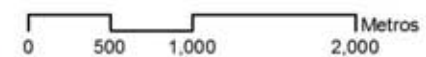
Cartografía sobre la base de imagen SAF-GEOTEC 1997 y curvas SRTM

Trazado de limite internacional aproximado, no oficial.



## LEGENDA

-  Glaciar Rocoso
  -  Limite Internacional
  -  Curva de nivel
- ### Mineria
-  Area de explotación
  -  Infraestructura minera
  -  Botadero de esteril
  -  Caminos de exploración



Cartografía sobre la base de imagen SAF-GEOTEC 1997 y curvas SRTM

Trazado de límite internacional aproximado, no oficial.

# Problemas de Estabilidad

Valenzuela (2004) enfatiza que

- **no ha recibido la atencion suficiente** la posibilidad de una falla de una ladera con un consecuente **flujo detritico** que puede desplazarse una distancia significativa valle abajo.

Valenzuela (2004) tambien se refiere a un incidente en mayo 1992 cuando

- se **desprendio** un deposito de lastre a gran altura “en una mina de cobre cercana a Santiago” (Andina?), movilizando 10 millones de toneladas de roca.
- “Si el rajo no hubiera estado, los escombros podrian haber alcanzado el chancador y otras instalaciones.”  
(Valenzuela, 2004)

Stability issues in natural and man made slopes in mining

Luis Valenzuela

Arcadis Geotécnica (formerly Geotécnica Consultores), Chile

Landslides: Evaluation and Stabilization, Lacerda, Ehrlich, Fontoura & Savão (eds)  
© 2004 Taylor & Francis Group, London, ISBN 04 1535 665 2

Waterloo

# Problemas de Estabilidad

Los efectos de depositos en GR no se pueden predecir:

- Degradacion del permafrost de GR?
  - Alteracion de la conductividad termica de la capa activa?
  - Calentamiento geotermico?
  - Escala de tiempo: **Decadas a siglos**
- GR degradados serian una base ideal para flujos detriticos.
  - Mezcla de escombros y agua de fusion
- Se debe evitar todo tipo de construccion en GR
  - (Burger et al. 1999; Giardino & Vick, 1985)



# Waterloo

# Otros Efectos de Largo Plazo

- Manejo de sustancias toxicas
  - Combustibles
- **Acid Rock Drainage**
  - Reacciones geoquimicas en la roca extraida de profundidad
  - Movilizacion de metales pesados
  - Solucion: Manejo de aguas de la mina.



Waterloo

# Intervenciones Pasadas y Actuales

Proyecto	Desde	EIA?	Area afectada	Equivalente en agua
CODELCO Division Andina	Años 1990	Si	2.1	15 – 23 mill. m <sup>3</sup>
Disputada de Las Condes	1988	No (*)	0.8	6 - 9 mill. m <sup>3</sup>
Los Pelambres	No antes de 2001	Si	0.26	2 - 3 mill. m <sup>3</sup>

(\*) EIA de 1996 no menciona existencia de glaciares rocosos

Contreras & Illanes (1992); Brenning (2008), Azocar & Brenning (2008)  
...y varios Estudios de Impacto Ambiental



# Waterloo

# Posibles Impactos Futuros

Proyecto	Ubicacion	Comentario	Fuente
Cerro Catedral	R.M. (Gasco)	Caminos de exploracion construidos sobre GR (despues de 1996)	Observaciones propias en terreno (2002)
Pascua-Lama	III	GR inicial activo (0.3 km <sup>2</sup> / 0.1-0.2 mill. m <sup>3</sup> ) sera cubierto por roca esteril	EIA aprobado en 2006
Aldebaran (Cia. Min. Nevada)	III	Camino sobre posible GR	Observaciones propias en terreno
Vicuna	San Juan, Arg.		Ver Google Earth...
Las Flechas	San Juan, Arg.		Ver Google Earth...

Waterloo



# Y las Compañías Mineras?

- Alegan que cuentan con todas las autorizaciones.
  - Difícil de reconstruir porque algunas intervenciones se efectuaron cercano a la introducción del SEIA.
  - P.ej. Depósito de lastre de CODELCO construido “hasta 1998” (Apablaza et al., 2001)
  - Las intervenciones más recientes de CODELCO fueron presentadas a y aprobadas por CONAMA.



ARCADIS GEOTECNICA

Aprobado

*EIA Proyecto Expansión*

*División Andina*

*Evaluación de Impactos Ambientales*

# Waterloo

# Y las Compañías Mineras?

- Alegan que hay investigaciones “científicas”
  - **Publicacion** es parte integral del discurso científico.
  - Publicaciones existentes son muy puntuales y en algunos casos casi imposibles de relacionar con glaciares rocosos (p.ej. Valenzuela, 2004; Apablaza et al., 2001).
  - Importantes informes no son accesibles
    - P.ej. de Geoestudios sobre glaciares rocosos en Pelambres y en Andina, no son accesibles.
    - Pelambres asegura que una empresa consultora “Dissam Securite “determino que **no existen glaciares de roca**” en la zona sino “ovulos o lentes de hielo” (La Nacion, 2008)
  - CODELCO ha anunciado poner informes a disposicion publica.



Waterloo

---

## Hacia la Protección de Glaciares Rocosos



Waterloo

# Por que Proteger los Glaciares Rocosos?

- Los GR son **reservas de agua dulce**.
  - Agua subterránea fosil.
  - Cantidad de hielo igual o superior al volumen de hielo glacial en los Andes aridos (~29-32°S)
  - Contribucion a disponibilidad de agua en verano y en el contexto del cambio climatico.
- Son recursos **no-renovables**.
  - Miles de años de regeneración.
- Son **movimientos en masa**.
  - No es recomendable construir infraestructure sobre glaciares rocosos. (Giardino & Vick, 1985; Burger, 1999)



Waterloo

# Ley de Proteccion de Glaciares (Argentina)

- Ley de Proteccion de Glaciares y del Ambiente Periglacial
- Prohibe actividades como la liberacion de sustancias contaminantes, la construccion, la exploracion y explotacion minera
- Intervencion requiere de aprobacion de EIA
- **Inventariar y monitorear** su estado por lo menos cada 5 años (IANIGLA)
- Octubre 2008 – Aprobada por el Congreso
- Octubre 2008 – **Veto presidencial**
  - “Excesiva” proteccion
  - Se considera incompatible con el sector productivo (minero)
  - Imprecision respecto del ambiente periglacial



Waterloo

# Politica Nacional de Glaciares (Chile)

- Diciembre 2006 – Senado aprueba “en general” Ley de Glaciares
  - Protegeria glaciares y glaciares rocosos.
  - Exige DIA / EIA, segun actividad, y define multas
  - Se crea Consejo Nacional de Glaciares
  - Se aplicaria tambien a proyectos existentes.
- Enero 2007 – Se congela proyecto de Ley de Glaciares en Chile
  - Presiones del sector minero (Business New Americas, 9.1.2008)



Waterloo

# Politica Nacional de Glaciares (Chile)

- 2008 – Grupo interministerial prepara borrador de la Politica Nacional de Glaciares (PNG)
  - “El Estudio de Impacto Ambiental será el que determine caso a caso si se puede realizar un proyecto cercano a un glaciar. En algunos casos lo impedirá y en otros lo permitirá. Para eso no necesitamos una ley, con la politica nacional basta” (Subsec. de OO.PP. J.E. Saldivia)
  - Consejo de Ministros de Medio Ambiente aprueba modificacion al SEIA que preve que proyectos que afecten a glaciares rocosos deben pasar por el SEIA.
- Agosto 2008 – Participacion ciudadana
  - Ciudadanos pueden enviar comentarios a traves de formulario en linea
- Diciembre 2008 – Abrobacion de la PNG???



Waterloo

# Política Nacional de Glaciares (Chile)

- Objetivo general:
  - “**Preservar y conservar** los glaciares de Chile.”
- Avances:
  - Todo proyecto que afecte a glaciares – incluyendo los glaciares rocosos – ingresara al **SEIA**.
    - El SEIA no ha sido un instrumento eficaz para evaluar o evitar intervenciones en glaciares rocosos en el pasado! (ver Andina y Los Pelambres)
  - DGA esta a cargo de actualizar / crear **inventarios** de glaciares y coordinar su monitoreo



Waterloo



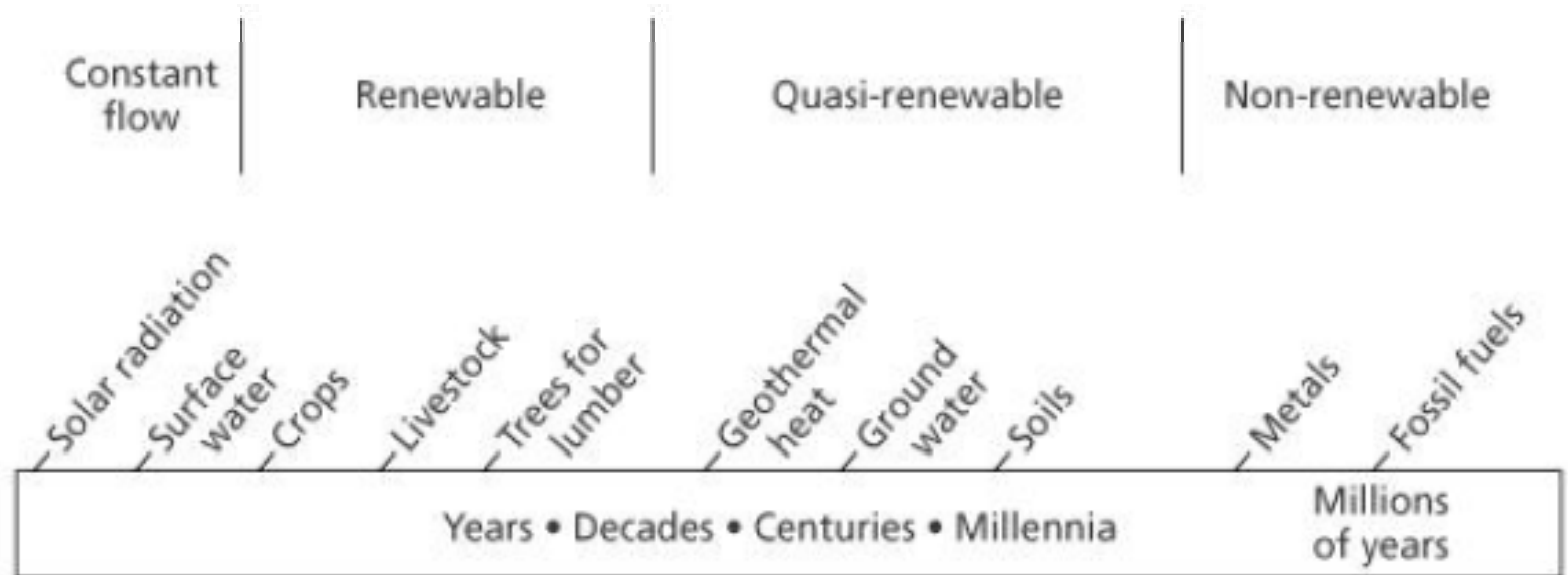
# Politica Nacional de Glaciares: Deficiencias

- Definición de glaciar basada en Lliboutry (1956)
- Hay que diferenciar criterios legales que son aplicables, como un área mínimo de **0.1 km<sup>2</sup>**. (Haeberli, 2000)
- Incluye los **glaciares rocosos**, pero no los define.
  - Ver p.ej. Barsch (1996)



# Politica Nacional de Glaciares: Deficiencias

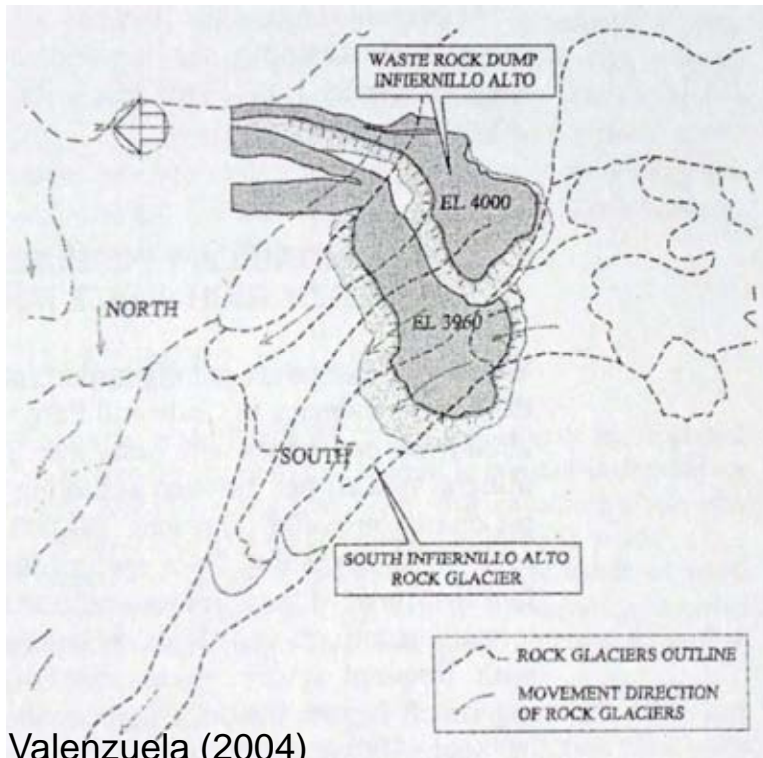
- Glaciares y glaciares rocosos se consideran como **recursos renovables**.
- Renewable: se regenera en **años**
- Muchos glaciares estan en retroceso.
- El crecimiento de GR dura miles de años.
- Consecuencias para su gestion?!



Encyclopedia of Global Change (2008)

# Politica Nacional de Glaciares: Deficiencias

- Intervenciones en glaciares:
  - “también **se contemplarán eventuales intervenciones**, si los intereses superiores de la Nación así lo exijan”
  - No se definen criterios.
  - No se mencionan medidas de mitigacion.



Valenzuela (2004)

# Waterloo

---

Conclusiones



Waterloo

# Conclusiones

## Base Científica

- Contienen **hielo “fossil”** acumulado durante varios milenios.
- Glaciares rocosos son **recursos hidricos** importantes en los Andes secos.
- Son movimientos en masa activos y por lo tanto **fenomenos dinamicos**.
- Impactos del **cambio climatico**?



## Manejo de Glaciares Rocosos

- **No son renovables** – necesitan miles de años para formarse.
- Son estructuras que las faenas mineras deberian evitar por razones de **estabilidad**.
- La **Politica Nacional de Glaciares** es un paso adelante, pero no soluciona los problemas.
- **Capacitacion** de ciudadanos y profesionales chilenos en **temas geograficos** es clave para solucionar los problemas ambientales del pais.

Waterloo



Cerro Catedral (4765 m)

*Gracias por su atención!*

Alexander Brenning  
[brenning@uwaterloo.ca](mailto:brenning@uwaterloo.ca)