



GLA.5291

## **HYDROCHILE**

DIRECCION GENERAL DE AGUAS  
Centro de Información Recursos Hídricos  
Área de Documentación

# **INVENTARIO DE GLACIARES, PROYECTOS HIDROELÉCTRICOS SAN ANDRÉS, EL PASO Y AGUAS CALIENTES.**

Informe, Vers. 2007-11-29.

Noviembre 2007



**GEOESTUDIOS**

**HYDROCHILE** DIRECCION GENERAL DE AGUAS  
Centro de Información Recursos Hídricos  
Área de Documentación

**INVENTARIO DE GLACIARES,  
PROYECTOS HIDROELÉCTRICOS  
SAN ANDRÉS, EL PASO Y AGUAS  
CALIENTES.**

**Informe, Vers. 2007-11-29.**

**Noviembre 2007**



**GEOESTUDIOS**



## I. INDICE.

	Página
I. INDICE.....	i
II. RESUMEN EJECUTIVO.....	1
III. INFORME.....	1
1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. LIMITACIONES.....	2
3. METODOLOGÍA.....	3
4. DESCRIPCIÓN GENERAL DE LOS GLACIARES.....	5
4.1. DEFINICIÓN DE GLACIAR.....	5
4.2. COMPOSICIÓN DE LOS GLACIARES.....	6
4.3. ZONAS DE ALIMENTACIÓN Y ABLACIÓN.....	8
4.4. VELOCIDADES.....	12
4.5. ABLACIÓN.....	13
4.6. MORRENAS.....	14
5. INVENTARIO DE GLACIARES.....	16
5.1. IDENTIFICACIÓN Y NÚMERO DEL GLACIAR.....	16
5.2. NOMBRE DEL GLACIAR.....	17
5.3. COORDENADAS.....	17
5.4. AREA DE SUPERFICIE.....	18
5.5. ÁREA DE ABLACIÓN.....	18
5.6. ANCHO PROMEDIO.....	18
5.7. LARGO PROMEDIO.....	19
5.8. LARGO MÁXIMO.....	19
5.9. ORIENTACIÓN.....	19
5.10. ALTITUD MÁXIMA DEL GLACIAR.....	19
5.11. ALTITUD MEDIA DEL ÁREA DE ACUMULACIÓN.....	19
5.12. ALTITUD MEDIA DEL ÁREA DE ABLACIÓN (m).....	20
5.13. CLASIFICACIÓN DE LOS GLACIARES SEGÚN UNESCO.....	20
5.13.1. Clasificación primaria de glaciares.....	20
5.13.2. Clasificación según la forma del glaciar.....	21
5.13.3. Clasificación según las características del frente del glaciar.....	22
5.13.4. Clasificación según el perfil longitudinal del glaciar.....	23
5.13.5. Clasificación según fuente principal de alimentación.....	24
5.13.6. Clasificación según actividad de la lengua glaciar.....	24
5.13.7. Clasificación según actividad de la lengua glaciar.....	25
5.14. MORRENAS.....	25
5.15. PROFUNDIDAD O ESPESOR MEDIO.....	26
5.16. INVENTARIO DE GLACIARES EN EL SECTOR DE SAN ANDRÉS.....	27
5.16.1. Inventario.....	27
5.16.2. Volúmenes glaciares.....	32
5.17. INVENTARIO DE GLACIARES EN EL SECTOR EL PASO.....	36
5.17.1. Inventario.....	36
5.17.2. Volúmenes de glaciares en el sector de El Paso.....	39
6. VARIACIONES DE LOS GLACIARES.....	42
1.1 ASPECTOS GENERALES.....	42



6.1.	VARIACIÓN GENERAL DE LOS GLACIARES.....	42
7.	ESTIMACIONES DEL BALANCE DE MASA Y EFECTO DE POLVO SOBRE LOS GLACIARES.....	44
7.1.	BALANCE DE MASAS Y APORTES HIDRICOS DE LOS GLACIARES.....	44
7.1.1.	Aspectos generales.....	44
7.1.2.	Estimación de balance de masa según velocidades y espesores de los glaciares.....	47
7.2.	EFECTO DE POLVO SOBRE LOS GLACIARES.....	53
8.	CONSIDERACIONES RESPECTO DE LOS GLACIARES.....	55
8.1.	SECTOR SAN ANDRÉS.....	55
8.2.	SECTOR EL PASO.....	56
9.	RECOMENDACIONES PARA ESTUDIOS MÁS DETALLADOS Y COMPLETOS.....	59
IV.	ANEXOS.....	1
1.	FIGURAS FUERA DE TEXTO.....	1

#### **Tablas.**

Tabla 5.15-A.	Relaciones entre área y espesor de glaciares.....	26
Tabla 5.16.1-A.	Inventario de glaciares sector San Andrés.....	29
Tabla 5.16.2-A.	Volúmenes y espesores de los glaciares en el sector de San Andrés.....	33
Tabla 5.17.1-A.	Inventario Sector El Paso.....	37
Tabla 5.17.2-A.	Volúmenes y espesores en el sector del El Paso.....	40

#### **Figuras.**

Fig. 4.1-A.	Esquema de sinterización del manto de nieve y de deformación y reptación del manto de nieve o de un glaciar.....	6
Fig. 4.2-A.	A la izquierda glaciar blanco con escasa cubierta de detritos en su Zona de Ablación (bandas de detritos oscuros en las morrenas centrales y marginales), y glaciar de roca a la derecha con cordones (bandas de compresión) arqueados hacia el frente (hacia la izquierda abajo) en la dirección del flujo del glaciar.....	8
Fig. 4.3-A.	Perfil vertical esquemático por el eje de un glaciar, mostrando la disposición de las zonas de acumulación y de ablación.....	9
Fig. 4.3-B.	Esquema de movimiento de un glaciar, en un perfil vertical por el eje longitudinal del glaciar.....	10
Fig. 4.3-C.	Esquema en planta del campo teórico de esfuerzos en un glaciar y de la disposición de los sistemas de fracturas en la masa de hielo.....	11
Fig. 4.3-D.	Esquema de disposición teórico de fracturas en un perfil vertical por el eje longitudinal de un glaciar.....	12
Fig. 8.1-A.	Laguna periglacial del glaciar Universidad.....	56
Fig. 8.2-A.	Deslizamiento de glaciar.....	58
Fig. 5.16.1-A.	Inventario de glaciares en el sector de San Andrés.....	Anexo 1
Fig. 5.17.1-A.	Inventario de glaciares en el sector de El Paso.....	Anexo 1



## II. RESUMEN EJECUTIVO.

El presente informe se realiza a solicitud de la empresa Hidrochile y con el objetivo de analizar la disponibilidad de agua generada por los glaciares presentes en los alrededores de los proyectos de centrales hidroeléctricas en la cabecera del río Tinguiririca y en la falda del volcán Chillán.

Los sectores específicos son:

- San Andrés, VI región
- El Paso, VI región
- Aguas Calientes, VIII Región. El sector no cuenta con información suficiente para realizar el inventario.

El inventario se ha realizado siguiendo las recomendaciones de UNESCO para la identificación de glaciares. Se han complementado los antecedentes con información adicional requerida para realizar la estimación de persistencia de los glaciares y de sus caudales aportantes a los proyectos hidroeléctricos.

En el sector de San Andrés se inventariaron 39 glaciares, identificados del 001 a 039. De ellos, 22 son blancos y 17 de roca. De los 39 identificados, solo 2 son reconocidos en literatura nacional o internacional, ambos son glaciares blancos y son los de mayor superficie en el área, son los glaciares Universidad de 27,6 km<sup>2</sup> y Cortaderal de 5,8 km<sup>2</sup>.

El glaciar con menor superficie identificado es de 0,015 km<sup>2</sup>, y es un glaciar de roca.

El área total cubierta por glaciares en el sector de San Andrés es de 41,7 km<sup>2</sup>, de ellos 4,8 km<sup>2</sup> son de glaciares de roca y 36,9 km<sup>2</sup> de glaciares blancos, estos últimos aportados principalmente por los glaciares Universidad y Cortaderal.

El volumen total de glaciares es de 7.708 millones de metros cúbicos de detrito, hielo y morrenas, los que contienen un total de 7.643 millones de metros cúbicos de solo hielo.



Los espesores máximos promedio estimados paramétricamente son para los glaciares blancos de aproximadamente 75 m. Los espesores máximos son de los glaciares Universidad con 210 m aproximadamente y del glaciar Cortaderal con 100 m aproximadamente.

Los glaciares de roca tienen un espesor promedio de 24 m, con espesores máximos de 66 m.

En el sector de El Paso, los glaciares identificados son 27, identificados del 040 al 66, siguiendo la numeración del sector de San Andrés. De ellos, 6 son glaciares blancos y 21 de roca, y ninguno de ellos ha sido reconocido en literatura nacional o internacional. Los glaciares, en esta área identificados son todos menores con una superficie de menos de 0,7 km.

Para el sector de El Paso, el área total cubierta por glaciares es de 6,2 km<sup>2</sup>, de ellos 3,7 km<sup>2</sup> son de glaciares de roca y 2,5 km<sup>2</sup> de glaciares blancos. El volumen total de glaciares es de 244 millones de metros cúbicos de detrito, hielo y morrenas, los que contienen un total de 211 millones de metros cúbicos de solo hielo.

Los espesores máximos promedio estimados paramétricamente para el sector de El Paso, es para los glaciares blancos de aproximadamente 40 m, con un máximo de 60 m y para los glaciares de roca un espesor promedio de 23 m, con espesores máximos de 50 m.

En una comparación visual de las imágenes de 1997 y 2007, no se observan cambios en la posición de los frentes glaciares; por lo tanto, se estima que los frentes glaciares están estables, sin variaciones en los últimos 10 años.

Los glaciares se encuentran, en general en equilibrio en el área, sin aportar recursos hídricos a las cuencas, solo regulando caudales. Pero esta condición puede cambiar si se producen retrocesos glaciares como consecuencia de los cambios climáticos previstos para el futuro



cercano como los actualmente previstos en cuanto aumento de temperatura, reducción de precipitaciones y efectos en otras zonas de glaciares, es posible estimar, de manera muy general, que los glaciares blancos más pequeños persistirán del orden de entre 7 y 130 años, y los glaciares mayores entre 60 y 500 años, aunque para los grandes glaciares Universidad y Cortaderal este tiempo puede llegar a ser de hasta 2.000 años. Los glaciares de roca, menos afectados por los cambios climáticos debido al efecto protector de la cubierta de detritos, persistirán más años que los glaciares blancos, probablemente del orden de 4 a 6 veces el número de años antes señalado.

Los glaciares en equilibrio no aportan agua a la cuenca, solo regulan los caudales, como parece ser la situación actual en el las áreas analizadas. De ocurrir una reducción de masa y retroceso de frentes de los glaciares, como respuesta de los glaciares a futuros cambios climáticos, habrá un mayor aporte de agua al inicio del proceso, mayor aporte que se irá reduciendo en el tiempo hasta extinguirse totalmente el mayor aporte y también la capacidad de regulación junto con los glaciares. Considerando la presencia de glaciares blancos y de roca, este mayor aporte puede ser, inicialmente, del orden de 0,1 o más % del volumen de hielo presente en los glaciares, vale decir, del orden de 190.000 m<sup>3</sup> de agua anuales en el sector El Paso, y del orden de 6.900.000 m<sup>3</sup> anuales en el sector de San Andrés.

Los incrementos en la tasa de fusión de la superficie de los glaciares por el efecto del polvo levantado por las operaciones industriales debe estimarse, midiendo este efecto en los glaciares con canchas de diversas concentraciones de polvo esparcido, y realizando un modelo de simulación de precipitación de polvo sobre los glaciares. Se estima que incrementos de entre un 3 a 5% de la tasa de fusión por polvo podría originar balances de masa marcadamente negativos en los glaciares blancos. El polvo no afecta a los glaciares de roca, o superficies de hielo cubiertas con detritos.



### III. INFORME.

#### 1. INTRODUCCIÓN.

El presente informe se realiza a solicitud de la empresa Hidrochile y con el objetivo de analizar la disponibilidad de agua generada por los glaciares presentes en el entorno de los proyectos de centrales hidroeléctricas ubicadas en la cabecera del río Tinguiririca y en la falda del volcán Chillán.

Los sectores específicos son:

- San Andrés, VI región
- El Paso, VI región
- Aguas Calientes, VIII Región

Considerando la falta de información respecto a glaciares existente en las áreas de los proyectos, se han definido los siguientes objetivos para este estudio:

- Inventario de glaciares y glaciares de roca que se encuentran en un radio de aprox. 10 km, aguas arriba y abajo del valle para cada proyecto hidroeléctrico, a realizar en base a fotografías aéreas. Incluyendo la definición del tipo de glaciares y características como: área, espesor en base a fórmula paramétrica, volúmenes de hielo estimados, cotas, y otros.
- Variaciones recientes, por comparación con fotografías u otros antecedentes.
- Estimaciones del balance de masa y efecto de polvo sobre los glaciares, todo basado exclusivamente en experiencias en otros glaciares de la cordillera central.



## 2. LIMITACIONES.

El presente estudio tiene las siguientes limitaciones:

- No existe topografía que cubra toda el área de los sectores estudiados, en especial en las inmediaciones con el límite internacional. Por ello la delimitación de los glaciares en los sectores de San Andrés y El Paso no cubiertos con fotografías aéreas se realizó empleando imágenes satelitales.
- Las fotografías aéreas se ortorectificaron y georeferenciaron con los planos topográficos. Pero en los sectores solo cubiertos por imágenes satelitales sin topografía de respaldo la ortorectificación y georeferenciación puede ser de inferior calidad.
- En algunos sectores de San Andrés y El Paso donde solo se contó con imagen satelital, solo se estimaron los límites de los glaciares debido a que la zona estaba muy cubierta de nieve y no se apreciaban claramente estos límites.
- En el sector de Aguas Calientes, solo se cuenta, para identificar glaciares, con fotografía aérea 1:75.000. Estas fotografías fueron tomadas en época poco favorable, ya que toda el área está cubierta con nieve y no es posible diferenciarlos de la nieve. Tampoco se cuenta, para esta área, con imágenes satelitales de calidad suficiente como para definir los límites de los glaciares. Por lo tanto no se puede realizar el inventario en este sector.



### 3. METODOLOGÍA.

Para realizar el inventario de glaciares se utilizaron fotografías aéreas del año 1997 escala 1:50.000 para San Andrés y El paso, y 1:75.000 para Aguas Calientes, imágenes satelitales digitales de excelente calidad obtenidas mediante el software Google Earth para las áreas de San Andrés y El Paso, y topografía escala 1:50.000 del Instituto Geográfico Militar.

Con las fotografías aéreas escaneadas y la topografía disponible, se procedió a ortorectificar y georeferenciar las fotografías aéreas. En estas imágenes ajustadas se definieron los límites y las áreas de los glaciares empleando el software ERMapper.

En sectores donde no existió topografía, o la fotografía aérea era incierta, se identificaron las áreas englaciadas empleando imágenes satelitales del software Google Earth, las cuales fueron transformadas al sistema AutoCAD.

Una vez establecidas los límites de los glaciares, se transformó todo al sistema AutoCAD (incluidas las fotografías aéreas).

El inventario de glaciares se realizó mediante la norma que recomienda UNESCO. Las normas UNESCO estan contenidas en:

Perennial Ice and Snow Masses. A Guide for Compilation and Assemblage of Data for the World Glacier Inventory. Technical Papers in Hydrology No. 1, UNESCO – IAHS 1970, which has been superseded in part by: Müller, F., Caflisch, T. and Müller, G. (1977): Instructions for Compilation and Assemblage of Data for a World Glacier Inventory, and by: TTS/WGI (1983): Guidelines for Preliminary Glacier Inventories, both issued by the former Temporary Technical Secretariat for the World Glacier Inventory, now WGMS, Department of Geography, University of Zurich.

Antecedentes recientes (2006) de inventarios de glaciares se encuentran en las



publicaciones respectivas de WGMS (World Glacier Monitoring Service).



## 4. DESCRIPCIÓN GENERAL DE LOS GLACIARES..

### 4.1. DEFINICIÓN DE GLACIAR.

Los glaciares son grandes masas de hielo, con o sin agua intersticial, de límites bien establecidos, originados sobre la tierra por metamorfismo a hielo de acumulaciones de nieve (un proceso denominado sinterización de la nieve), y que fluyen lentamente. Los glaciares fluyen porque el hielo que contienen se deforma por su propio peso bajo el influjo de la gravedad, según la ley de flujo del hielo, y porque en superficies inclinadas el hielo se desliza lentamente sobre el lecho basal (ver Fig. 4.1-A) si el hielo está a 0°C (glaciares “temperados”, el caso de la gran mayoría de glaciares en la Cordillera de los Andes). Si el hielo en la base del glaciar se encuentra a temperaturas negativas (glaciares “fríos”), no se desliza sino que se adhiere al material sub-glacial y el glaciar fluye solamente por deformación de la masa de hielo.

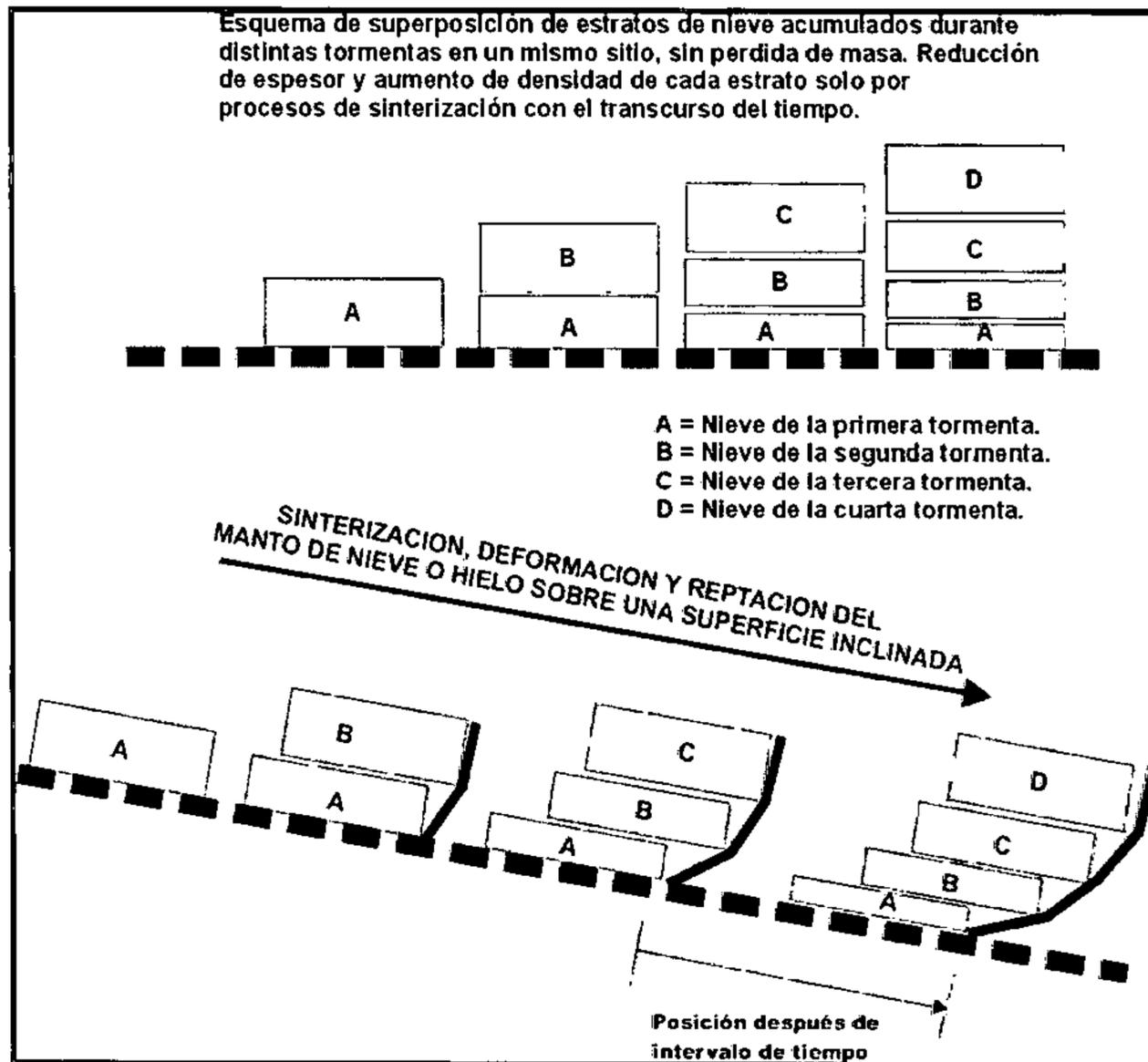


Fig. 4.1-A. Esquema de sinterización del manto de nieve y de deformación y reptación del manto de nieve o de un glaciar.

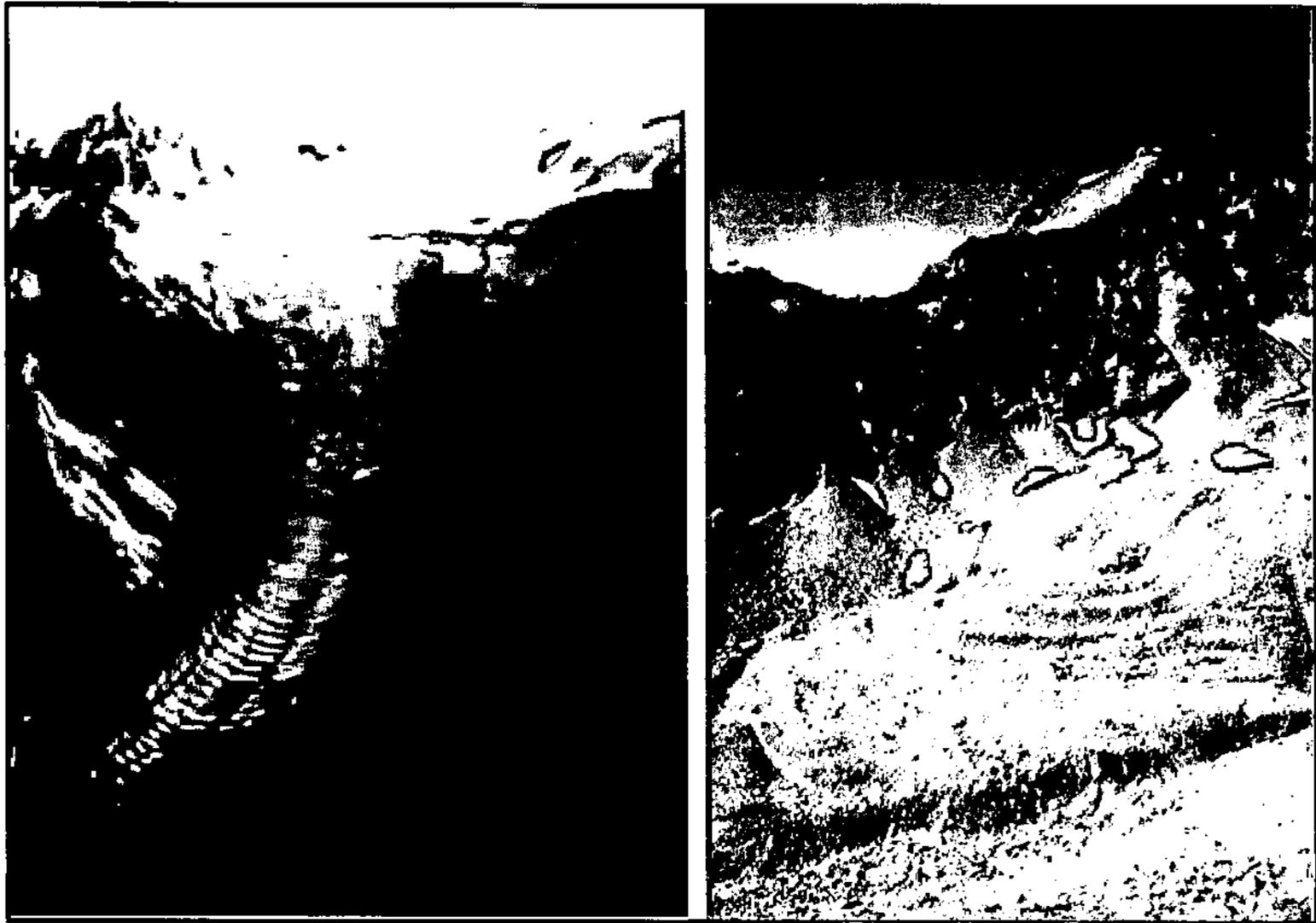
## 4.2. COMPOSICIÓN DE LOS GLACIARES.

En las masas de hielo de los glaciares existe una variada cantidad de impurezas, compuestas principalmente de material detrítico. El material detrítico contenido en las masas de hielo glaciar es principalmente de origen rocoso, en tamaño desde grandes bloques a finas partículas de arcillas, que caen desde las laderas sobre el glaciar, o son llevadas por el viento, y se incorporan a las masas de nieve y hielo, y también fragmentos erosionados en la base del glaciar e incorporados al hielo de su base. Una parte muy menor y de difícil detección macroscópica del detrítico en los glaciares puede ser orgánico (fragmentos o especímenes enteros) y proviene principalmente del arrastre eólico hasta la superficie del



glaciar, donde este detrito se incorpora a la masa de hielo. Acumulaciones de nieve con altos contenidos (1% o más en volumen) de detritos rocosos son los depósitos originados por avalanchas.

Glaciares con cantidades virtualmente imperceptibles de impurezas y que, por lo tanto, se aprecian esencialmente blancos, se denominan aquí "glaciares blancos" (ver Fig. 4.2-A) y a ellos se asocia generalmente un valor paisajístico. Glaciares que contienen un porcentaje de detrito tal que este cubre toda la superficie de su Zona de Ablación (el área del glaciar a menor cota) y parte importante de su Zona de Acumulación (el área del glaciar a mayor cota) se denominan "glaciares de roca" (ver Fig. 4.2-A). En estos últimos, el contenido de detritos puede alcanzar más del 20% del volumen total del glaciar. Entre los glaciares blancos y los glaciares de roca existe una amplia gama de glaciares con cubiertas detríticas que se extienden en solo parte de sus zonas de ablación, y a los cuales llamaremos aquí glaciares de transición en cuanto al grado de impurezas que contienen.



**Fig. 4.2-A. A la izquierda glaciar blanco con escasa cubierta de detritos en su Zona de Ablación (bandas de detritos oscuros en las morrenas centrales y marginales), y glaciar de roca a la derecha con cordones (bandas de compresión) arqueados hacia el frente (hacia la izquierda abajo) en la dirección del flujo del glaciar.**

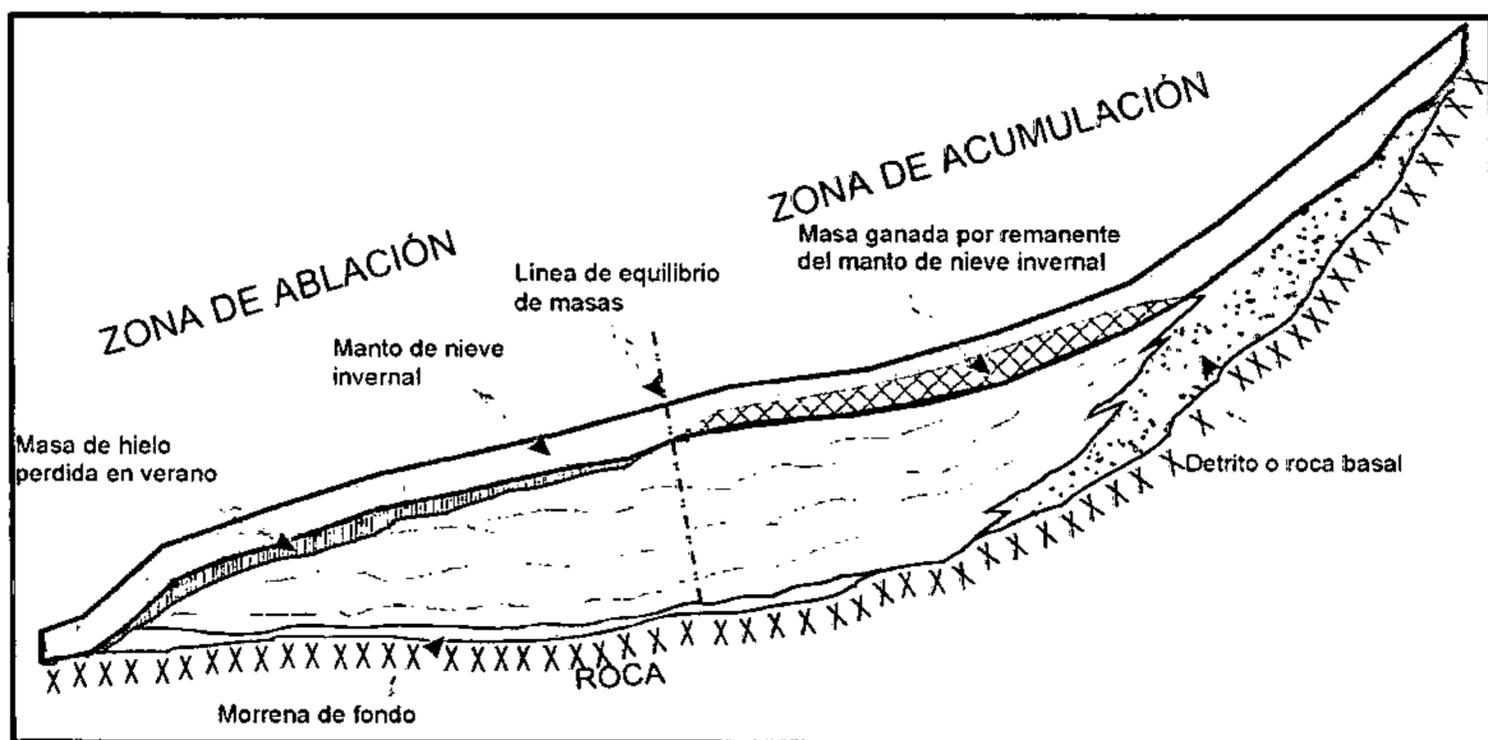
La cubierta de detritos en un glaciar de roca resulta de la paulatina fusión de la nieve y el hielo, proceso mediante el cual el material detrítico que contienen queda expuesto en superficie. Así, una inicialmente tenue capa de detritos, de escasos centímetros de espesor, cubre la superficie del glaciar en sus mayores cotas, y ella se vá haciendo más potente y de mayor espesor con el transcurso de los años. Con el paso del tiempo y el movimiento pendiente abajo de la masa de hielo, cerca del frente del glaciar de roca se encuentra el mayor espesor de la cubierta de detritos, la cual puede alcanzar varios metros.

### **4.3. ZONAS DE ALIMENTACIÓN Y ABLACIÓN.**

Los glaciares poseen una Zona de Alimentación y una Zona de Ablación, separadas por una



imaginaria Línea de Equilibrio de masas (ver Fig. 4.3-A). En la Zona de Alimentación el glaciar gana masa en un balance anual, mayoritariamente la nieve proveniente de la precipitación nival y de avalanchas más el detrito que estas últimas suelen incorporar, y que logra subsistir al término de la temporada veraniega. En la Zona de Ablación el glaciar pierde masa, por los diversos fenómenos de ablación (fusión, sublimación, erosión eólica, etc.). El frente del glaciar es estable cuando el balance anual de masas es igual a cero, vale decir cuando gana tanta masa de nieve en la Zona de Acumulación, como la masa perdida de hielo en la Zona de Ablación; en caso contrario el frente avanza (balance positivo, ganancia neta anual de masa) o retrocede (balance negativo, pérdida neta anual de masa) y se modifica el perfil de la superficie del glaciar.



**Fig. 4.3-A. Perfil vertical esquemático por el eje de un glaciar, mostrando la disposición de las zonas de acumulación y de ablación.**

En la Línea de Equilibrio, por las mismas condiciones de intercambio de masas entre las zonas de acumulación y ablación, los espesores de hielo son mayores y por ello las velocidades de desplazamiento del glaciar son también las mayores (ver Fig. 4.3-B). Por lo mismo, la Zona de Acumulación es una en la cual las masas de hielo se encuentran en tensión y formación de grietas transversales (ver Fig. 4.3-C), mientras que la Zona de Ablación es un campo en compresión, con formación de grietas longitudinales y cordones de



compresión; esta disposición general del campo de esfuerzos puede alterarse por grandes ondulaciones en la base del glaciar. La disposición general de las grietas en la superficie de un glaciar se muestra también en la Fig. 4.3-D.

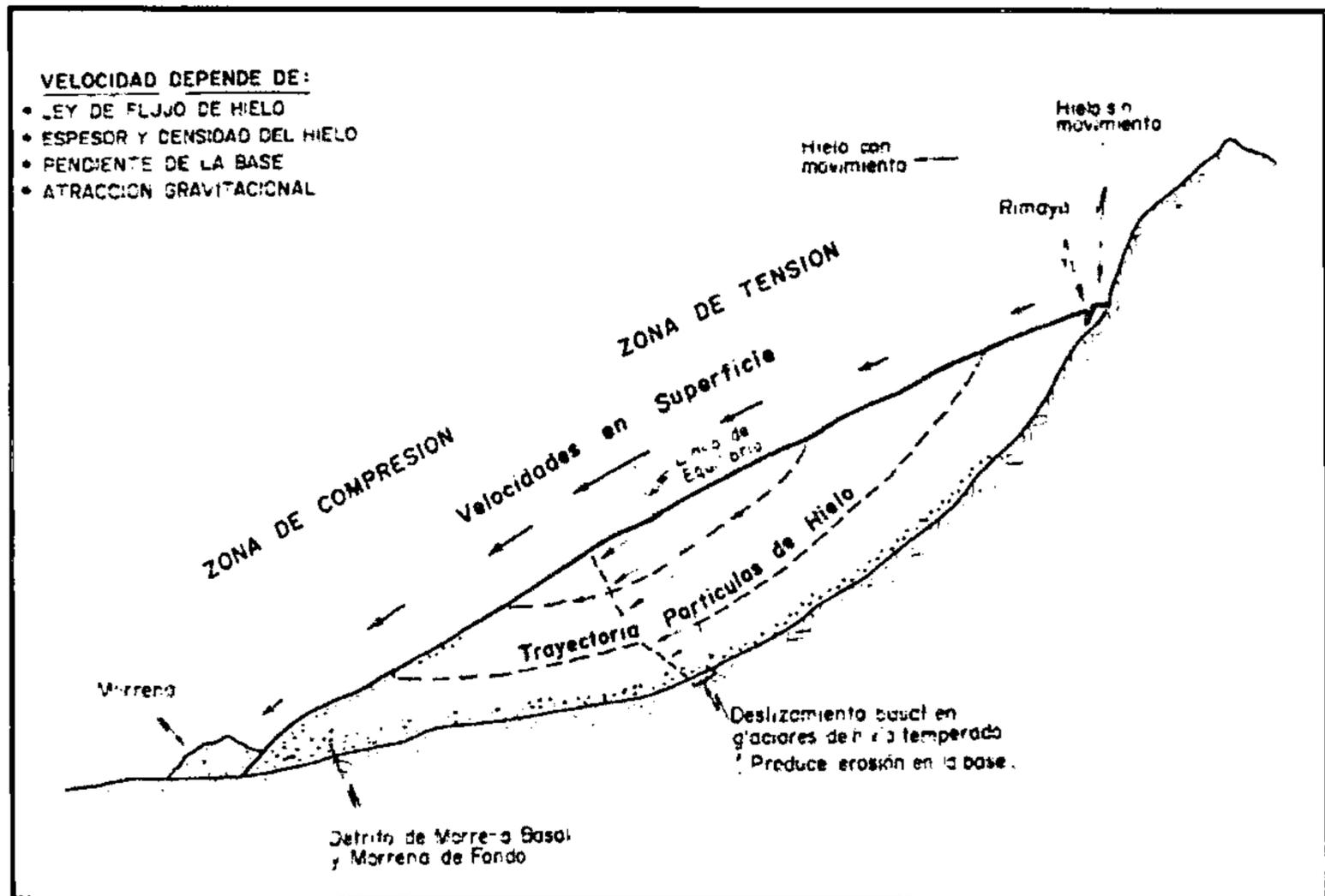
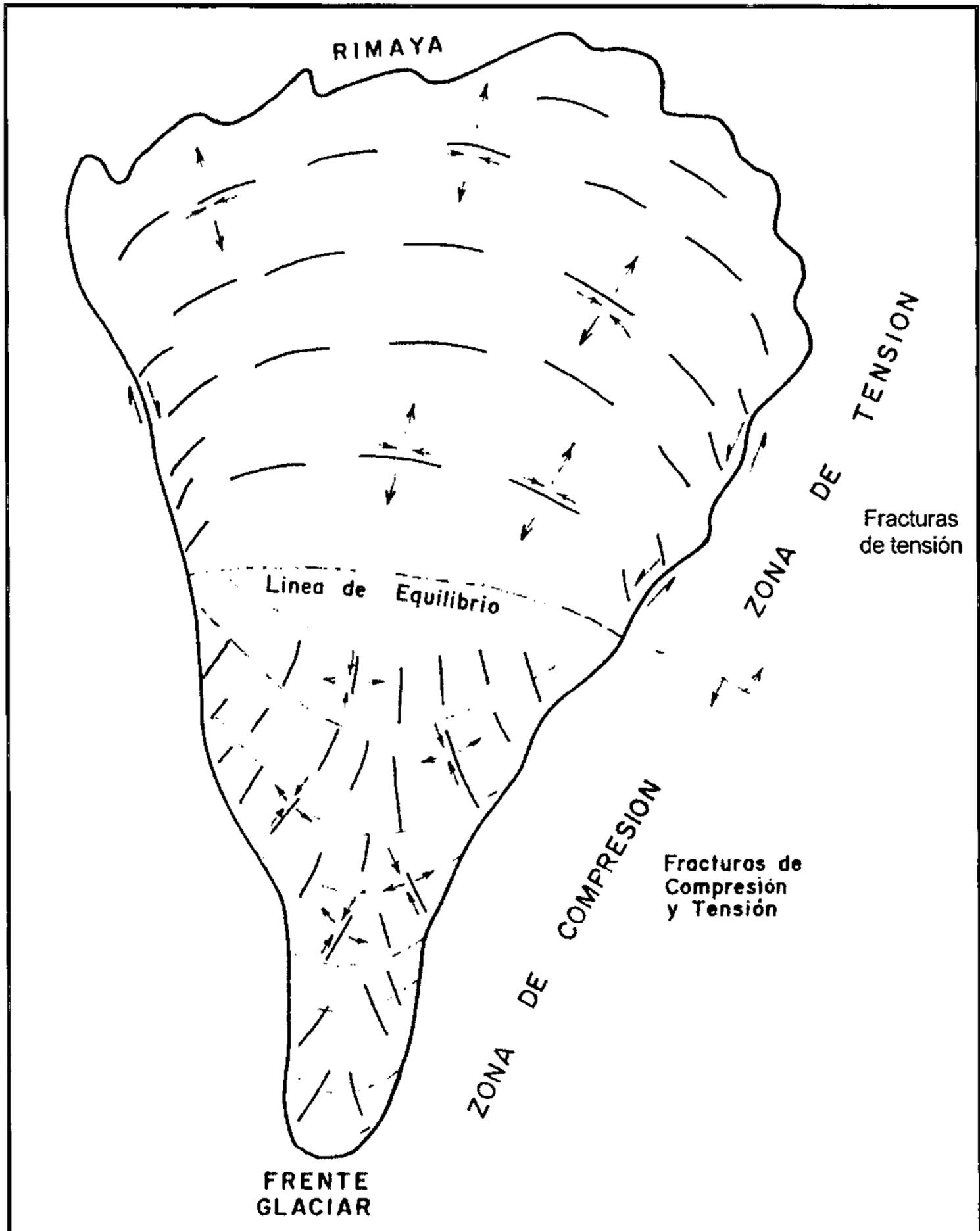
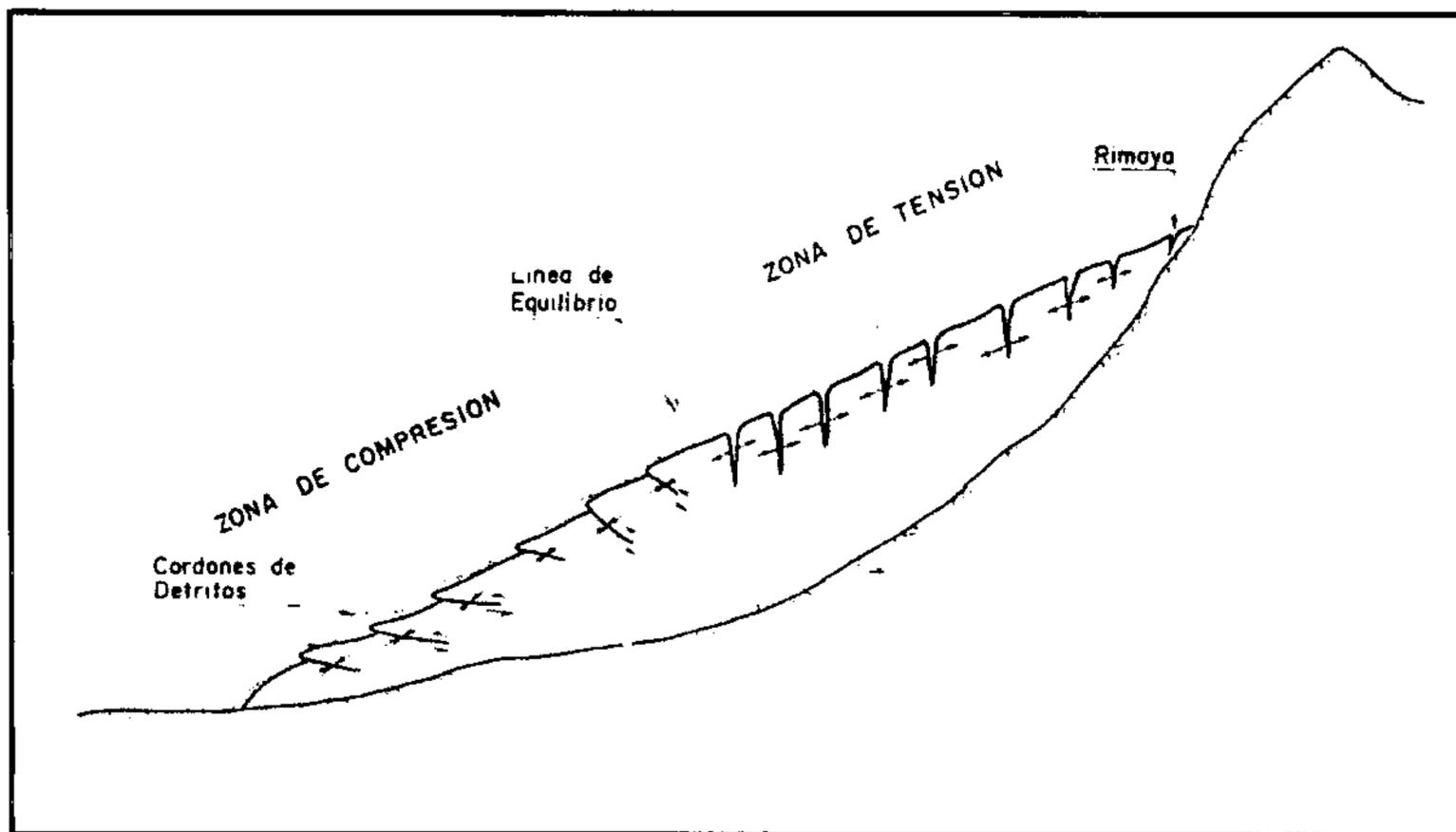


Fig. 4.3-B. Esquema de movimiento de un glaciar, en un perfil vertical por el eje longitudinal del glaciar.



**Fig. 4.3-C. Esquema en planta del campo teórico de esfuerzos en un glaciar y de la disposición de los sistemas de fracturas en la masa de hielo.**



**Fig. 4.3-D. Esquema de disposición teórico de fracturas en un perfil vertical por el eje longitudinal de un glaciar**

#### 4.4. VELOCIDADES.

Las velocidades en superficie de desplazamiento de los glaciares dependen del espesor del hielo y de la deformación de este según la ley de flujo del hielo, de la carga que representa el detrito incorporado con sus respectivas densidades, de la pendiente de la base y de la velocidad basal. La pendiente en la superficie de los glaciares es función del intercambio de masas entre las zonas de acumulación y de ablación y de las velocidades por ello originadas, y de la pendiente en la base del glaciar. La velocidad basal depende del esfuerzo de corte en la base del glaciar, el que, a su vez, depende del espesor del glaciar y su densidad media, la pendiente de la superficie del glaciar y el efecto de "pistón hidráulico" por la presión de agua en la base (el que a su vez tiene que ver con las inclinaciones de las rugosidades basales). La velocidad basal también depende de la rugosidad del terreno sobre el cual el glaciar desliza.



## 4.5. ABLACIÓN.

La ablación en la superficie del glaciar depende del intercambio calórico en superficie, cuyos componentes principales son:

- radiación incidente, en onda larga y corta,
- radiación reflejada en onda corta, y emitida en onda larga,
- temperatura del aire y su gradiente vertical,
- humedad relativa,
- velocidad del viento y su gradiente vertical,
- presión barométrica,
- albedo de la nieve o el detrito rocoso,
- temperatura de la superficie de nieve o detrito,
- conductividad térmica del detrito o nieve,
- gradiente de temperatura en la eventual cubierta detrítica superficial (o nieve),
- precipitación.

En un año promedio, la ablación en la superficie del glaciar destruye toda la nieve acumulada durante el invierno en la Zona de Ablación, e incluso parte del hielo preexistente. En la Zona de Alimentación la ablación superficial no alcanza a destruir toda la nieve acumulada durante el invierno, de manera que se produce un excedente de masa el cual compensa (en un glaciar en equilibrio) aquella preexistente (el hielo) perdida en la Zona de Ablación. Para mantener la forma de la superficie de un glaciar en equilibrio de masas, el flujo del glaciar produce un intercambio anual de masa entre las zonas de acumulación y de ablación, de manera tal que el volumen de hielo que pasa anualmente por la sección de la Línea de Equilibrio es la ganancia de masa de la Zona de Alimentación, la que compensa la masa perdida en la Zona de Ablación.

En toda la base de un glaciar existe pérdida de masa debido a:

- fusión del hielo por efecto del calor geotérmico y



- fusión de hielo atribuida al calor de fricción que causa el desplazamiento del glaciar (espesor de hielo y sus densidades, velocidad basal, esfuerzo de corte) sobre su lecho.

#### 4.6. MORRENAS.

En la base del glaciar existe una banda de hielo con abundante material detrítico (hasta aproximadamente un 50% en volumen), el que es capturado por el glaciar desde su lecho (rocoso o detrítico) e incorporado a la masa de hielo del glaciar. Esta banda se denomina morrena basal y su límite inferior es el límite inferior del glaciar. En glaciares relativamente pequeños, la morrena basal suelen tener espesores que van desde pocas decenas de centímetros hasta pocos metros.

La morrena basal debe distinguirse de la morrena de fondo (también denominada til) dispuesta bajo la morrena basal, y otros tipos de morrenas (marginales, laterales, etc.), que son masas constituidas exclusivamente por material detrítico, sin hielo, y que no forman parte del glaciar. La morrena de fondo es un suelo con abundantes finos, transportado y depositado por el glaciar en su base, saturado, y que bajo glaciares activos es un material virtualmente sin cohesión y de muy bajo ángulo de fricción interna; esta morrena de fondo suele ser prominente aguas abajo de la Línea de Equilibrio y poco significativa, o inexistente, aguas arriba de ella. La característica geotécnica del material de la morrena de fondo, una vez que ha dejado de ser cargada, o afectada por el glaciar, es de cohesión de aproximadamente 100 kg/cm<sup>2</sup>, y ángulo de fricción interna aproximadamente 38°.

La morrena de fondo no es parte del glaciar y no contiene hielo. Es un material detrítico con abundantes finos (entre 15% y más de 20% normalmente), depositado y permanentemente trabajado por la base del glaciar. Cargada por el hielo en continua reptación y siempre saturado de agua, la morrena de fondo se comporta como un material de muy baja cohesión (0,1 kg/cm<sup>2</sup>), relativamente bajo ángulo de fricción interna (11°) y activo en cuanto a que se encuentra en permanente deformación.



Nuestra experiencia y observaciones, indican que la morrena de fondo virtualmente no existe aguas arriba de la Línea de Equilibrio de los glaciares (bajo la denominada Zona de Acumulación de los glaciares), y se extiende con diversos grados de amplitud aguas abajo de la Línea de Equilibrio (bajo la denominada Zona de Ablación). A su vez, la extensión de la morrena de fondo aguas abajo de la Línea de Equilibrio es total mientras la pendiente de la base no excede de 19%, y se reduce con los incrementos de pendiente.

En trabajos en glaciares pequeños de la zona central de Chile, hemos considerado que los materiales morrénicos típicos, como las morrenas de fondo, marginales, laterales, etc., al dejar de ser trabajadas por los glaciares se comportan como cualquier otro material detrítico, poseen cohesiones habitualmente superiores a 5 kg/cm<sup>2</sup> y ángulos de fricción interna en relación con el grado de humedad (o saturación) del material y que varían normalmente entre 25° (cuando saturado) y 55° (cuando seco).



## 5. INVENTARIO DE GLACIARES.

### 5.1. IDENTIFICACIÓN Y NÚMERO DEL GLACIAR.

El inventario de glaciares según las guías UNESCO y las instrucciones de NSDIC (2005), crea una ficha para cada glaciar, la que contiene la siguiente información:

1. Identificación y número del glaciar.
2. Nombre del glaciar
3. Latitud y longitud
4. Coordenadas
5. Número de cuencas de drenaje
6. Número de estados independientes
7. Mapa topográfico empleado
8. Fotografías empleadas.
9. Número total de tarjetas empleadas ( para uso con sistema computacional de tarjetas).
10. Número de tarjeta (igual al anterior)
11. Área de superficie, en km<sup>2</sup>
12. Área de ablación, en km<sup>2</sup>
13. Ancho promedio (km)
14. Largo promedio (km)
15. Largo máximo (km)
16. Orientación.
17. Altitud máxima del glaciar (m)
18. Altitud media del glaciar (m)
19. Altitud mínima del glaciar (m)
20. Altitud media del área de acumulación (m)
21. Altitud media del área de ablación (m)
22. Clasificación de UNESCO.
23. Período de evaluación de actividad de la lengua glaciar.



24. Morrenas.
25. Líneas de nieves del glaciar (m)
26. Profundidad o espesor medio (m).

La identificación y número del glaciar están contenidos en un campo de doce dígitos. Según las normas de UNESCO (MULLER, 1978) los primeros tres dígitos, de izquierda a derecha, identifican al país. Para Chile, esas mismas normas han definido las siglas RCH. El cuarto dígito identifica al continente; según las mismas normas, Sud América posee el código I. El quinto dígito identifica la cuenca de primer orden dentro del continente Sudamericano; según la norma señalada la hoya del río Rapel se ubica en la cuenca M (esencialmente Chile Central). Los siete dígitos siguientes sirven para identificar la hoya y dividirla. Según la Dirección General de Aguas, para la hoya del río Rapel se utilizan los primeros dos de estos siete dígitos para identificar la región, es decir los dígitos son: 06. El 3er dígito es para el número de orden de la cuenca, es decir se usa para este caso 0. El 4to y 5to dígito son las subdivisiones, es decir para este caso es 25, y los últimos tres dígitos son para el número de orden de los glaciares.

Del resto del listado arriba expuesto, y debido a la falta de información en algunos casos y al uso actualmente preferencial del sistema de coordenadas UTM transformables fácilmente al sistema geográfico, es que para el presente inventario se realizaron las fichas de los glaciares con la información que se detalla a continuación.

## **5.2. NOMBRE DEL GLACIAR.**

Algunos glaciares son reconocidos en literatura nacional y/o internacional con nombre, el cual se emplea cuando existe.

## **5.3. COORDENADAS.**

Las normas de UNESCO recomiendan ubicar los glaciares por sus coordenadas UTM. En este caso se utilizó el datum WGS 84.



## 5.4. AREA DE SUPERFICIE.

Se expresa en kilómetros cuadrados:

- a) Total: total del glaciar.
- b) Precisión: se señala la precisión alcanzada en la medición de áreas, indicándose con el código requerido por UNESCO:
  - 1 para errores de 0 a 5%
  - 2 para errores de 5 a 10%
  - 3 para errores de 10 a 15%
  - 4 para errores de 15 a 25%
  - 5 para errores mayores de 25%
- c) Total en el estado o país: se indica solamente en el caso que un glaciar cruce límites internacionales.
- d) Expuesta: se indicarse el monto total de superficie no cubierta por detritos rocosos.

## 5.5. ÁREA DE ABLACIÓN.

Por área de ablación se define la superficie (en kilómetros cuadrados) de un glaciar que al término de un año calendario (fin de verano e inicio del otoño) presenta un balance de masa negativo. El límite en esta área es especialmente difícil de definir en glaciares con penitentes, que es el caso común de glaciares chilenos.

La delimitación exacta requeriría estudios de terreno en cada glaciar, para el presente inventario se realizó la mejor estimación.

## 5.6. ANCHO PROMEDIO.

Se señala el ancho medio (en kilómetros) de las lenguas terminales de ancho uniforme, como en el caso de algunos glaciares de valle o de desagüe. En caso contrario se deja el espacio en blanco, pues es fácil calcular el ancho promedio para todo el glaciar, de los datos de superficie total y largo promedio.



## 5.7. LARGO PROMEDIO.

Se calcula el largo promedio (en kilómetros) a partir de las longitudes máximas de cada tributario, medidas a lo largo de su línea de flujo de mayor extensión.

## 5.8. LARGO MÁXIMO.

Medido en kilómetros:

- a) Total: el de la línea de flujo de mayor longitud del glaciar.
- b) Expuesto: el de la línea de flujo de mayor longitud en la zona del glaciar no cubierta por detrito rocoso.
- c) Área de ablación: el de la línea de flujo de mayor longitud en el área de ablación.

## 5.9. ORIENTACIÓN.

Orientación (o exposición, hacia donde mira) principal de las áreas de acumulación y ablación de glaciar, según los ocho puntos cardinales (N, NE, E, SE, S, SW, W, y NW). En el caso de casquetes de hielo circulares, se debe indicar una R, señalando así su exposición radial tanto para el área de acumulación como de ablación. La orientación anotada es la de la dirección de una línea hacia aguas abajo de un glaciar.

## 5.10. ALTITUD MÁXIMA DEL GLACIAR.

La mayor cota a la que se extiende el glaciar, en metros.

## 5.11. ALTITUD MEDIA DEL ÁREA DE ACUMULACIÓN.

Cota (en metros) de la línea imaginaria que divide la superficie del área de acumulación en mitades.



## 5.12. ALTITUD MEDIA DEL ÁREA DE ABLACIÓN (M).

Cota (en metros) de la línea imaginaria que divide la superficie del área de ablación en mitades.

## 5.13. CLASIFICACIÓN DE LOS GLACIARES SEGÚN UNESCO.

La clasificación de glaciares más aceptada es aquella de UNESCO, complementada con los agregados que a esta clasificación de UNESCO se realizaron con motivo de la ejecución del inventario de glaciares en Canadá y del GLIM. En los aspectos más relevantes, la clasificación UNESCO de glaciares lo hace según los siguientes criterios:

- Clasificación primaria, según el tipo y aspecto general del glaciar.
- Clasificación según la forma del glaciar.
- Clasificación según las características del frente del glaciar.
- Clasificación según el perfil longitudinal del glaciar.

### 5.13.1. Clasificación primaria de glaciares.

Según la clasificación primaria de los glaciares estos se describen y señalan con dígitos, como (con algunos ejemplos en Chile):

0. Incierto o misceláneo.
1. Sabana de hielo continental. Ejemplos: Antártica y Groenlandia.
2. Campo de hielo. Ejemplo: campos de hielo Patagónico Norte y Patagónico Sur.
3. Casquete de hielo. Ejemplo: casquete en Península Muñoz Gamero, XII Región.
4. Glaciar de desagüe. Ejemplo: glaciar Pio XI que surge del Campo de Hielo Patagónico Sur, o bien el glaciar O'Higgins que desagua en el lago homónimo.
5. Glaciar de valle. Ejemplo: glaciar Juncal Sur, en cordillera central de Chile.
6. Glaciar de montaña. Ejemplos: numerosos glaciares en el entorno de los campos de hielo Norte y Sur y en la cordillera del centro de Chile.
7. Glaciarrete. Ejemplo: los numerosos pequeños glaciares en los cordones montañosos vecinos de los proyectos hidroeléctricos.



8. Plataforma de hielo. Ejemplo: en partes de la periferia del continente Antártico.
9. Glaciar de roca. Ejemplos. numerosos glaciares en la cordillera del centro y norte de Chile.

En las **sabanas de hielo** los glaciares tienen mayor altura que las cumbres rocosas de la región y las cubren virtualmente de forma total, como en sectores de la Antártica y Groenlandia; en estos casos los glaciares fluyen en todas direcciones desde un centro de elevada cota. En los **campos de hielo** los glaciares inundan una región montañosa, pero no la cubren, y fluyen por las valles y pasos en diversas direcciones. La **plataforma** de hielo consiste de hielo originado sobre una masa terrestre (continental), que se extiende sobre el mar, y flota. El glaciar tipo **casquete** cubre totalmente una alta cumbre o zona, y desde esta fluye en diversas direcciones. En el resto de los casos, los glaciares se encuentran en una región montañosa, donde dominan las cumbres rocosas, y fluyen en una dirección determinada por la topografía.

### 5.13.2. Clasificación según la forma del glaciar.

Según la forma de los glaciares, estos se clasifican como:

0. Incierto o misceláneo.
1. Cuencas compuestas.
2. Cuenca compuesta.
3. Cuenca simple.
4. Circo.
5. Nicho.
6. Cráter.
7. Falda de hielo.
8. Grupo.
9. Remanente.

Una forma de cuenca simple es aquella de un glaciar originado en una cuenca única, no subdividida. Ejemplos de esto podrían ser el caso del glaciar de roca Infiernillo Sur, en una



cuenca de la quebrada San Francisco, región metropolitana. Un ejemplo de **cuenca compuesta** es el caso del glaciar Olivares Alfa (RM), que tiene sus nacientes en cuatro subcuencas: la subcuenca al Sur de los cerros Negro y Barrentin, la subcuenca al Norte de los cerros La Paloma y Altar, la sub-cuenca al Este del Cerro Altar, y la sub-cuenca al Oeste del Cerro Fickenscher. No conocemos casos de un glaciar con forma de cuencas compuestas en la cordillera del centro de Chile, pero existieron en el pasado geológico: Tal como el caso que existió en la cuenca del San Francisco, en las cabecera del Río Mapocho, con un glaciar que recibía aportes de hielo desde las cuencas San Francisco, Dolores y Plomo.

Una forma de **circo** es aquella de un glaciar que su zona de alimentación se encuentra rodeada por farallones rocosos formando un semicírculo. Forma de **nicho** es la de un glaciar pequeño en una depresión del terreno. Forma de **cráter** es la de un glaciar que ocupa un cráter volcánico, como el glaciar Hudson en la patagonia Chilena. Glaciar con forma de **falda de hielo** es el glaciar en la vertiente Sur del Cerro Dinamarca, en la cuenca del Río Blanco (RM), que fluye en una fuerte pendiente que forma una falda de una montaña. Un típico **grupo** de glaciares lo conforman los glaciares alrededor de un área determinada y que en algún tiempo tuvieron un origen común. Glaciar **remanente** es una porción de hielo que ha sido separada de un glaciar mayor; casos de estas formas se observan hoy en día en algunos glaciares de la patagonia.

### 5.13.3. Clasificación según las características del frente del glaciar:

Los frentes de glaciares se clasifican como:

0. Normal.
1. Pie de monte.
2. Pie expandido.
3. Lobulado.
4. Desprendente.
5. Coalescente, no contribuyente.

El frente **normal** de un glaciar temperado concluye como una cuña de hielo sobre el terreno,



como en el caso del glaciar Juncal Norte (RM). En glaciares fríos suele ser un frente abrupto y, en glaciares de roca, un empinado talud cubierto con detritos rocosos. Frentes de forma de **pie de monte** se observan en algunos de los glaciares que drenan los campos de hielo Patagónico Norte y Sur. Una típica forma de **pié expandido** es la del frente del glaciar San Quintín, al Sur de la Laguna San Rafael, en la XI Región.

**Lóbulos** de hielo son las formas de algunos frentes de glaciares que se desprenden del casquete de hielo Muñoz Gamero, en la XII Región. Frentes **desprendentes** son aquellos desde los cuales se desprenden masas de hielo y caen al fondo del valle o aun lago proglacial; ejemplo de esto son los glaciares Mesón Alto, en el cerro homónimo en la cordillera del centro de Chile, y el glaciar alto en el Cerro Paine, XII Región. Frentes **coalescentes** lo conforman aquellos de diversos glaciares de roca del sector Río Blanco en la cuenca alta del Río Blanco, cordillera de Chile central.

#### 5.13.4. Clasificación según el perfil longitudinal del glaciar.

Según sus perfiles longitudinales, los glaciares se clasifican como:

0. Incierto o misceláneo.
1. Uniforme, o regular.
2. Colgante.
3. En cascada.
4. Caída de hielo.
5. Interrumpido o regenerado.

Un perfil longitudinal **regular** es un perfil uniformemente inclinado, con tan solo variaciones en el frente y en la cabecera del glaciar. Un glaciar **colgante** es aquel cuyo frente termina en un abrupto farellón rocoso, como un frente virtualmente vertical y del cual se desprenden ocasionalmente masas de hielo. Un glaciar en **cascada** es aquel en cuyo perfil longitudinal se observan varios escalones, que obedecen a cambios en el relieve subglacial. Una **caída de hielo** es un sector o frente glaciar de fuerte pendiente, y extenso fracturamiento, dentro del cual hay desprendimientos de masas de hielos y, en general, de aspecto caótico. Un



glaciar **regenerado** es aquel existente en la base de un farellón rocoso o de una fuerte pendiente rocosa, formado por acumulaciones de hielo desprendidas de un frente glaciar ubicado a mayor cota.

### 5.13.5. Clasificación según fuente principal de alimentación.

Según la forma de alimentación de nieve los glaciares se clasifican en:

0. Incierto o misceláneo.
1. Nieve o nieve en deriva.
2. Avalanchas de hielo o nieve
3. Hielo superimpuesto.

La forma normal de alimentación de un glaciar es por la precipitación nival o la acumulación de nieve a la deriva por el efecto del viento. En áreas montañosas altas y de fuertes pendientes es posible que la alimentación principal de los glaciares provenga de avalanchas de nieve y/o hielo, con o sin detrito. La forma principal de alimentación de los glaciares de roca es por avalanchas de nieve con abundante detrito proveniente de las laderas. El hielo superimpuesto es hielo que se forma sobre la superficie del glaciar por recongelamiento de agua habitualmente proveniente de la fusión del manto de nieve superior.

### 5.13.6. Clasificación según actividad de la lengua glaciar.

Según la actividad que se intuye de la lengua los glaciares se clasifican en:

0. **Incierto o misceláneo.**
1. **Retroceso marcado.** Igual o mayor a 20 m/año.
2. **Retroceso leve.** Menos a 20 m/año.
3. **Estacionario.** Sin cambio notable.
4. **Avance leve.** Menos a 20 m/año.
5. **Avance marcado.** Igual o mayor a 20 m/año.
6. **Posible surgiente.** Probable velocidad de 500 m/año o mayor,



7. **Surgiente conocida.** Velocidad conocida de 500 m/ año o mayor.
8. **Oscilante.** Variaciones conocidas de la posición de la lengua, en base a observaciones regulares.

### 5.13.7. Clasificación según actividad de la lengua glaciar.

Según la actividad que se intuye de la lengua los glaciares se clasifican en:

0. **Incierto o misceláneo.**
9. **Retroceso marcado.** Igual o mayor a 20 m/año.
10. **Retroceso leve.** Menos a 20 m/año.
11. **Estacionario.** Sin cambio notable.
12. **Avance leve.** Menos a 20 m/año.
13. **Avance marcado.** Igual o mayor a 20 m/año.
14. **Posible surgiente.** Probable velocidad de 500 m/año o mayor,
15. **Surgiente conocida.** Velocidad conocida de 500 m/ año o mayor.
16. **Oscilante.** Variaciones conocidas de la posición de la lengua, en base a observaciones regulares.

### 5.14. MORRENAS.

Clasificación de dos dígitos. El primer dígito para morrenas en contacto con el hielo y el segundo dígito para morrenas no en contacto con hielo y ubicadas usualmente aguas abajo del glaciar. En cada uno de estos casos se clasifican las morrenas de la siguiente manera:

- 0 sin morrenas
- 1 morrena terminal
- 2 morrena lateral y/o medial
- 3 morrena de empuje
- 4 combinación de 1 y 2
- 5 combinación de 1 y 3
- 6 combinación de 2 y 3



- 7 combinación de 1, 2 y 3
- 8 detrito, posiblemente morrénico
- 9 morrenas, tipo incierto o no listado.

### 5.15. PROFUNDIDAD O ESPESOR MEDIO.

Se define en metros. Desafortunadamente, existen muy pocos datos de espesor de glaciares en los Andes de Chile central como para derivar, a partir de estos datos, relaciones certeras entre la superficie cubierta por los glaciares y los espesores medios. Algunas relaciones de este tipo se muestran en la Tabla 5.15-A.

Ninguna de las relaciones área-espesor medio de glaciares de la Tabla 5.15-A representa adecuadamente los espesores medios de los glaciares comprobados con sondajes y estudios gravimétricos en glaciares estudiados por nuestra empresa. La razón de esto parece estar en el hecho que las relaciones de la tabla han sido obtenidas principalmente del análisis de glaciares bastante mayores en cuanto sus superficies.

Tabla 5.15-A. Relaciones entre área y espesor de glaciares.

Ubicación y autores	Área (km <sup>2</sup> )	Espesor medio (m)
Noruega, Ostrem y Ziegler, 1969	< 1	25
	1 - 5	50
	5 - 20	125
	> 20	200
Artico Canadiense, Ommaney, 1969	0 - 1	15
	1 - 2	20
	2 - 5	35
	5 - 20	50
	> 20	> 50
Montañas North Cascades, Washington, USA Post y otros, 1971	0 - 0,5	20
	0,5 - 1	40
	1 - 2	65
	2 - 5	90
	5 - 10	120
Alpes Suizos, Muller y otros, 1976	< 0,5	5
	0,5 - 23	$5,2 + 15,4 \times \text{Area}^{0,5}$
	> 23	Apreciación



Ubicación y autores	Área (km <sup>2</sup> )	Espesor medio (m)
Hoya del Río Maipo, Chile, Marangunic, 1979	< 0,10	5
	0,11 – 0,50	20
	0,51 – 1,00	40
	1,01 – 2,00	65
	2,01 – 5,00	90
	5,01 – 10,00	120
	10,01 – 20,00	155
	> 20,01	200

Para el presente inventario hemos estimado los espesores medios de los glaciares con la siguiente relación, que resulta de emplear los datos de extensión de la superficie de glaciares de los Andes del centro de Chile cuyos espesores han sido determinados mediante sondajes y/o estudios geofísicos, obteniendo la siguiente mejor correlación, que resulta con ajuste exponencial, entre la superficie de un glaciar y su espesor medio:

$$Y = A \times X^B$$

donde X es el área del glaciar e Y es el espesor medio, la constante A = 0,00944 y la constante B = 0,65185; para glaciares de superficie mayor que 5 km<sup>2</sup> el valor de las constantes es 0,08962 y 0,45257 respectivamente.

## 5.16. INVENTARIO DE GLACIARES EN EL SECTOR DE SAN ANDRÉS.

### 5.16.1. Inventario.

El inventario se realizó utilizando las recomendaciones de UNESCO, fotografías aéreas, imágenes satelitales y topografía disponible de escala 1:50.000.

El inventario detallado para este sector se muestra en la Tabla 5.16.1-A a continuación y en la Figura 5.16.1-A en Anexo 1.



Como ya se ha mencionado anteriormente, por falta de información topográfica, el inventario de glaciares esta incompleto para algunos glaciares, en algunos antecedentes requeridos, como por ejemplo la altitud máxima, la media de la zona de acumulación y la media de la zona de ablación, para el caso de los glaciares RCH-1-M-06025/021 a RCH-1-M-06025/039.

Los glaciares inventariados son 39, identificados del 001 a 039. De ellos, 22 son blancos y 17 de roca. De los 39 identificados, solo 2 son reconocidos en la literatura nacional o internacional, ambos son glaciares blancos y son los de mayor superficie en el área; se trata de los glaciares Universidad de 27,6 km<sup>2</sup> y Cortaderal de 5,8 km<sup>2</sup>.

El glaciar identificado con menor superficie es de 0,015 km<sup>2</sup>, y es un glaciar de roca.



Tabla 5.16.1-A. Inventario de glaciares sector San Andrés.

Identificación y número del glaciar	Nombre	Coordenadas wgs84-utm		Área de superficie km <sup>2</sup>			Área de ablación km <sup>2</sup>	ancho promedio (km)	Largo promedio (km)	Largo máximo (km)	Orientación (puntos cardinales)	Altitud			Clasificación	Morrenas
		ESTE	NORTE	total	precisión	Exposición						máxima (m)	media área acumulación (m)	media del área de ablación (m)		
RCH-1-M-06025/001		362674.146	6164120.97	0.51	2	0.27	0.24	1.22	0.33	0.58	NW	3425	3375	3310	640120	01
RCH-1-M-06025/002		363850.182	6164256.53	0.14	3	0	0.08	0.26	0.65	0.69	NW	3310	3200	2950	670322	03
RCH-1-M-06025/003		370341.579	6161837.44	0.43	2	0	0.33	0.74	0.5	0.9	SE	3360	3300	3200	940023	20
RCH-1-M-06025/004		370249.127	6160896.67	0.06	2	0	0.4	0.14	0.43	0.49	SE	3345	3305	3250	950123	20
RCH-1-M-06025/005		370765.396	6160751.94	0.02	1	0	0.01	0.15	0.16	0.23	E	3457	3425	3400	950123	10
RCH-1-M-06025/006		370548.436	6160308.86	0.04	1	0	0.03	0.26	0.12	0.25	SE	3605	3355	3500	950123	10
RCH-1-M-06025/007		370547.897	6158225.69	0.02	1	0	0.01	0.14	0.14	0.2	NW	3340	3300	3230	952123	10
RCH-1-M-06025/008		371602.825	6159990.68	1.04	1	0.57	0.47	0.47	1.14	2.03	NE	3915	3850	3550	630120	41
RCH-1-M-06025/009		371683.74	6164729.96	1.66	1	1.66	0.64	0.8	1.94	2.51	E	4375	4000	3500	650323	00
RCH-1-M-06025/010		372229.14	6163722.75	0.66	1	0.66	0.2	0.28	2.51	2.62	E	4490	3900	3500	650122	22
RCH-1-M-06025/011		373015.765	6162750.86	0.05	1	0.05	0.03	0.23	0.26	0.27	NE	4225	4175	4050	650220	00
RCH-1-M-06025/012		372836.564	6161925.27	1.27	1	1.17	0.33	0.47	1.9	2.89	SE	4565	4025	3750	650322	43
RCH-1-M-06025/013		373231.728	6160826.04	0.14	1	0.14	0.07	0.3	0.53	0.61	SE	4590	4500	4350	650123	00
RCH-1-M-06025/014		373996.118	6157893.08	0.25	1	0.25	0.14	0.44	0.69	0.91	NW	3200	2875	2650	754210	00
RCH-1-M-06025/015		374707.044	6158848.15	2.67	1	2.31	1.42	1.66	2.76	3.36	NW	4500	3400	2750	650110	34
RCH-1-M-06025/016		375495.727	6160402.93	1.64	1	1.64	0.53	1.34	1.37	1.75	N		3650	3350	423212	02



Identificación y número del glaciar	Nombre	Coordenadas wgs84-utm		Área de superficie km2			Área de ablación km2	ancho promedio (km)	Largo promedio (km)	Largo máximo (km)	Orientación (puntos cardinales)	Altitud			Clasificación	Morrenas
		ESTE	NORTE	total	precisión	Exposición						máxima (m)	media área acumulación (m)	media del área de ablación (m)		
RCH-1-M-06025/017	Universidad	378239.457	6160691.67	27.57	1	23.77	6.43	5.21	7.82	9.75	N	4900	3700	2825	520113	60
RCH-1-M-06025/018		379783.499	6163479.16	0.43	1	0.43	0.21	0.71	0.74	0.88	N	3650	3500	3425	630103	64
RCH-1-M-06025/019		380860.996	6163723.48	1.16	1	1.09	0.5	0.84	1.57	1.85	N	3775	3550	3350	630113	64
RCH-1-M-06025/020		381638.572	6163301.47	0.25	1	0.25	0.13	0.6	0.41	0.55	NE	3560	3475	3415	350113	70
RCH-1-M-06025/021		381460.84	6162468.56	0.24	1	0	0.155	0.28	0.85	0.91	E				930123	77
RCH-1-M-06025/022		381538.598	6162079.86	0.53	1	0	0.34	0.45	0.99	1.04	E				930123	77
RCH-1-M-06025/023		380666.158	6161213.63	0.75	1	0	0.29	1.26	1.05	1.23	NE				930123	77
RCH-1-M-06025/024		380854.997	6160580.62	0.01	1	0	0.01	0.14	0.09	0.13	SE				950120	77
RCH-1-M-06025/025		380632.833	6160314.08	0.55	1	0	0.02	0.26	0.25	0.33	SE				950120	77
RCH-1-M-06025/026		378888.843	6158870.36	0.89	1	0	0.04	0.14	0.46	0.67	NE				930123	71
RCH-1-M-06025/027		379410.929	6159136.9	0.03	1	0	0.01	0.13	0.22	0.3	NW				950123	76
RCH-1-M-06025/028		379755.284	6159336.8	0.21	1	0	0.07	0.29	1.1	1.28	NW				950123	78
RCH-1-M-06025/029		380066.314	6159669.96	0.07	1	0	0.01	0.21	0.41	0.41	W				950123	73
RCH-1-M-06025/030		380288.478	6159903.18	0.10	1	0	0.02	0.21	0.41	0.55	N				950123	73
RCH-1-M-06025/031		380555.075	6159347.9	0.30	1	0	0.18	0.27	1.07	1.24	N				935123	73
RCH-1-M-06025/032		381021.621	6159114.69	0.26	1	0	0.09	0.26	0.98	1.02	N				935123	73
RCH-1-M-06025/033	Cortaderal	383109.965	6159781.02	5.87	1	2.61	0.41	1.6	3.94	4.22	NE				520113	70



Identificación y número del glaciar	Nombre	Coordenadas wgs84-utm		Área de superficie km2			Área de ablación km2	ancho promedio (km)	Largo promedio (km)	Largo máximo (km)	Orientación (puntos cardinales)	Altitud			Clasificación	Morrenas
		ESTE	NORTE	total	precisión	Expuesta						máxima (m)	media área acumulación (m)	media del área de ablación (m)		
RCH-1-M-06025/034		383009.991	6157893.08	1.44	1	0	0.79	0.59	2.78	3.28	SE				930113	70
RCH-1-M-06025/035		381899.17	6156826.94	0.36	1	0	0.12	0.33	1.19	1.22	S				930123	75
RCH-1-M-06025/036		379699.743	6156449.36	0.11	1	0	0.05	0.26	0.48	0.501	SW				950123	75
RCH-1-M-06025/037		379184.67	6155184.05	0.08	1	0	0.05	0.25	0.44	0.51	W				950123	72
RCH-1-M-06025/038		377390.254	6155130.76	0.12	1	0	0.05	0.18	0.75	0.79	E				950123	73
RCH-1-M-06025/039		376879.169	6152588.76	0.87	2	0	0.03	0.06	1.03	1.1	S				950123	73



## 5.16.2. Volúmenes glaciares.

Para el sector de San Andrés, el área total cubierta por glaciares es de 41,7 km<sup>2</sup>. De ellos 4,8 km<sup>2</sup> son de glaciares de roca y 36,9 km<sup>2</sup> de glaciares blancos, pertenecientes estos últimos principalmente a los glaciares Universidad y Cortaderal.

El volumen total de glaciares es del orden de 7.708 millones de metros cúbicos de detrito, hielo y morrenas, los que contienen un total de aproximadamente 7.643 millones de metros cúbicos de solo hielo.

Los espesores máximos promedio, estimados paramétricamente, son para los glaciares blancos de aproximadamente 75 m. Los espesores máximos son de los glaciares Universidad con 210 m aproximadamente y del glaciar Cortaderal con 100 m aproximadamente.

Los glaciares de roca tienen un espesor promedio de 24 m, con espesores máximos de 66 m.

Un detalle del cálculo de volúmenes y espesores se muestra en la tabla 5.16.2-A a continuación.



**Tabla 5.16.2-A. Volúmenes y espesores de los glaciares en el sector de San Andrés.**

Nombre	Area (m <sup>2</sup> )	Area	Espesor	Vol Totl (m <sup>3</sup> )	Espesr detrít	% detríto	Espesor	% hielo	Espesor(m)	Vol nucleo hielo	Espes(m3)	Vol solo hielo (m3)
		(km <sup>2</sup> )	medio (m)		Sin hielo, en	en	morrena	en nucleo	nucleo con	con detríto+	solo hielo en	
					superfic (m)	morr. basal	basal (m)	glaciar	hielo+detrít	morr basl (m3)	nucl+morr	
GLACIARES BLANCOS												
RCH-1-M-06025/001	514194	0.514	49.86	25,638,767	0	50	0.50	100	49.36	25,638,767	49.61	25,510,219
RCH-1-M-06025/002	149218	0.149	22.26	3,321,609	0	50	0.50	100	21.76	3,321,609	22.01	3,284,305
RCH-1-M-06025/008	1041109	1.041	78.97	82,219,171	0	50	0.50	100	78.47	82,219,171	78.72	81,958,894
RCH-1-M-06025/009	1655048	1.655	106.83	176,813,033	0	50	0.50	100	106.33	176,813,033	106.58	176,399,271
RCH-1-M-06025/010	659130	0.659	58.62	38,640,200	0	50	0.50	100	58.12	38,640,200	58.37	38,475,418
RCH-1-M-06025/011	54364	0.054	11.53	626,608	0	50	0.50	100	11.03	626,608	11.28	613,017
RCH-1-M-06025/012	1268656	1.269	89.83	113,967,384	0	50	0.50	100	89.33	113,967,384	89.58	113,650,220
RCH-1-M-06025/013	142904	0.143	21.64	3,092,659	0	50	0.50	100	21.14	3,092,659	21.39	3,056,933
RCH-1-M-06025/014	253637	0.254	31.46	7,978,488	0	50	0.50	100	30.96	7,978,488	31.21	7,915,079
RCH-1-M-06025/015	2673351	2.673	146.03	390,395,156	0	50	0.50	100	145.53	390,395,156	145.78	389,726,819
RCH-1-M-06025/016	1,636,598	1.637	106.05	173,568,981	0	50	0.50	100	105.55	173,568,981	105.80	173,159,831
Universidad	27,568,741	27.569	208.8	5,756,353,121	0	50	0.50	100	208.30	5,756,353,121	208.55	5,749,460,936
RCH-1-M-06025/018	433,693	0.434	44.62	19,353,154	0	50	0.50	100	44.12	19,353,154	44.37	19,244,731
RCH-1-M-06025/019	1,156,286	1.156	84.56	97,779,172	0	50	0.50	100	84.06	97,779,172	84.31	97,490,101
RCH-1-M-06025/020	251,121	0.251	31.25	7,848,177	0	50	0.50	100	30.75	7,848,177	31.00	7,785,397



Nombre	Area (m <sup>2</sup> )	Area (km <sup>2</sup> )	Espesor medio (m)	Vol Totl (m <sup>3</sup> )	Espr detrít	% detrít en morr. basal	Espe sor	% híe lo	Espe sor(m)	Vol núe clo híe lo	Espe s(m3)	Vol só lo
					Sin híe lo, en		morre na	en núe clo	núe clo con	con detrit o+	só lo híe lo en	
					superf ic (m)		basal (m)	glaci ar	híe lo+detrít	morr basl (m3)	nucl+morr	híe lo (m3)
Cortaderal	5,866,466	5.866	103.0	604,245,998	0	50	0.50	100	102.50	604,245,998	102.75	602,779,382
<b>Totales</b>	<b>36,912,905</b>	<b>36.913</b>	<b>74.71</b>	<b>7,501,841,680</b>						<b>7,501,841,680</b>		<b>7,490,510,551</b>
<b>GLACIARES DE ROCA</b>												
RCH-1-M-06025/003	429,510	0.430	44.34	19,045,786	2.00	50	0.50	78	41.84	18,186,766	32.89	14,125,546
RCH-1-M-06025/004	58,142	0.058	12.04	700,156	2.00	50	0.50	78	9.54	583,872	7.69	447,280
RCH-1-M-06025/005	21,343	0.021	6.27	133,737	2.00	50	0.50	78	3.77	91,051	3.19	68,032
RCH-1-M-06025/006	40,978	0.041	9.59	392,838	2.00	50	0.50	78	7.09	310,882	5.78	236,751
RCH-1-M-06025/007	17,970	0.018	5.60	100,658	2.00	50	0.50	78	3.10	64,718	2.67	47,964
RCH-1-M-06025/021	242,185	0.242	30.52	7,392,232	2.00	50	0.50	78	28.02	6,907,862	22.11	5,354,227
RCH-1-M-06025/022	532,876	0.533	51.04	27,195,648	2.00	50	0.50	78	48.54	26,129,896	38.11	20,306,717
RCH-1-M-06025/023	754,290	0.754	64.01	48,281,829	2.00	50	0.50	78	61.51	46,773,249	48.23	36,377,534
RCH-1-M-06025/024	14,792	0.015	4.93	72,985	2.00	50	0.50	78	2.43	43,401	2.15	31,782
RCH-1-M-06025/025	54,583	0.055	11.56	630,783	2.00	50	0.50	78	9.06	521,617	7.31	399,220
RCH-1-M-06025/026	89,352	0.089	15.93	1,423,815	2.00	50	0.50	78	13.43	1,245,111	10.73	958,677
RCH-1-M-06025/027	26,593	0.027	7.23	192,320	2.00	50	0.50	78	4.73	139,134	3.94	104,801
RCH-1-M-06025/028	212,431	0.212	28.02	5,953,014	2.00	50	0.50	78	25.52	5,528,152	20.16	4,282,218
RCH-1-M-06025/029	68,301	0.068	13.37	913,525	2.00	50	0.50	78	10.87	776,923	8.73	596,438



Nombre	Area (m <sup>2</sup> )	Area (km <sup>2</sup> )	Espesor medio (m)	Vol Totl (m <sup>3</sup> )	Espsr detrít	% detrít en morr. basal	EspeSor	% hielo	EspeSor(m)	Vol nucleo hielo	EspeS(m3)	Vol solo
					Sin hielo, en		morrena	en nucleo	nucleo con	con detrít+	solo hielo en	
					superfíc (m)		basal (m)	glaciar	hielo+detrít	morr basl (m3)	nucl+morr	hielo (m3)
RCH-1-M-06025/030	96,104	0.096	16.71	1,605,881	2.00	50	0.50	78	14.21	1,413,673	11.33	1,089,211
RCH-1-M-06025/031	299,890	0.300	35.09	10,521,839	2.00	50	0.50	78	32.59	9,922,059	25.67	7,697,221
RCH-1-M-06025/032	264,137	0.264	32.30	8,531,406	2.00	50	0.50	78	29.80	8,003,132	23.49	6,205,464
RCH-1-M-06025/034	793,191	0.793	66.14	52,463,731	2.00	50	0.50	78	63.64	50,877,349	49.89	39,573,286
RCH-1-M-06025/035	356,875	0.357	39.30	14,024,770	2.00	50	0.50	78	36.80	13,311,020	28.95	10,332,633
RCH-1-M-06025/036	112,164	0.112	18.48	2,072,872	2.00	50	0.50	78	15.98	1,848,544	12.71	1,426,161
RCH-1-M-06025/037	83,295	0.083	15.22	1,267,933	2.00	50	0.50	78	12.72	1,101,343	10.17	847,386
RCH-1-M-06025/038	115,257	0.115	18.81	2,168,139	2.00	50	0.50	78	16.31	1,937,625	12.97	1,495,212
RCH-1-M-06025/039	87,071	0.087	15.67	1,364,276	2.00	50	0.50	78	13.17	1,190,134	10.52	916,114
Totales	4,771,330	4.771	24.44	206,450,175						196,907,515		152,919,876
<b>TOTALES</b>	<b>41,684,235</b>	<b>41.684</b>		<b>7,708,291,855</b>						<b>7,698,749,195</b>		<b>7,643,430,426</b>



## 5.17. INVENTARIO DE GLACIARES EN EL SECTOR EL PASO.

### 5.17.1. Inventario.

El inventario se realizó utilizando las recomendaciones de UNESCO, fotografías aéreas, imágenes satelitales y topografía disponible 1:50.000.

El inventario detallado para este sector se muestra en la Tabla 5.17.1-A a continuación y en la Figura 5.17.1-A en Anexo 1.

Como ya se ha mencionado anteriormente, por falta de información topográfica, el inventario de glaciares esta incompleto para algunos glaciares en algunos antecedentes requeridos, como por ejemplo la altitud máxima, media de la zona de acumulación y media de la zona de ablación, para los glaciares RCH-1-M-06025/050 a RCH-1-M-06025/066.

Los glaciares inventariados son 27, identificados del 040 al 66, siguiendo la numeración del sector de San Andrés. De ellos, 6 son glaciares blancos y 21 de roca, y ninguno de ellos ha sido reconocido en literatura nacional o internacional. Los glaciares en esta área son todos menores, con una superficies inferiores a 0,7 km<sup>2</sup>.



**Tabla 5.17.1-A: Inventario Sector El Paso.**

Identificación y número del glaciar	Nombre	Coordenadas wgs84-utm		Área de superficie km2			Área de ablación km2	ancho promedio (km)	Largo promedio (km)	Largo máximo (km)	Orientación (puntos cardinales)	Altitud			Clasificación	Morrenas
		ESTE	NORTE	total	precisión	exposición						máxima (m)	media área acumulación (m)	media del área de ablación (m)		
RCH-1-M-06025/040		371328.907	6136681.54	0.04	1	0	0.02	0.91	0.39	0.40	NE	3400	3325	3250	950123	77
RCH-1-M-06025/041		371108.792	6136021.35	0.10	1	0	0.04	0.17	0.49	0.62	NE	3225	3150	3040	950123	77
RCH-1-M-06025/042		371749.129	6135587.89	0.23	1	0	0.10	0.43	0.64	0.73	NW	3210	3100	3030	950123	73
RCH-1-M-06025/043		372369.457	6135794.61	0.19	1	0	0.07	0.30	0.77	0.80	NW	3125	2950	2880	950123	73
RCH-1-M-06025/044		372382.8	6137195.02	0.68	1	0.68	0.29	1.03	0.70	0.84	NW	3625	3450	3360	654210	02
RCH-1-M-06025/045		373249.929	6137281.71	0.14	1	0.14	0.06	0.31	0.47	0.67	NW	3540	3450	3315	650210	00
RCH-1-M-06025/046		373683.494	6137575.14	0.34	1	0	0.02	0.20	1.40	1.58	NW	3450	3340	3225	950123	77
RCH-1-M-06025/047		373723.51	6138308.68	0.61	1	0.61	0.20	0.93	0.61	0.85	N	3555	3410	3300	654110	02
RCH-1-M-06025/048		374857.448	6138695.46	0.27	1	0.27	0.08	0.90	0.39	0.52	NW	3475	3350	3275	650100	02
RCH-1-M-06025/049		375591.173	6139549.04	20.06	1	20.6	0.03	0.34	0.40	0.52	NW	3525	3475	3400	651210	02
RCH-1-M-06025/050		379467.4	6142924.23	0.05	2	0	0.04	0.11	0.59	0.61	NE				950120	71
RCH-1-M-06025/051		379305.963	6141018.63	0.04	2	0	0.10	0.19	0.28	0.36	NE				950120	71
RCH-1-M-06025/052		380421.439	6137347.83	0.15	2	0	0.07	0.26	0.60	0.72	SE				950120	71
RCH-1-M-06025/053		379573.147	6135929.94	0.24	2	0	0.08	0.27	0.86	1.01	SE				930120	72
RCH-1-M-06025/054		378963.432	6135664.91	0.50	2	0	0.23	0.39	1.55	1.87	SE				930120	76
RCH-1-M-06025/055		378393.487	6135293.87	0.01	2	0	0.00	0.09	0.17	0.18	S				950120	71



Identificación y número del glaciar	Nombre	Coordenadas wgs84-utm		Área de superficie km2			Área de ablación km2	ancho promedio (km)	Largo promedio (km)	Largo máximo (km)	Orientación (puntos cardinales)	Altitud			Clasificación	Morrenas
		ESTE	NORTE	total	precisión	exposición						máxima (m)	media área acumulación (m)	media del área de ablación (m)		
RCH-1-M-06025/056		378141.649	6134949.33	0.04	2	0	0.02	0.14	0.33	0.35	E				950120	70
RCH-1-M-06025/057		378512.776	6134485.54	0.34	2	0	0.21	0.54	0.60	1.01	E				930120	70
RCH-1-M-06025/058		377863.301	6133875.97	0.22	2	0	0.14	0.69	0.39	0.41	SE				930120	71
RCH-1-M-06025/059		376554.091	6133009.97	0.40	2	0	0.13	0.21	1.14	1.68	NE				950120	70
RCH-1-M-06025/060		378131.774	6132431.31	57.88	2	0.5	0.32	0.83	0.76	1.38	NE				650110	10
RCH-1-M-06025/061		378019.209	6131614.15	0.14	2	0	0.10	0.21	0.62	0.83	NE				950120	71
RCH-1-M-06025/062		374486.626	6130965.36	0.04	2	0	0.01	0.14	0.29	0.30	NE				950120	70
RCH-1-M-06025/063		375277.928	6130749.6	0.09	2	0	0.03	0.13	0.61	0.75	NE				950120	70
RCH-1-M-06025/064		376959.764	6130783.41	0.09	2	0	0.03	0.27	0.38	0.52	NE				950120	72
RCH-1-M-06025/065		377832.246	6130700.33	0.28	2	0	0.09	0.36	0.78	0.88	E				950120	72
RCH-1-M-06025/066		377811.477	6128457.34	0.12	2	0	0.03	0.26	0.46	0.51	NE				950120	72



## 5.17.2. Volúmenes de glaciares en el sector de El Paso.

Para el sector de El Paso, el área total cubierta por glaciares es de 6,2 km<sup>2</sup>, de ellos 3,7 km<sup>2</sup> son de glaciares de roca y 2,5 km<sup>2</sup> de glaciares blancos .

El volumen total de glaciares es de 244 millones de metros cúbicos de detrito, hielo y morrenas, los que contienen un total de 211 millones de metros cúbicos de solo hielo.

Los espesores máximos promedio estimados paraméricamente son para los glaciares blancos de aproximadamente 40 m, con un máximo de 60 m.

Los glaciares de roca tienen un espesor promedio de 23 m, con espesores máximos de 50 m.

Un detalle del cálculo de volúmenes y espesores se muestra en la tabla 5.16.2-A a continuación.



**Tabla 5.17.2-A: Volúmenes y espesores en el sector del El Paso.**

Nombre	Area (m <sup>2</sup> )	Area (km <sup>2</sup> )	Espesor medio (m)	Vol Totl (m <sup>3</sup> )	Espsr detrít	% detrít en	Espesor	% hielo	Espesor(m)	Vol nucleo hielo	Espes(m3)	Vol solo
					sin hielo, en		morrena	en nucleo	nucleo con	con detrít+	solo hielo en	
					superfíc (m)	morr. basal	basal (m)	glaciar	hielo+detrít	morr basl (m3)	nucl+morr	hielo (m3)
<b>GLACIARES BLANCOS</b>												
RCH-1-M-06025/044	677743.9325	0.678	59.70	40,459,244	0	50	0.50	100	59.20	40,459,244	59.45	40,289,809
RCH-1-M-06025/045	140909.3249	0.141	21.44	3,021,677	0	50	0.50	100	20.94	3,021,677	21.19	2,986,450
RCH-1-M-06025/047	609723.5109	0.610	55.72	33,973,778	0	50	0.50	100	55.22	33,973,778	55.47	33,821,347
RCH-1-M-06025/048	272,375	0.272	32.95	8,975,388	0	50	0.50	100	32.45	8,975,388	32.70	8,907,295
RCH-1-M-06025/049	127173.1896	0.127	20.06	2,550,749	0	50	0.50	100	19.56	2,550,749	19.81	2,518,956
RCH-1-M-06025/060	646389.9732	0.646	57.88	37,414,291	0	50	0.50	100	57.38	37,414,291	57.63	37,252,693
Totales	2,474,315.022	2.474	41.29	126,395,128						126,395,128		125,776,550
<b>GLACIARES DE ROCA</b>												
RCH-1-M-06025/040	36,948	0.037	8.96	331,092	2.00	50	0.50	78	6.46	257,196	5.29	195,440
RCH-1-M-06025/041	104,987	0.105	17.70	1,858,395	2.00	50	0.50	78	15.20	1,648,420	12.11	1,271,069
RCH-1-M-06025/042	225,611	0.226	29.14	6,575,369	2.00	50	0.50	78	26.64	6,124,147	21.03	4,745,249
RCH-1-M-06025/043	189,163	0.189	25.98	4,914,885	2.00	50	0.50	78	23.48	4,536,559	18.57	3,512,034
RCH-1-M-06025/046	336,184	0.336	37.80	12,707,168	2.00	50	0.50	78	35.30	12,034,799	27.78	9,340,078
RCH-1-M-06025/050	54,979	0.055	11.61	638,361	2.00	50	0.50	78	9.11	528,403	7.36	404,457
RCH-1-M-06025/051	41,981	0.042	9.74	408,849	2.00	50	0.50	78	7.24	324,887	5.90	247,534
RCH-1-M-06025/052	145,307	0.145	21.88	3,179,035	2.00	50	0.50	78	19.38	2,888,421	15.36	2,232,625



Nombre	Area (m <sup>2</sup> )	Area (km <sup>2</sup> )	Espesor medio (m)	Vol Totl (m <sup>3</sup> )	Espsr detrít	% detrít en morr. basal	Espe sor	% hielo en nucleo glaciar	Espe sor(m)	Vol nucleo hielo con detrít+	Espe s(m3)	Vol solo hielo (m3)
					sin hielo, en		morrena		nucleo con		solo hielo en	
					superfíc (m)		basal (m)		hielo+detrít		morr basal (m3)	
RCH-1-M-06025/053	241,904	0.242	30.50	7,378,064	2.00	50	0.50	78	28.00	6,894,256	22.09	5,343,653
RCH-1-M-06025/054	503,514	0.504	49.18	24,765,093	2.00	50	0.50	78	46.68	23,758,065	36.66	18,460,799
RCH-1-M-06025/055	14,947	0.015	4.97	74,249	2.00	50	0.50	78	2.47	44,356	2.17	32,505
RCH-1-M-06025/056	36,030	0.036	8.82	317,609	2.00	50	0.50	78	6.32	245,549	5.18	186,484
RCH-1-M-06025/057	344,038	0.344	38.37	13,201,257	2.00	50	0.50	78	35.87	12,513,181	28.23	9,712,116
RCH-1-M-06025/058	220,271	0.220	28.69	6,320,294	2.00	50	0.50	78	26.19	5,879,751	20.68	4,555,368
RCH-1-M-06025/059	395,731	0.396	42.04	16,635,590	2.00	50	0.50	78	39.54	15,844,127	31.09	12,303,016
RCH-1-M-06025/061	139,757	0.140	21.33	2,980,978	2.00	50	0.50	78	18.83	2,701,463	14.94	2,087,575
RCH-1-M-06025/062	37,205	0.037	9.00	334,907	2.00	50	0.50	78	6.50	260,496	5.32	197,978
RCH-1-M-06025/063	87,259	0.087	15.69	1,369,136	2.00	50	0.50	78	13.19	1,194,619	10.54	919,586
RCH-1-M-06025/064	92,863	0.093	16.34	1,517,415	2.00	50	0.50	78	13.84	1,331,689	11.05	1,025,717
RCH-1-M-06025/065	280,898	0.281	33.62	9,444,014	2.00	50	0.50	78	31.12	8,882,219	24.52	6,888,805
RCH-1-M-06025/066	123,584	0.124	19.69	2,432,939	2.00	50	0.50	78	17.19	2,185,771	13.66	1,687,599
Totales	3,653,162	3.653	22.91	117,384,699						110,078,374		85,349,689
TOTALES	6,127,477	6		243,779,827						236,473,502		211,126,238



## 6. VARIACIONES DE LOS GLACIARES.

### 6.1. ASPECTOS GENERALES.

La determinación de las variaciones de los glaciares para esta área de estudio ha sido dificultada por la falta de información y trabajos de terreno, y en especial la falta de juegos de imágenes o fotografías correspondientes a diferentes años.

A pesar que para los sectores de San Andrés y El Paso, existen fotografías aéreas de 1997 e imagen satelital de calidad del año 2007 (aproximadamente), las técnicas de identificación y de delimitación de glaciares son diferentes para cada metodología (imagen o foto aérea). Por ello no es posible comparar entre ellas, debido a la baja confiabilidad de la conversión desde el programa Google Earth a ErMapper o AutoCad.

Aún así, tras una revisión de los límites de las frentes de los glaciares, al comparar visualmente las imágenes de 1997 con aquellas del 2007, no se observan cambio de los frentes, por lo tanto se estima que los frentes glaciares están estables en el último decenio, sin variaciones notorias en las imágenes.

### 6.2. VARIACIÓN GENERAL DE LOS GLACIARES.

La frente de un glaciar varía como respuesta a los cambios de espesor (y/o volumen) que se producen en las zonas de acumulación y ablación, y el tiempo que tardan estos cambios en reflejarse en la frente del glaciar (la velocidad de movimiento del glaciar). Por lo tanto cuando se habla del retroceso o avance de las frentes glaciares, ello implica también variaciones de volumen en las zonas de acumulación y de ablación.

Cuando un glaciar está estable, el volumen de hielo que se gana en la zona de acumulación por un período de tiempo, es igual al volumen que se pierde en la zona de ablación en el mismo período de tiempo. Reducciones de volumen (pérdidas de masa) producen retroceso del frente, pero el tiempo en que una reducción de volumen se refleja en retroceso del frente depende de la velocidad de movimiento. En glaciares pequeños el tiempo de respuesta es



breve, instantáneo o de pocos años; en glaciares mayores puede ser de decenas de años e incluso siglos.

Por lo anterior, es posible que se produzca en un instante (un año) un balance de masa positivo pero que el frente glaciar se encuentra retrocediendo, y vice-versa, reflejando el balance de masa y espesor de hielo que transitó desde la zona de acumulación hacia la de ablación, hace decenas o cientos de años atrás en el caso de los glaciares mayores.

La posición y variación del frente de un glaciar esta dada básicamente por:

- Características climáticas locales de cada glaciar (variación en la precipitación de nieve y de otros parámetros importantes tales como temperatura, radiación onda corta y larga, humedad relativa, etc)
- Tipo de glaciar (frío o temperado) y forma de la cuenca que lo alberga
- Exposición de la zona de acumulación
- Espesores del glaciar
- Velocidades de movimiento a lo largo del glaciar
- Pendiente de la base del glaciar
- Rugosidad de la base del glaciar

Por lo tanto, para conocer las causas específicas del retroceso de los frentes glaciares, es necesario estudiar, además de los cambios climáticos que han ocurrido desde hace decenas o centenas de años, considerar también los otros parámetros que inciden en determinar las variaciones. En esto es importante destacar que mientras mas grandes son los glaciares, los efectos de los cambios climáticos se reflejan en variaciones de las frentes también a mas largo plazo.

En glaciares pequeños los efectos de los cambios climáticos pueden ser observados en el corto plazo, ya que en los pequeños glaciares estos cambios se reflejan rápidamente en la posición de las frentes y en los espesores de hielo. Esto ocurre en cuestión de decenas de años, o incluso en unos pocos años, en glaciares muy pequeños.



## 7. ESTIMACIONES DEL BALANCE DE MASA Y EFECTO DE POLVO SOBRE LOS GLACIARES.

### 7.1. **BALANCE DE MASAS Y APORTES HIDRICOS DE LOS GLACIARES.**

#### 7.1.1. Aspectos generales.

El balance de masas de un glaciar es la determinación de la masa de nieve y hielo ganada en un ciclo anual en la Zona de Acumulación de un glaciar, y su comparación con la masa perdida, también en un ciclo anual, en la Zona de Ablación de un glaciar. En otras palabras, el Balance de Masa (BM) de un glaciar es:

$$BM = \text{Masa ganada en Zona Acumulación} - \text{Masa perdida en Zona de Ablación.}$$

Un glaciar está en equilibrio cuando BM es igual a 0 a mediano o largo plazo, aceptando que las condiciones anuales suelen ser diferentes de 0, ya sea positivas o negativas, reflejando las particularidades climáticas del año en consideración. Un glaciar en equilibrio implica que en el mediano o largo plazo su frente no avanza ni retrocede, que la superficie del glaciar mantiene la cota y también la forma, y que se mantiene el volumen y la masa del glaciar.

El balance de masa de un glaciar debe considerar no solo la masa ganada o perdida, en un ciclo anual en la superficie de cada zona de un glaciar, sino también la pérdida o ganancia de masa en la base del glaciar. Para que tenga sentido, y no refleje solamente las posibles especiales condiciones climáticas de un año en particular, el balance de masas de un glaciar debe medirse durante varios años, en lo posible con un monitoreo de manera permanente.

El balance de masa de un glaciar puede evaluarse de diferentes maneras, siendo el **método glaciológico** el más correcto. Este método consiste en medir la pérdida o ganancia de masa en puntos (estacas) en la superficie del glaciar, seleccionados de manera tal en su ubicación que representen las condiciones de sectores específicos de un glaciar y, el conjunto, las condiciones en todo el todo el glaciar. Según las recomendaciones de UNESCO (2003) se requieren al menos 10 a 15 puntos en cada glaciar pequeño, y más puntos en glaciares



mayores. Las pérdidas en la base de un glaciar deben evaluarse por métodos indirectos. Desarrollado correctamente, este método glaciológico produce balances anuales de adecuada precisión.

Otro método de estimar el balance de masas de un glaciar es el **geodésico**, comparando superficies (área y cota) de un glaciar en planos topográficos de años sucesivos, obteniendo así las diferencias de volumen y masa entre un año y otro. Este método se emplea normalmente como un control del método glaciológico, porque permite inferir la tendencia general del balance de masas en un glaciar, pero no es suficientemente preciso para evaluar el balance anual.

Un tercer método es el **hidrológico**. Un glaciar actúa como un reservorio, con ganancias y pérdidas según las temporadas. Así, el balance de masas (BM) de un glaciar puede evaluarse como el residual de los otros términos del balance hídrico de una cuenca con glaciares:

$$BM = P - Q - E \pm S \pm G$$

en que P es la precipitación, Q el escurrimiento superficial y subterráneo, E la evaporación, S la variación de los elementos de almacenamiento, como ser de las aguas subterráneas o la interceptación, y G el aporte neto (positivo o negativo) del glaciar. Si un glaciar pierde masa y la entrega a la cuenca, G será negativo, en caso contrario será positivo, y si el glaciar está en equilibrio  $G = 0$ . Este método requiere de una excepcionalmente buena instrumentación para medir todas las variables, lo cual suele ser de alto costo y mucho esfuerzo en regiones de alta montaña, en particular porque extrapolar datos de una sola estación a las condiciones en toda la cuenca lleva implícito importantes incertidumbres.

Un cuarto método consiste en evaluar la masa que transita anualmente por la **Línea de Equilibrio** de un glaciar, y comparar esta con la masa perdida o ganada en una de las zonas (ya sea de acumulación, o bien de ablación). El método no refleja con exactitud el balance anual, pero sí muestra la condición a mediano o largo plazo, dependiendo del tamaño del



glaciar. Para aplicar este método se requiere conocer la posición de la Línea de Equilibrio (algo incierto en los glaciares de roca), el espesor del glaciar en la Línea de Equilibrio, las velocidades en superficie del glaciar, y las velocidades en profundidad y la base del glaciar.

En glaciares en equilibrio, donde la masa ganada anualmente en la Zona de Acumulación es igual a la perdida anualmente en la Zona de Ablación, interesa conocer el intercambio de masas entre ambas zonas.

Todos los glaciares de roca se nutren de aportes de nieve y hielo provenientes principalmente de avalanchas de nieve, de precipitación nival directa en las cabeceras, también probablemente de formas de recongelamiento en la base del detrito superficial en invierno en los sectores altos de la Zona de Alimentación, y de aportes de detritos que llegan incorporados en las avalanchas y que también caen directamente sobre la superficie del glaciar. Las formas de pérdida de la masa de nieve y hielo de un glaciar de roca temperado comprende a todos los fenómenos incluidos en la ablación de la cubierta de nieve invernal y, además: (i) la fusión en el techo del hielo bajo el detrito superficial por transmisión de calor a través del detrito, (ii) la fusión en la base del glaciar por el flujo de calor geotérmico y (iii) la fusión en la base del glaciar por el calor originado por la fricción entre el glaciar y el material bajo el. La masa detrítica que transporta el glaciar es, en una parte mínima, erosionada desde la superficie del glaciar por los caudales del agua de fusión, y es principalmente depositada en las morrenas de fondo y marginales; una parte de la fracción más fina escurre con el agua de fusión (la mayor parte es retenida en el hielo del glaciar y luego aportada a las morrenas).

Considerando que no contamos con ningún dato en el área de estudio para evaluar los balances de masas de los glaciares, el ejercicio que sigue debe entenderse solo como un intento de evaluar, de manera muy preliminar, solo el orden de magnitud de las cifras involucradas, y sólo con el método de la Línea de Equilibrio.

Como se ha mencionado previamente, todos los glaciares del área del presente estudio parecen encontrarse en equilibrio, vale decir que la suma de las masas ganadas durante el



invierno en sus zonas de acumulación es igual a las masas perdidas durante el verano en las zonas de ablación, con un balance de masas igual a cero.

## 7.1.2. Estimación de balance de masa según velocidades y espesores de los glaciares.

El balance de masa de un glaciar es el resultado, al fin de un ciclo anual, de sumar todas las pérdidas de masa, y todas las ganancias. Es más bien raro que exista un año con balance de masa cero; lo común en un glaciar estacionario es que existan años de balance positivos y otros negativos, pero que en plazos mayores que el anual la suma de los balances anuales sea igual cero. En un glaciar en equilibrio no solo el frente del glaciar permanece estacionario, sino también la forma de la superficie del glaciar, aunque este esté en movimiento. Para que lo anterior sea posible, las mayores velocidades de movimiento se deben registrar (excepto cuando existen protuberancias en el lecho del glaciar) en el límite entre la zona superior de ganancia de masa y la zona inferior de pérdida de masa; este límite es la Línea de Equilibrio. En un año, toda la masa ganada en la parte superior de un glaciar transita a través de la Línea de Equilibrio para compensar la masa perdida en la parte inferior. Este tránsito se expresa en las velocidades del glaciar en la Línea de Equilibrio, de manera que conociendo la sección del glaciar en la Línea de Equilibrio y las velocidades en la sección, es posible calcular la masa que transita por ella. Una estimación aproximada del volumen que transita anualmente por la sección de la Línea de Equilibrio se obtiene de la expresión:

$$\text{Volumen Anual} = \text{Área de la sección} \times \text{Velocidad} \times 0,6 \quad (\text{en metros cúbicos})$$

en que la Velocidad es la media anual máxima en superficie, expresada en m/año, y el Área de la sección es expresada en m<sup>2</sup>.

Para estimar el tránsito de masas a través de la Línea de Equilibrio de los glaciares de las áreas de San Andrés y El Paso calculamos el área de la sección como el ancho promedio (obtenidos de la base topográfica) por un espesor de la sección igual al espesor medio de



hielo del glaciar (ver Tabla 5.16-2-A y 5.17.2-A) por un factor de 1,3 debido a la forma elipsoide de la sección del glaciar.

Las velocidades máximas estimadas para glaciares pequeños son entre 0,5 y 10 m/año y para glaciares mayores como el Universidad y el Cortaderal se estima entre 10 y 100 m/año.

Los resultados del intercambio de masas de solo hielo (sin incluir el detrito rocoso) se estiman como se indica en la Tabla 7.1.2-A.

En esta tabla se observa que para el sector de San Andrés el volumen equivalente en agua que transita por la línea de equilibrio de los glaciares es entre 9,2 y 95,2 millones de metros cúbicos de agua, es decir entre 0,29 y 3,02 m<sup>3</sup>/s. En el sector de El paso volumen equivalente en agua que transita por la línea de equilibrio de los glaciares es entre 0,13 y 2,53 millones de metros cúbicos de agua, es decir entre 0,004 y 0,08 m<sup>3</sup>/s.

Si se consideran cambios climáticos como los actualmente previstos en cuanto aumento de temperatura, reducción de precipitaciones y efectos en otras zonas de glaciares, es posible estimar, de manera muy general, que los glaciares blancos más pequeños persistirán del orden de entre 7 y 130 años, y los glaciares mayores entre 60 y 500 años, aunque para los grandes glaciares Universidad y Cortaderal este tiempo puede llegar a ser de hasta 2.000 años. Los glaciares de roca, menos afectados por los cambios climáticos debido al efecto protector de la cubierta de detritos, persistirán más años que los glaciares blancos, probablemente del orden de 4 a 6 veces el número de años antes señalado.

Los glaciares en equilibrio no aportan agua a la cuenca, solo regulan los caudales, como parece ser la situación actual en el las áreas analizadas. De ocurrir una reducción de masa y retroceso de frentes de los glaciares, como respuesta de los glaciares a futuros cambios climáticos, habrá un mayor aporte de agua al inicio del proceso, mayor aporte que se irá reduciendo en el tiempo hasta extinguirse totalmente el mayor aporte y también la capacidad de regulación junto con los glaciares. Considerando la presencia de glaciares blancos y de roca, este mayor aporte puede ser, inicialmente, del orden de 0,1 o más % del volumen de



hielo presente en los glaciares, vale decir, del orden de 190.000 m<sup>3</sup> de agua anuales en el sector El Paso, y del orden de 6.900.000 m<sup>3</sup> anuales en el sector de San Andrés.



**Tabla 7.1.2-A. Estimación de caudales y balance de masa.**

Identificación y número del glaciar	Nombre	Ancho promedio (m)	Profundidad media (m)	Sección elipsoide (m <sup>2</sup> )	Velocidad (m/año)		Volumen de hielo (m <sup>3</sup> /año)		Volumen de agua (m <sup>3</sup> /año)		Volumen total hielo glaciar (m <sup>3</sup> )	Extinción de los glaciares (años)	
					Min	Max	Min	Max	Min	Max		Min	Max
<b>SECTOR SAN ANDRÉS</b>													
RCH-1-M-06025/001		1220	49.86	79081	0.5	10	23724	474487	21352	427039	25,510,219	1,075	54
RCH-1-M-06025/002		260	22.26	7524	0.5	10	2257	45144	2031	40629	3,284,305	1,455	73
RCH-1-M-06025/003		740	44.34	42658	0.5	10	12797	255948	11518	230353	14,125,546	1,104	55
RCH-1-M-06025/004		140	12.04	2192	0.5	10	658	13150	592	11835	447,280	680	34
RCH-1-M-06025/005		150	6.27	1222	0.5	10	367	7331	330	6598	68,032	186	9
RCH-1-M-06025/006		260	9.59	3240	0.5	10	972	19442	875	17497	236,751	244	12
RCH-1-M-06025/007		140	5.60	1019	0.5	10	306	6117	275	5505	47,964	157	8
RCH-1-M-06025/008		470	78.97	48252	0.5	10	14476	289514	13028	260562	81,958,894	5,662	283
RCH-1-M-06025/009		800	106.83	111106	0.5	10	33332	666635	29999	599972	176,399,271	5,292	265
RCH-1-M-06025/010		280	58.62	21339	0.5	10	6402	128033	5761	115229	38,475,418	6,010	301
RCH-1-M-06025/011		230	11.53	3446	0.5	10	1034	20678	931	18610	613,017	593	30
RCH-1-M-06025/012		470	89.83	54888	0.5	10	16466	329328	14820	296396	113,650,220	6,902	345
RCH-1-M-06025/013		300	21.64	8440	0.5	10	2532	50641	2279	45577	3,056,933	1,207	60
RCH-1-M-06025/014		440	31.46	17993	0.5	10	5398	107958	4858	97162	7,915,079	1,466	73
RCH-1-M-06025/015		1660	146.03	315137	0.5	10	94541	1890824	85087	1701742	389,726,819	4,122	206
RCH-1-M-06025/016		1340	106.05	184747	0.5	10	55424	1108484	49882	997636	173,159,831	3,124	156
RCH-1-M-06025/017	Universidad	5210	208.80	1414202	10	100	8485214	84852144	7636693	76366930	5,749,460,936	678	68
RCH-1-M-06025/018		710	44.62	41188	0.5	10	12356	247128	11121	222415	19,244,731	1,557	78
RCH-1-M-06025/019		840	84.56	92343	0.5	10	27703	554058	24933	498652	97,490,101	3,519	176
RCH-1-M-06025/020		600	31.25	24377	0.5	10	7313	146262	6582	131636	7,785,397	1,065	53
RCH-1-M-06025/021		280	30.52	11110	0.5	10	3333	66662	3000	59996	5,354,227	1,606	80
RCH-1-M-06025/022		450	51.04	29856	0.5	10	8957	179135	8061	161221	20,306,717	2,267	113
RCH-1-M-06025/023		1260	64.01	104848	0.5	10	31454	629087	28309	566178	36,377,534	1,157	58
RCH-1-M-06025/024		140	4.93	898	0.5	10	269	5388	242	4849	31,782	118	6
RCH-1-M-06025/025		260	11.56	3906	0.5	10	1172	23436	1055	21093	399,220	341	17
RCH-1-M-06025/026		140	15.93	2900	0.5	10	870	17401	783	15661	958,677	1,102	55
RCH-1-M-06025/027		130	7.23	1222	0.5	10	367	7333	330	6600	104,801	286	14
RCH-1-M-06025/028		290	28.02	10565	0.5	10	3169	63389	2852	57050	4,282,218	1,351	68
RCH-1-M-06025/029		210	13.37	3651	0.5	10	1095	21908	986	19717	596,438	544	27



Identificación y número del glaciar	Nombre	Ancho promedio (m)	Profundidad media (m)	Sección elipsoide (m <sup>2</sup> )	Velocidad (m/año)		Volumen de hielo (m <sup>3</sup> /año)		Volumen de agua (m <sup>3</sup> /año)		Volumen total hielo glaciar (m <sup>3</sup> )	Extinción de los glaciares (años)	
					Min	Max	Min	Max	Min	Max		Min	Max
RCH-1-M-06025/030		210	16.71	4562	0.5	10	1369	27371	1232	24634	1,089,211	796	40
RCH-1-M-06025/031		270	35.09	12315	0.5	10	3695	73890	3325	66501	7,697,221	2,083	104
RCH-1-M-06025/032		260	32.30	10917	0.5	10	3275	65503	2948	58952	6,205,464	1,895	95
RCH-1-M-06025/033	Cortaderal	1600	103.00	214240	10	100	1285440	12854400	1156896	11568960	602,779,382	469	47
RCH-1-M-06025/034		590	66.14	50731	0.5	10	15219	304388	13697	273950	39,573,286	2,600	130
RCH-1-M-06025/035		330	39.30	16859	0.5	10	5058	101155	4552	91040	10,332,633	2,043	102
RCH-1-M-06025/036		260	18.48	6246	0.5	10	1874	37479	1687	33731	1,426,161	761	38
RCH-1-M-06025/037		250	15.22	4947	0.5	10	1484	29683	1336	26715	847,386	571	29
RCH-1-M-06025/038		180	18.81	4402	0.5	10	1321	26411	1189	23770	1,495,212	1,132	57
RCH-1-M-06025/039		60	15.67	1222	0.5	10	367	7333	330	6600	916,114	2,499	125
<b>TOTALES SAN ANDRES ( m<sup>3</sup>/año y promedios de años)</b>									<b>9,155,754</b>	<b>95,179,193</b>	<b>7,643,430,426</b>	<b>1,788</b>	<b>91</b>
<b>SECTOR EL PASO</b>													
RCH-1-M-06025/040		913	8.96	10636	0.5	10	3191	63815	2872	57433	195,440	61	3
RCH-1-M-06025/041		171	17.70	3935	0.5	10	1180	23610	1062	21249	1,271,069	1,077	54
RCH-1-M-06025/042		428	29.14	16216	0.5	10	4865	97297	4378	87567	4,745,249	975	49
RCH-1-M-06025/043		296	25.98	9998	0.5	10	2999	59988	2699	53989	3,512,034	1,171	59
RCH-1-M-06025/044		1034	59.70	80245	0.5	10	24073	481468	21666	433321	40,289,809	1,674	84
RCH-1-M-06025/045		307	21.44	8558	0.5	10	2568	51350	2311	46215	2,986,450	1,163	58
RCH-1-M-06025/046		199	37.80	9778	0.5	10	2934	58670	2640	52803	9,340,078	3,184	159
RCH-1-M-06025/047		926	55.72	67076	0.5	10	20123	402454	18110	362209	33,821,347	1,681	84
RCH-1-M-06025/048		901	32.95	38597	0.5	10	11579	231582	10421	208424	8,907,295	769	38
RCH-1-M-06025/049		338	20.06	8813	0.5	10	2644	52879	2380	47591	2,518,956	953	48
RCH-1-M-06025/050		114	11.61	1721	0.5	10	516	10324	465	9292	404,457	783	39
RCH-1-M-06025/051		186	9.74	2355	0.5	10	706	14129	636	12716	247,534	350	18
RCH-1-M-06025/052		255	21.88	7253	0.5	10	2176	43515	1958	39164	2,232,625	1,026	51
RCH-1-M-06025/053		273	30.50	10824	0.5	10	3247	64947	2923	58452	5,343,653	1,646	82
RCH-1-M-06025/054		385	49.18	24617	0.5	10	7385	147701	6647	132931	18,460,799	2,500	125
RCH-1-M-06025/055		91	4.97	588	0.5	10	176	3526	159	3173	32,505	184	9
RCH-1-M-06025/056		137	8.82	1570	0.5	10	471	9420	424	8478	186,484	396	20
RCH-1-M-06025/057		539	38.37	26887	0.5	10	8066	161322	7259	145189	9,712,116	1,204	60
RCH-1-M-06025/058		687	28.69	25626	0.5	10	7688	153755	6919	138380	4,555,368	593	30
RCH-1-M-06025/059		212	42.04	11586	0.5	10	3476	69513	3128	62562	12,303,016	3,540	177
RCH-1-M-06025/060		834	57.88	62756	0.5	10	18827	376533	16944	338880	37,252,693	1,979	99



Identificación y número del glaciar	Nombre	Ancho promedio (m)	Profundidad media (m)	Sección elipsoide (m <sup>2</sup> )	Velocidad (m/año)		Volumen de hielo (m <sup>3</sup> /año)		Volumen de agua (m <sup>3</sup> /año)		Volumen total hielo glaciar (m <sup>3</sup> )	Extinción de los glaciares (años)	
					Min	Max	Min	Max	Min	Max		Min	Max
RCH-1-M-06025/061		212	21.33	5878	0.5	10	1764	35271	1587	31744	2,087,575	1,184	59
RCH-1-M-06025/062		139	9.00	1627	0.5	10	488	9760	439	8784	197,978	406	20
RCH-1-M-06025/063		129	15.69	2631	0.5	10	789	15788	710	14209	919,586	1,165	58
RCH-1-M-06025/064		268	16.34	5693	0.5	10	1708	34158	1537	30742	1,025,717	601	30
RCH-1-M-06025/065		355	33.62	15516	0.5	10	4655	93096	4189	83786	6,888,805	1,480	74
RCH-1-M-06025/066		259	19.69	6628	0.5	10	1989	39771	1790	35794	1,687,599	849	42
<b>TOTALES EL PASO (m<sup>3</sup>/año y promedios de años)</b>									<b>126,254</b>	<b>2,525,078</b>		<b>1,207</b>	<b>60</b>



## 7.2. EFECTO DE POLVO SOBRE LOS GLACIARES.

Estudios en otros proyectos mineros presumen que el polvo levantado por el tráfico en caminos de tierra, y por la actividad en general (tronaduras, plantas de proceso, etc.), levantan una cierta cantidad de polvo que, transportada por el viento, puede depositarse en la superficie de glaciares distantes incluso algunos kilómetros del foco de actividades. En este caso, el polvo reduce el albedo (la proporción reflejada de la radiación solar que incide sobre una superficie de nieve o hielo), la superficie absorbe más calor y aumenta la tasa de fusión de la nieve o el hielo en la superficie de los glaciares puros (no afecta a los glaciares de roca con cubiertas de detritos).

En trabajos realizados en la cordillera central de Chile durante el 2007, y en años anteriores en el Sur de Chile, se comprobó el efecto del polvo sobre la superficie de neviza del invierno anterior, esparciendo concentraciones de polvo en cantidades de 3, 5 y 10 g/m<sup>2</sup> sobre áreas de pruebas de 16 m<sup>2</sup> mientras, simultáneamente, se mantenía un área no intervenidas como control. En las mismas canchas se obtuvieron muestras de neviza con taladro saca testigo Monte Rosa, para determinar la densidad de la nieve. El polvo esparcido, fue obtenido de caminos con tránsito de vehículos livianos y pesados cercanos al área de estudio, y esparcido en las canchas con un fumigador manual.

Los incrementos de las tasas de descenso de la superficie, o de fusión de la neviza, son significativos, y del orden de 10% en las canchas con menor concentración.

Existen impurezas “no prueba” que parecen provenir de un arrastre eólico debido a la amplia y uniforme distribución en los glaciares. El origen de las partículas finas puede ser: (i) el “smog” de ciudades cercanas, (ii) arrastre eólico desde superficies naturales libres de nieve, y (iii) arrastre eólico de polvo levantado por actividades industriales vecinas.

En todo caso, y considerando que incrementos relativamente bajos, del orden de 3 a 5% de la tasa de fusión en la superficie de los glaciares, produce balances de masa marcadamente



negativos en los glaciares blancos, los incrementos de fusión con las tasas probadas son fuertemente desfavorables para los glaciares, y deben evitarse. El polvo no afecta a los glaciares de roca, o superficies de hielo cubiertas con detritos.



## 8. CONSIDERACIONES RESPECTO DE LOS GLACIARES.

### 8.1. SECTOR SAN ANDRÉS.

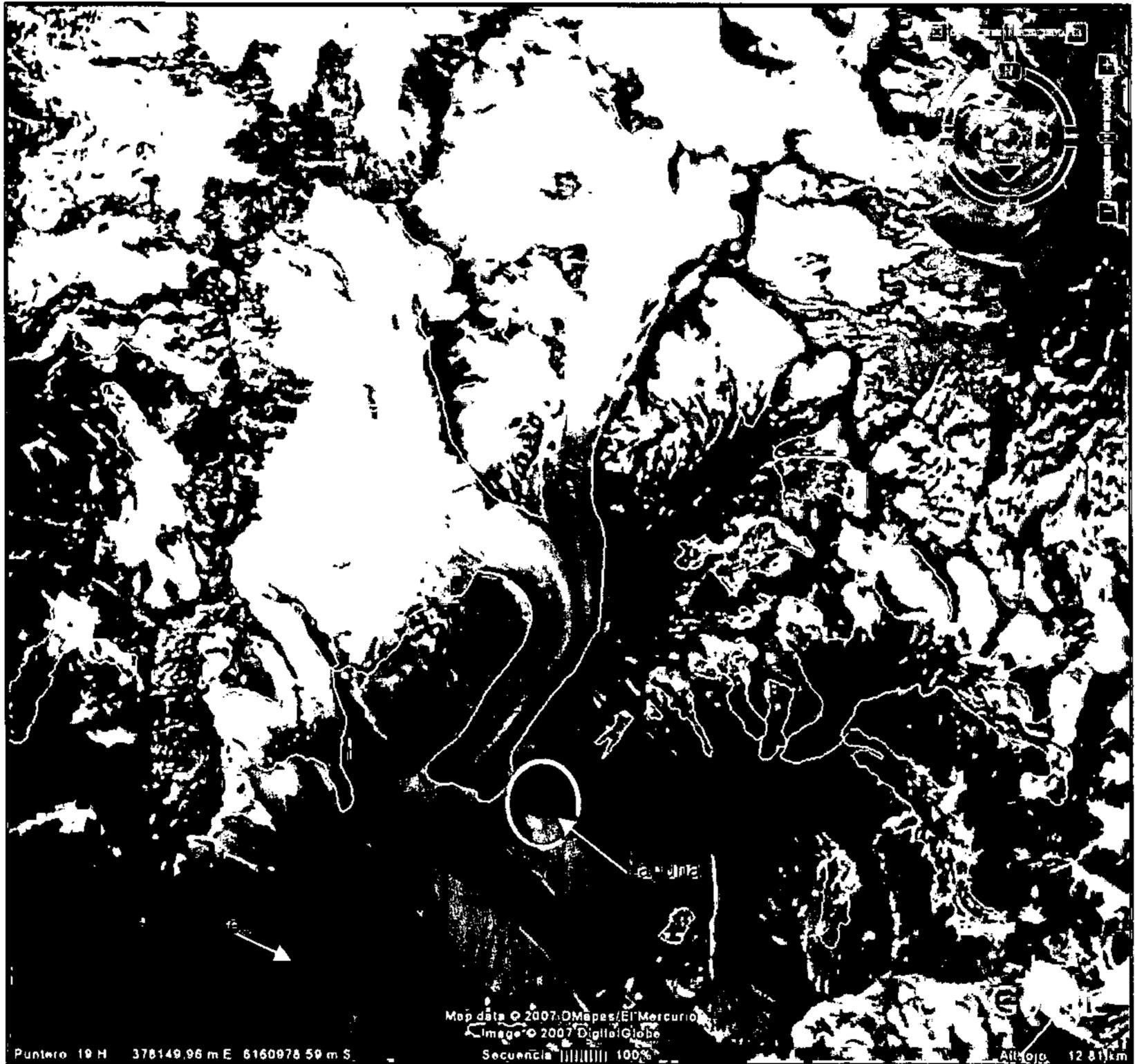
#### **Laguna periglacial en el glaciar Universidad.**

Los embalses naturales de agua, como lagunas y lagos, pueden dar origen a grandes crecidas por el vaciamiento súbito del agua almacenada. En el ambiente de cordillera esto ocurre normalmente por falla en la contención natural de las lagunas, o por la formación de grandes olas que rebalsan la contención.

La contención natural (o "muro", o cierre) de las lagunas puede ser rocoso o conformado por algunos de los tipos de material sedimentarios no-consolidados, tales como morrenas glaciales como es el caso de la laguna periglacial del glaciar Universidad (ver Fig. 8.1-A). El tipo de cierre que puede fallar es aquel constituido por material sedimentario no consolidado y la falla puede deberse a fenómenos tales como pérdida de cohesión de material finos, aceleraciones sísmicas y pérdida de estabilidad, y aumento extraordinario del nivel del agua en la cubeta, provocado por el aumento del deshielo de los glaciares alrededor del glaciar Cortaderal que alimentan la laguna del glaciar Universidad.

El vaciamiento súbito de lagunas da origen a crecidas en los cauces aguas abajo de las lagunas, los que suelen derivar en flujos de detritos.

En general, el evento es poco frecuente pero normalmente de resultados catastróficos. Eventos de este tipo se conocen varios en Chile, y también se conocen casos en que grandes deslizamientos de glaciares han alcanzado el borde de grandes cubetas lacustres y han estado a punto de provocar olas y crecidas.



**Fig. 8.1-A. Laguna periglacial del glaciar Universidad.**

## **8.2. SECTOR EL PASO.**

### **Evidencias recientes de deslizamiento bruscos de 1 glaciar.**

Aguas arriba del área de captación en el sector El Paso, sobre los glaciares 49 y 50, se evidencian los restos de un glaciar (ubicado en el área fuera del radio de 10 km del

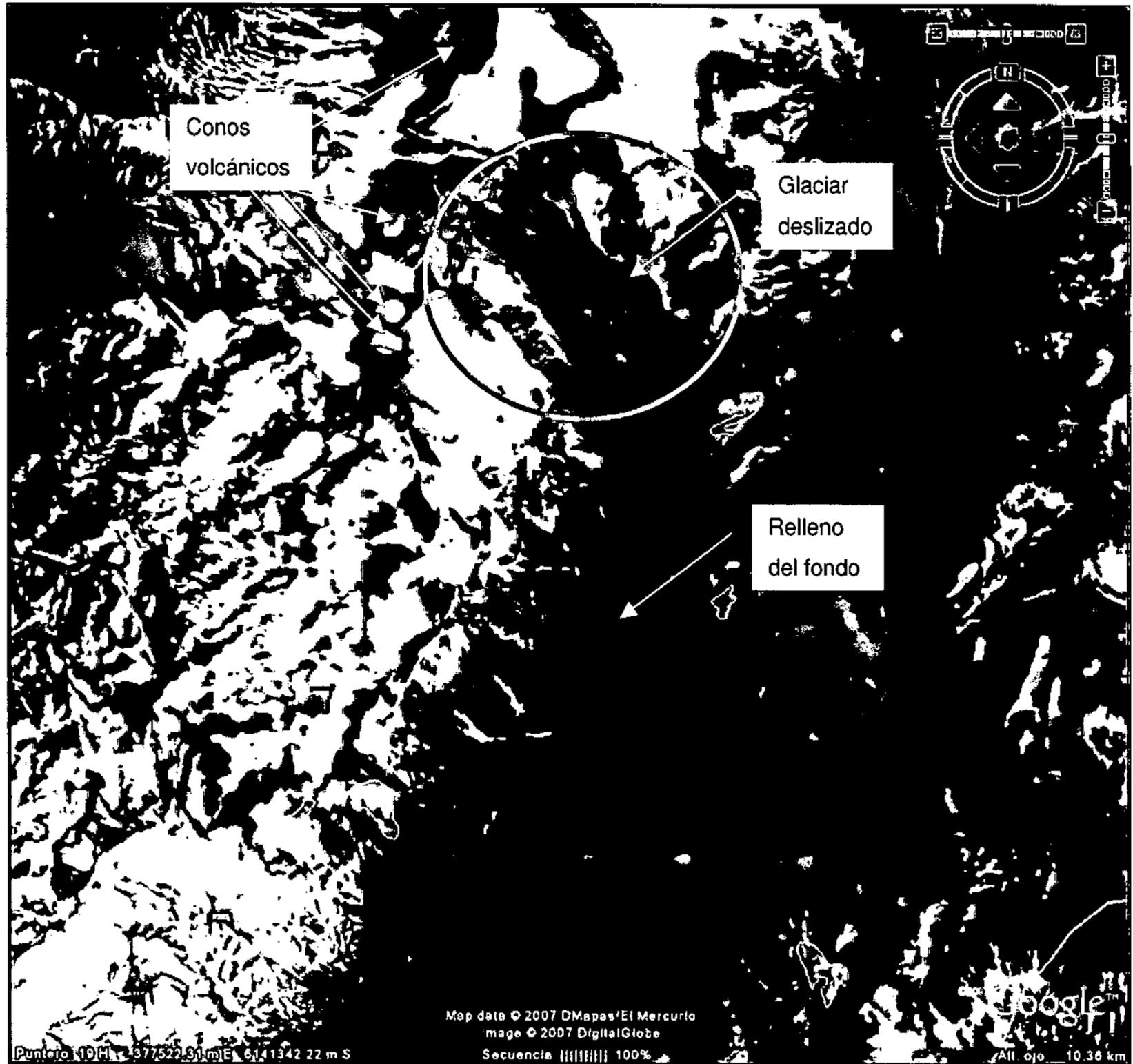


inventario) que sufrió un deslizamiento brusco valle abajo, cubriendo parte del fondo de la cuenca (ver Fig. 8.2-A).

El deslizamiento probablemente fue originado por un aumento de la temperatura en la base del glaciar, provocada por la presencia del Volcán Tinguiririca (que se ubica a 2 km de distancia), lo que incrementa la tasa de fusión del hielo en la base del glaciar y aumenta la cantidad de agua en la base, provocando la disminución de la fricción del glaciar con el suelo, y su brusco deslizamiento.

Los restos del glaciar y del deslizamiento se evidencian hasta 8 km aguas abajo del glaciar, sin considerar el efecto del aumento del caudal, producto de la fusión del hielo glaciar aguas abajo del punto de captación.

Debido a la evidencia de este fenómeno, se debe realizar una evaluación de la "estabilidad" de las masas glaciares, ante eventuales modificaciones en las condiciones naturales normales (condiciones de agua, sismicidad, intervención de glaciares, etc.) que pudieran conducir a un deslizamiento catastrófico y violento.



**Fig. 8.2-A. Deslizamiento de glaciar.**



## 9. RECOMENDACIONES PARA ESTUDIOS MÁS DETALLADOS Y COMPLETOS.

El objetivo fundamental de un programa de control de glaciares debe ser el de obtener la información de línea base de los glaciares de las cuencas, de manera de caracterizarlos adecuadamente y, con ello, poder simular correctamente sus comportamientos pasados, aportes hídricos y otros de interés, tanto pasados como actuales y futuros, y con o sin intervención antrópica (efectos de la construcción de obras). Además, debe considerarse la necesidad de realizar el inventario con información adecuada de base topográfica y fotografías aéreas o imágenes satelitales de calidad.

Un programa general de estudio de línea de base de los glaciares se señala a continuación. Con este programa se pretende lograr un nivel de conocimiento al menos regular en todos los glaciares del área, y bueno en los más relevantes (por determinar). El programa inicial de trabajos está enfocado a aquellos aspectos de los glaciares poco conocidos pero críticos para estimar sus aportes a las cuencas.

### A. INFORMACIÓN BÁSICA.

- a) Cartografía de escala 1:10.000 de toda la cuenca alta.
- b) Fotografías aéreas, de verano, de todas las cuencas. Que permita restituciones aerofotogramétricas de escala 1:10.000. Vuelos y fotos aéreas cada dos a 5 años como mínimo. Planos topográficos con las imágenes fotográficas georeferenciadas.
- c) Estación nivometeorológica completa, ubicada en un glaciar blanco a determinar, en cada cuenca.

### B. TIPO DE GLACIAR.

- a) Confeccionar un catastro correcto y completo todos los glaciares del área, según las recomendaciones de UNESCO para el catastro de glaciares.



- b) Clasificación morfológica – en base a antecedentes cartográficos y fotos aéreas.
- c) Temperatura de los glaciares. Esto se puede realizar en sondajes ejecutados con sonda manual (alcanzan hasta 10 m de profundidad o algo mas) e insertando aprox. 3 sensores en cada sondaje a diferentes cotas. Las temperaturas deben controlarse en 10 a 12 ocasiones en el año, durante a lo menos un año.
- d) Estratigrafía – con descripción de testigos de sondajes y/o pozos profundos (inclusive del material sub-glacial). Pozos profundos, excavados con herramientas manuales y soportes de las paredes. Pozos manuales, en el detrito superficial de los glaciares de roca y hasta alcanzar el hielo, deben considerarse en todos los glaciares de roca de las cuencas, al menos tres en cada glaciar.

## C. BALANCE DE MASA.

- a) A realizar en tres glaciares seleccionados como típicos de cada cuenca.
- b) En superficie – en red de 10 a 20 o más (según tamaño del glaciar) estacas y pozos de nieve/hielo en cada glaciar. La red debe ser observada 2 o más veces por año. En los glaciares de roca cavar el detrito superficial, insertar estaca con sonda manual, y restituir el detrito.
- c) En la superficie de glaciares blancos, instalar y monitorear durante 2 o más años dos áreas artificialmente cargada con diversas cantidades de polvo de variada granulometría (según probable contaminación de las actividades). Instalar dos ablatógrafos en cada sitio, para controles durante los meses de verano.
- d) En la base de los glaciares, estimarlos según datos del balance calórico.

## D. BALANCE CALÓRICO.

- a) Instalar estaciones nivo-meteorológicas automáticas (una en cada cuenca) para recolectar los datos necesarios para realizar balances calóricos en todos los glaciares. Las estaciones deben ubicarse en sitios libres de peligros de avalanchas
- b) Instalar registradores automáticos de temperatura en pozos en el detrito superficial de glaciares de roca. Los pozos deben encontrar profundidades mínimas y máximas del



detrito superficial en los glaciares de roca. Los registradores de los pozos deben instalarse de manera de no ser afectados por avalanchas.

- c) Considerar los registros de nieve y meteorológicos de la estación nivometeorológica.
- d) Calcular los balances calóricos al menos mensuales y anuales, durante toda la vida de las operaciones.
- e) En la base de los glaciares, calcular el aporte de calor geotérmico con antecedentes de su gradiente en el área. Calcular el aporte de calor por fricción según datos de velocidades de desplazamiento medidas en superficie, de las cuales se infieren velocidades basales, y según carga (obtenida de la estratigrafía y espesores de glaciares).

## E. BALANCE HÍDRICO.

- a) Utilizar los registros de las nuevas estaciones nivometeorológica.
- b) Instalar rutas de nieve (dos en cada cuenca). Registrar las rutas al menos una vez al mes mientras exista nieve y durante toda la vida útil del proyecto.
- c) Instalar postes de registro de profundidad de nieve, instalados distantes en sitios de difícil acceso, a ser observados diariamente con telescopio desde estación nivometeorológica u otro punto.
- d) Completar o Instalar red de estaciones fluviométricas y aforadores, en particular vecinas a glaciares.
- e) Calcular el balance hídrico (incluido condensación y evaporación) al menos semanalmente, incorporando todos los datos nieve y meteorología del área. Desarrollar el software para ello.

## F. DEFORMACIÓN DE LOS GLACIARES ( VELOCIDAD DE DEFORMACIÓN).

- a) Velocidad de movimiento en superficie – en red de 3 a 12 estacas por glaciares (según sus magnitudes o remanentes de magnitud), en a lo menos tres glaciares tipo por cuenca, medidas a lo menos 2 veces por año. Lo anterior independientemente de los controles de frentes glaciares, convenientes para estimar variaciones. Diseñar la



- red y el sistema de control libre de las interferencias con operaciones industriales, y los puntos de manera de no ser alterados por avalanchas.
- b) Velocidad en la base de los glaciares. De ser posible, en dos glaciares instalar un túnel de exploración de unos 10 m de longitud, excavado manualmente en el hielo.
  - c) Controlar las tensiones en superficie de los glaciares, instalando redes de deformación de hielo. Controlar la redes al menos dos veces cada verano.
  - d) Mantener el registro de velocidades y tensiones durante toda la operación del proyecto.

## G. ESPESOR DE LOS GLACIARES.

Calcular el espesor de glaciares con a lo menos tres perfiles gravimétricos en cada glaciar de roca. En los glaciares blancos, realizar los tres o más perfiles con equipo de radar. En glaciares con sondajes, trazar los perfiles de manera que al menos uno de ellos intersecte puntos de sondaje.

Este trabajo se requiere realizar solamente una vez en la vida de proyecto, al menos que situaciones especiales ameriten repetirlo.

## H. ESTABILIDAD GENERAL DE LOS GLACIARES.

En todos los glaciares del área debe realizarse un análisis de estabilidad general (ante la evidencia de deslizamiento catastrófico). En esto es de primordial importancia evaluar las reales características geomecánicas de las morenas de fondo, considerando su variada granulometría, ausencia de cohesión, y presión de poros con agua hasta cerca de la superficie de los glaciares (una situación que suele ocurrir en días calurosos). Para esto, extraer muestras de la morena de fondo de los sondajes y ensayar en laboratorio (con altas presiones de agua).

La evaluación de estabilidad general debe revisarse al menos cada dos años, con nuevos antecedentes de glaciares, nieve, condiciones climáticas y vibraciones (aceleraciones)



naturales e inducidas.

## I. VARIACIONES DE LOS GLACIARES.

### 1. Variaciones recientes.

- a) Recientes. Debe hacerse un completo estudio de las variaciones recientes de los frentes y márgenes de todos los glaciares, empleando fotografías aéreas georeferenciadas o imágenes satelitales de alta calidad. Debe recuperarse y completarse los juegos de fotografías aéreas existentes, y georeferenciar todas las imágenes con glaciares.
- b) Deben instalarse puntos de registros fotográficos de terreno, en las vecindades de todos los glaciares. Desde estos puntos, deben tomarse registros fotográficos de los glaciares, al menos una vez al año durante toda la vida del proyecto. Los puntos deben instalarse en sitios que no sean afectados por las operaciones mineras.
- c) Deben recopilarse y analizarse registros de fotografías aéreas e imágenes satelitales antiguos, que pueden contener imágenes de glaciares en sitios no cubiertos por fotografías aéreas.

### 2. Variaciones cuaternarias.

Nada se ha hecho a este respecto, importante para entender la presencia y extensión de los glaciares en el pasado en la cuenca, y permitir proyecciones a futuro. Debe realizarse un estudio de geología glacial que involucre, idealmente todo el valle de las cuencas. El estudio debe mostrar la extensión actual de los diversos depósitos glaciales, y los estados de los frentes glaciales en el pasado.

Podría ser necesario extender el área del estudio a regiones vecinas. El estudio es necesario realizar una vez durante la vida del proyecto, empleando topografía de escala 1:10.000.

El presente informe ha sido preparado por el consultor Geoestudios para HydroChile S.A., cualquier información, dato o conclusión contenida en el podrá ser usada por terceros distintos, a su exclusiva responsabilidad y riesgo. A mayor abundamiento, HydroChile, sus filiales, directores, gerentes, empleados y colaboradores, no son responsables del uso del presente informe o, en su defecto de la exactitud, certeza y veracidad de los datos, conclusiones, diagramas, planos, mapas y en general cualquier tipo de información contenida en el presente informe.



**IV. ANEXOS.**

**1. FIGURAS FUERA DE TEXTO.**

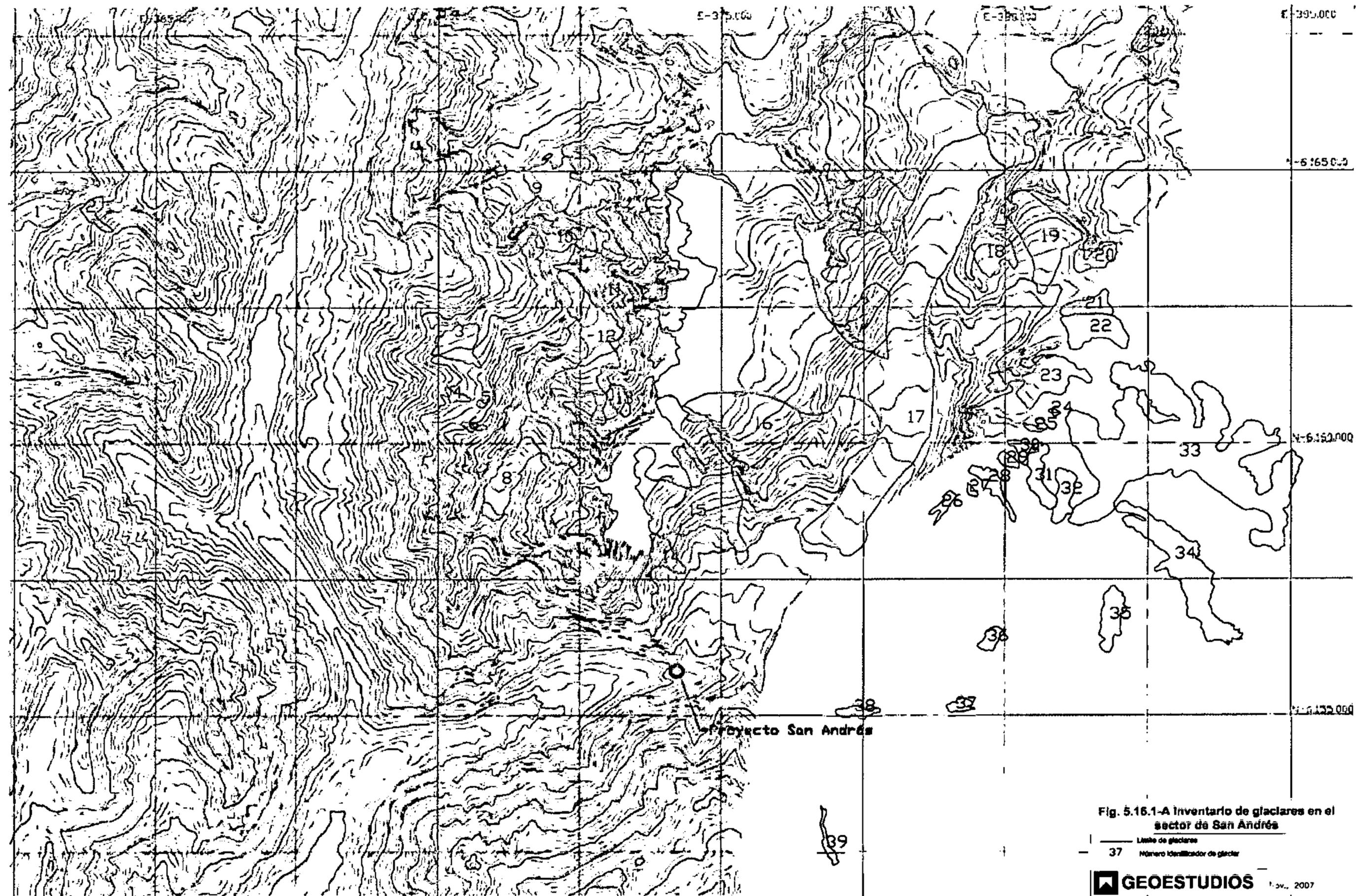


Fig. 5.16.1-A Inventario de glaciares en el sector de San Andrés

— Límite de glaciares  
 37 Número identificador de glaciar

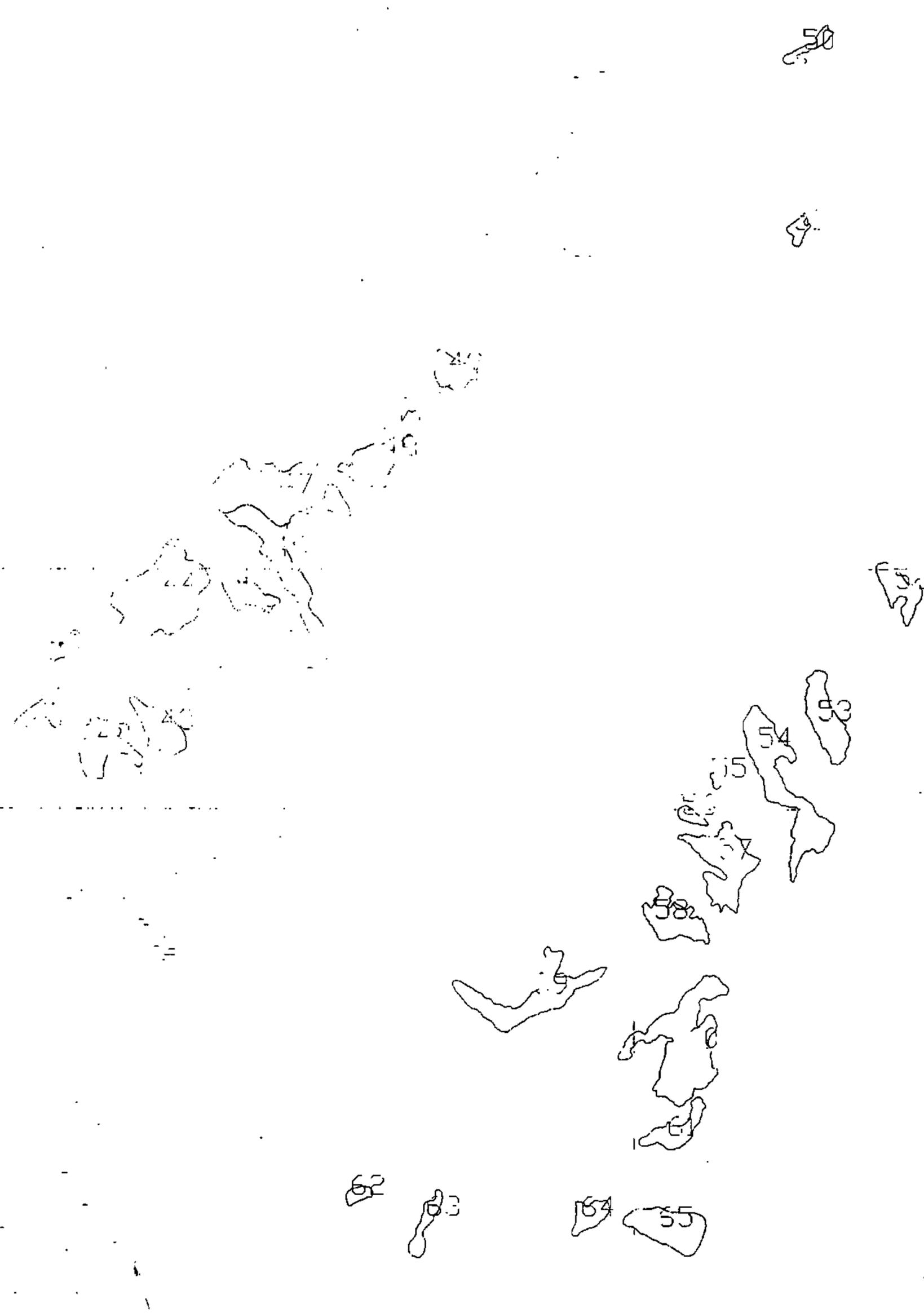


Fig. 5.17.1-A Inventario de glaciares en el sector de El Paso