

“Estimación del volumen de los glaciares de la Argentina”

2023

Valentina Zorzut

Directores: Ruiz, Lucas; Aguilera, Emilia Yolanda

Facultad de Ciencias Naturales y Museo (FCNyM)
Universidad de La Plata (UNLP)

Agradecimientos

Le agradezco a mi eterna compañera, a mi familia, a mi querido Mauri, y a todas mis amistadas por el apoyo y aguante incondicional. A Lucas, mi director, colega, que juntos crecimos con esta primera experiencia, gracias por tu paciencia, motivación y dedicación. A Yoli, mi co-directora, apasionada y de gran entrega a la escucha y orientación. Al yoga que siempre me alineo y me trajo la fortaleza y disciplina para continuar y alcanzar la meta. Y a todas las personas que estuvieron presentes de diferentes maneras a lo largo de este camino, ya sea inspirándome, enseñando, desafiando y/o mostrando otras perspectivas del mundo y la ciencia.

Muchas gracias a todos por acompañarme. Infinitamente agradecida por el camino recorrido.

Asimismo, quiero agradecer el apoyo del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sustentable de Argentina (Inventario Nacional de Glaciares), y CONICET. Los datos del Inventario de Chile y las mediciones finales de espesor de hielo de los glaciares chilenos a partir de perfiles GPR que fueron gentilmente proporcionadas por la Unidad de Glaciología y Nieves, Dirección de Obras Públicas, Dirección General de Aguas del Gobierno de Chile, bajo su programa de acceso abierto a la información pública. Los útiles comentarios de los revisores que contribuyeron a la versión final de esta tesis.

Índice

RESUMEN	6
ABSTRACT	9
1 INTRODUCCIÓN	12
1.1 MOTIVACIÓN Y RELEVANCIA.....	13
1.2 PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN, OBJETIVOS Y ORGANIZACIÓN DE TESIS	14
2 “GLACIARES Y VOLUMEN DE HIELO EN LOS ANDES DE ARGENTINA”: MARCO TEÓRICO Y REGIONAL.....	16
2.1 INTRODUCCIÓN	17
2.2 MEDICIONES DE ESPESOR DE HIELO EN LOS GLACIARES DE LOS ANDES DEL SUR.....	17
2.3 ESTIMACIONES DE VOLUMEN EN CUERPOS DE HIELO DE LOS ANDES DEL SUR.....	19
2.4 ESTIMACIONES DE VOLUMEN EN GLACIARES DE ESCOMBROS.....	21
2.5 ENTORNO REGIONAL Y CLIMÁTICO.....	23
2.6 INVENTARIO NACIONAL DE GLACIARES.....	24
2.6.1 Definiciones	24
2.7 ORGANIZACIÓN GEOGRÁFICA	27
2.7.1 Andes Desérticos	32
2.7.2 Andes Centrales.....	32
2.7.3 Andes del Norte de la Patagonia	33
2.7.4 Andes del Sur de la Patagonia	34
2.7.5 Andes de Tierra del Fuego.....	35
2.8 CONCLUSIONES Y DISCUSIONES.....	35
3 INFLUENCIAS DE LA ESTIMACIÓN DE PENDIENTES EN LOS MODELOS DE INVERSIÓN DEL ESPESOR DEL HIELO: CASO DE ESTUDIO SOBRE LOS GLACIARES DEL MONTE TRONADOR, EN LA ZONA NORTE DE LOS ANDES PATAGÓNICOS	37
3.1 RESUMEN	38
3.2 INTRODUCCIÓN	39
3.3 ÁREA DE ESTUDIO	40
3.4 DATOS Y MÉTODOS	42
3.4.1 Observaciones realizadas del espesor del hielo	42
3.4.2 Descripción del modelo de espesor de hielo	43
3.4.3 Entrada de datos.....	43
3.5 CONFIGURACIÓN EXPERIMENTAL	44

3.6 RESULTADOS	47
3.6.1 <i>Distribución del espesor del hielo</i>	47
3.6.2 <i>Estimaciones de volumen de hielo</i>	48
3.7 DISCUSIÓN	49
3.7.1 <i>Incertidumbre y sensibilidad del modelo</i>	49
3.7.2 <i>Distribución y precisión del espesor del hielo</i>	51
3.7.3 <i>Comparación con reconstrucciones existentes</i>	54
3.7.4 <i>Escala de volumen-área para los glaciares Monte Tronador</i>	56
3.8 CONCLUSIONES	58
3.9 MATERIAL SUPLEMENTARIO.....	60
4 VOLUMEN DE LOS CUERPOS DE HIELO DE LOS ANDES ARGENTINOS	68
4.1 RESUMEN	69
4.2 INTRODUCCIÓN	70
4.3 ÁREA DE ESTUDIO	71
4.4 ANTECEDENTES DE ESTIMACIONES DE VOLUMEN DE HIELO EN GLACIARES	75
4.5 ANTECEDENTES DE ESTIMACIONES DEL VOLUMEN EN GLACIARES DE ESCOMBROS	76
4.6 METODOLOGÍA Y FUENTE DE DATOS	76
4.6.1 <i>Glaciares con información de volumen de hielo en los Andes del Sur</i>	76
4.6.2 <i>Cálculo de volumen para glaciares y manchones de nieve</i>	77
4.6.3 <i>Filtrado de valores anómalos de volúmenes de hielo</i>	78
4.6.4 <i>Diseño de los experimentos</i>	80
4.6.5 <i>Estimación del error del cálculo de volumen</i>	81
4.6.6 <i>Cálculo de volumen de glaciares de escombros</i>	81
4.7 RESULTADOS	82
4.7.1 <i>Resultados de las regresiones para los 57 glaciares seleccionados</i>	82
4.7.2 <i>Volumen total para todas las masas de hielo de los Andes de Argentina</i>	84
4.8 DISCUSIÓN	87
4.8.1 <i>Relaciones empíricas</i>	87
4.8.2 <i>Correlación entre las clases de glaciares para los coeficientes k & γ</i>	88
4.8.3 <i>Volumen de hielo por cuenca hidrográfica para cada tipo de glaciar</i>	90
4.8.4 <i>Importancia de los glaciares de escombros</i>	94
4.8.5 <i>Comparación de los cálculos de volumen por autor para las cinco regiones</i>	95
4.9 CONCLUSIONES	98
APÉNDICE	100

5 CONCLUSIONES Y CONSIDERACIONES FINALES	103
6 BIBLIOGRAFÍA	107

Resumen

En las regiones montañosas, el cambio climático amenaza los recursos hídricos de la criósfera, y es necesario comprender todos los componentes del ciclo hidrológico para una gestión eficaz. Parte de las precipitaciones nivales de los Andes se almacenan inicialmente en los glaciares en forma de hielo, para luego ser gradualmente liberada en el tiempo. En las regiones andinas la actividad agrícola, industrial, la producción de hidroelectricidad y los asentamientos humanos dependen del agua proveniente de la fusión de la nieve y de los cuerpos de hielo que se encuentran en la Cordillera de los Andes. Así, los glaciares y las formas criogénicas (incluidos los glaciares de escombros) constituyen un medio de amortiguamiento fundamental durante las épocas de sequías.

El cambio climático origina el retroceso de los glaciares observado desde el siglo XIX, indicando una pérdida importante en reserva de agua, por ejemplo, entre el 2000 y el 2020 alcanzaron unos 385 km³ de hielo en los Andes del Sur. Así, una comprensión sólida de las reservas que representan los cuerpos de hielo en nuestro país es crucial para la estimación de los recursos hídricos disponibles, sus tendencias en las próximas décadas y los cambios que puedan ocurrir en el próximo siglo.

El objetivo principal de esta tesis es calcular el volumen de los cuerpos de hielo inventariados en el 2018 que fueron obtenidos a partir de imágenes del 2005 al 2015 de las reservas estratégicas de agua en estado sólido de la Argentina, usando diferentes métodos de escalamiento volumen-área (V-A) y teniendo en cuenta los diferentes tipos de cuerpos de hielo que existen (glaciares de descarga, de valle y montaña; manchones de nieve y glaciares de escombros). Complementariamente, se usaron y se tomaron mediciones del espesor de hielo en diferentes glaciares y otras crioformas de los Andes; y se hizo la comparación de diferentes modelos para estimar la distribución del espesor de hielo en los glaciares del Monte Tronador.

La presente tesis sigue la organización del Inventario Nacional de Glaciares, con cinco grandes regiones con características climáticas y topográficas propias: la primera situada en el noroeste de Argentina, Andes Desérticos (22 – 31°S); la segunda más al centro, Andes Centrales (31 – 35°S), en el cual para ambas regiones las condiciones climáticas son particularmente secas. Mas al sur, los Andes de Patagonia Norte (35 – 45°S), Patagonia Sur (45 – 53°S) y los Andes de Tierra del Fuego (53 – 55°S), donde el clima es más húmedo.

Los Andes argentinos se extienden por ~4000 km (22 – 55°S) a lo largo del margen suroccidental de Sudamérica. Las mayores elevaciones se encuentran en la parte central y septentrional de esta cordillera (22 – 34°S), con varios picos que superan los 6000 m s.n.m. El amplio rango latitudinal que va desde los dominios subtropicales a subantártico, los fuertes gradientes de altitud y la orientación norte-sur perpendicular a la circulación atmosférica provocan una gran variedad de tipos de masas de hielo a lo largo de la región. Los Andes argentinos contienen de acuerdo al Inventario Nacional de Glaciares del año 2018, un total de 16078 masas de hielo que cubren una superficie de 5769 km². En los Andes Desérticos se encuentran tan solo el 4 % del número de cuerpos y el 2 % del área total; en los Andes Centrales se encuentra el 50 % del total de las masas de hielo y el 30 % del área cubierta. En los Andes de la Patagonia norte, con el 13 % del número total de cuerpos y solo el 5 % de la extensión total. En los Andes de la Patagonia sur, los glaciares representan el 59 % del área y el 15 % del total de masas de hielo. Finalmente, en los Andes de Tierra del Fuego, donde el total de cuerpos representa menos del 3 % del total y la extensión de los mismos es apenas un 0.4 % del total.

El estudio del Monte Tronador fue el caso de estudio para validar el mejor método a aplicar para obtener el volumen de los glaciares. Gracias a la gran cantidad de mediciones de espesor de hielo e información sobre la dinámica de los glaciares del Monte Tronador, en esta región en particular, se utilizó un modelo de inversión de la velocidad superficial para estimar la distribución espacial del espesor de hielo en esta región. A partir del análisis del modelo generado y su comparación con mapas de distribución de hielo publicados previamente, se concluyó que los filtros espaciales de paso bajo para suavizar la topografía de los glaciares, junto con conocer la velocidad superficial de los glaciares mejoran significativamente los modelos de inversión. El modelo utilizado en esta tesis aporta una mejora significativa en la distribución del espesor del hielo, con una mejor detección de los límites de los glaciares y reconstrucciones más precisas de la distribución del espesor del hielo.

Para cumplir con el objetivo principal, se analizó la bibliografía preexistente sobre mediciones de espesor y mediciones de volumen en los Andes del Sur para ser usados como variables de entrada en el escalamiento V-A en tres experimentos diferentes. Primero, todas las masas de hielo con datos de volúmenes en los Andes de Argentina y Chile, como un conjunto (VAT). Segundo, cada región de los Andes por separado (VAR). Tercero, cada región por separado y cada tipo de masa de hielo según su clasificación morfológica (VAC). Para los glaciares de escombros se utilizaron diferentes proporciones de hielo entre los activos e inactivos.

Como resultado del estudio realizado, se confirma que el mejor experimento para obtener el volumen para todos los cuerpos de hielo de los Andes argentinos es el experimento VAR, la diferencia es despreciable con respecto al resto, y su facilidad y rapidez es mayor. El 90 % del volumen de hielo de la Argentina se encuentra albergado en las grandes masas de glaciares del campo de hielo en los Andes del Sur de la Patagonia ($688 \pm 206 \text{ km}^3$) siendo apenas el 15 % del número total de los cuerpos. Por el contrario, en los Andes Centrales en donde se encuentra el 50 % del total de masas de hielo, contiene tan solo el 7 % ($57 \pm 17 \text{ km}^3$) del volumen total. En los Andes del Norte de la Patagonia, con el 13 % del número total de cuerpos se concentra el 2 % ($15 \pm 5 \text{ km}^3$) del volumen total. En los Andes Desérticos, con solo el 4 % del número de cuerpos el volumen total de hielo es menos del 1 % ($6 \pm 2 \text{ km}^3$). Finalmente, en los Andes Fueguinos, donde el total de cuerpos representa menos del 3 % y el volumen total de hielo es menos del 0.1 % ($0.6 \pm 0.2 \text{ km}^3$).

Los 6 glaciares de descarga del Campo de Hielo Sur que drenan hacia la Cuenca del Río Santa Cruz representan el 70 % del volumen de hielo del país; en contraste los manchones de nieve y glaciares de escombros, las categorías más numerosas (5894 y 7596, respectivamente) concentran tan solo el 0.6 y 0.9 % del volumen de hielo del país, respectivamente.

Con el estudio del Monte Tronador, se destaca que la precisión de los inventarios de glaciares usados como datos de entrada tiene un gran impacto en la distribución de espesor de hielo. Una correcta identificación de la extensión y divisorias de los glaciares es clave para mejorar la modelización del flujo de hielo, las estimaciones del volumen total de los glaciares y la cuantificación futura de los recursos hídricos en las regiones montañosas.

Se concluye que el uso de diferentes enfoques de modelado y una mayor cantidad de mediciones del espesor del hielo es necesario para cuantificar mejor el almacenamiento de agua en los glaciares. Los resultados y métodos obtenidos en esta tesis son relevantes para las comunidades científicas, y para comunidades locales, tomadores de decisiones, e interesados en los glaciares y recursos hídricos.

Abstract

In mountainous regions, climate change threatens the water resources of the cryosphere, and an understanding of all components of the hydrological cycle is necessary for effective management. Part of the snow precipitation in the Andes is initially stored in glaciers and then gradually released over time. In the Andean regions, agricultural and industrial activity, hydroelectricity production and human settlements depend on water from melting snow and ice bodies found in the Andes Mountains. Thus, glaciers constitute a fundamental buffer during times of drought.

Climate change causes the retreat of glaciers observed since the nineteenth century, indicating a significant loss in water reserves, for example, between 2000 and 2020 reached about 385 km³ of ice in the Southern Andes. Thus, a solid understanding of the reserves that represent the ice bodies in our country is crucial for the estimation of available water resources, their trends in the coming decades and the changes that may occur in the next century.

The main objective of this thesis is to calculate the volume of ice bodies inventoried in 2018 that were obtained from images from 2005 to 2015 of the strategic water reserves in solid state of Argentina, using different volume-area (V-A) scaling methods and taking into account the different types of ice bodies that exist (discharge, valley and mountain glaciers; snow patches and debris glaciers). Complementarily, ice thickness measurements were used and taken in different glaciers and other cryoforms of the Andes; and a comparison of different models was made to estimate the distribution of ice thickness in the glaciers of Mount Tronador.

The present thesis follows the organization of the National Glacier Inventory, with five large regions with their own climatic and topographic characteristics: the first one located in the northwest of Argentina, the Desert Andes (22 - 31°S); the second one further to the center, the Central Andes (31 - 35°S), in which for both regions the climatic conditions are particularly dry. Further south, the Andes of Northern Patagonia (35 - 45°S), Southern Patagonia (45 - 53°S) and the Andes of Tierra del Fuego (53 - 55°S), where the climate is more humid.

The Argentine Andes extend for ~4000 km (22 - 55°S) along the southwestern margin of South America. The highest elevations are found in the central and northern part of this range (22 - 34°S), with several peaks exceeding 6000 m asl. The wide latitudinal range from subtropical to subantarctic domains,

the strong altitudinal gradients and the north-south orientation perpendicular to the atmospheric circulation cause a great variety of ice mass types throughout the region. The Argentine Andes contain according to the 2018 National Glacier Inventory, a total of 16078 ice masses covering an area of 5769 km². In the Desert Andes are found only 4 % of the number of bodies and 2 % of the total area; in the Central Andes are found 50 % of the total ice masses and 30 % of the area covered. In the northern Patagonian Andes, with 13 % of the total number of bodies and only 5 % of the total area. In the Andes of southern Patagonia, glaciers represent 59 % of the area and 15 % of the total ice masses. Finally, in the Andes of Tierra del Fuego, where the total number of bodies represents less than 3 % of the total and their extension is only 0.4 % of the total.

The Mount Tronador study was the case study to validate the best method to apply to obtain glacier volume. Thanks to the large amount of ice thickness measurements and information on glacier dynamics of Mount Tronador in this particular region, a surface velocity inversion model was used to estimate the spatial distribution of ice thickness in this region. From the analysis of the generated model and its comparison with previously published ice distribution maps, it was concluded that low-pass spatial filters for smoothing glacier topography, together with knowledge of glacier surface velocity significantly improve inversion models. The model used in this thesis provides a significant improvement in ice thickness distribution, with better detection of glacier boundaries and more accurate reconstructions of ice thickness distribution.

To fulfill the main objective, the pre-existing literature on thickness measurements and volume measurements in the Southern Andes was analyzed for use as input variables in the V-A scaling in three different experiments. First, all ice masses with volume data in the Andes of Argentina and Chile, as an ensemble (VAT). Second, each region of the Andes separately (VAR). Third, each region separately and each ice mass type according to its morphological classification (VAC). For debris glaciers, different proportions of ice between active and inactive were used.

As a result of the study, it is confirmed that the best experiment to obtain the volume for all ice bodies in the Argentine Andes is the VAR experiment, the difference is negligible with respect to the rest, and its ease and speed is greater. Ninety percent of the ice volume of Argentina is hosted in the large glacier masses of the ice field in the Southern Andes of Patagonia (688 ± 206 km³) being only 15 % of the total number of bodies. In contrast, in the Central Andes, where 50 % of the total ice masses are found, it contains only 7 % (57 ± 17 km³) of the total volume. In the Northern Andes of Patagonia, with 13 % of the total number of bodies, 2 % (15 ± 5 km³) of the total volume is concentrated. In the Desert Andes, with

only 4 % of the number of bodies, the total ice volume is less than 1 % ($6 \pm 2 \text{ km}^3$). Finally, in the Fuegian Andes, where the total number of bodies represents less than 3 % and the total ice volume is less than 0.1 % ($0.6 \pm 0.2 \text{ km}^3$).

The 6 discharge glaciers of the Southern Ice Field that drain into the Santa Cruz River Basin represent 70 % of the country's ice volume; in contrast, snowpack and debris glaciers, the most numerous categories (5894 and 7596, respectively) concentrate only 0.6 and 0.9 % of the country's ice volume, respectively.

The Mount Tronador study highlights that the accuracy of glacier inventories used as input data has a major impact on ice thickness distribution. Correct identification of glacier extent and divides is key to improve ice flow modeling, estimates of total glacier volume, and future quantification of water resources in mountainous regions.

It is concluded that the use of different modeling approaches and more ice thickness measurements is necessary to better quantify glacier water storage. The results and methods obtained in this thesis are relevant for scientific communities, and for local communities, decision makers, and stakeholders interested in glaciers and water resources.

Capítulo 1.

1 Introducción



Vista del valle sobre el glaciar Azufre (35.28° S y 70.56° O, 2974 m s.n.m; metros sobre el nivel del mar) ubicado en la región de los Andes Centrales. Fotografía: Valentina Zorzut

1.1 Motivación y relevancia

Los glaciares popularmente se destacan como embellecedores del paisaje, representando en muchos lugares grandes atractivos turísticos que significan valiosos ingresos para las economías regionales. Sin embargo, su mayor importancia radica en que constituyen un elemento clave como reservas estratégicas de agua. A su vez, cumplen la función de reguladores hídricos y constituyen un componente esencial de muchos sistemas hidrológicos de montaña. Desde el punto de vista científico, se los considera como laboratorios naturales cuyo estudio brinda datos para entender los servicios ecosistémicos que proveen los glaciares (Rivera et al., 2021). Actualmente, representan una figura preponderante en investigaciones de cambio climático, ya que existe una fuerte relación entre estos cuerpos de hielo y el clima. Producto de estos análisis, se concluye que el rápido retroceso observado en los glaciares andinos y en otras regiones montañosas del mundo es una certera evidencia del calentamiento global acontecido en las últimas décadas (Brugger et al., 2013; Vuille et al., 2015, 2018).

Argentina sancionó en 2010 la ley 26639 con el objetivo de proteger los glaciares y el ambiente periglacial (áreas con suelos congelados que actúan como reguladores del recurso hídrico). La norma establece la creación de un inventario nacional de glaciares y ambiente periglacial. El inventario fue finalizado por el Instituto Argentino de Nivología, Glaciología y Ciencias Ambientales (IANIGLA) en 2018. Gracias al Inventario Nacional de Glaciares (ING) hoy sabemos que la Argentina cuenta con 8484 km² cubiertos de hielo, de los cuales 5769 se encuentran en la Cordillera de los Andes argentinos y 2715 en las Islas del Atlántico Sur. Si bien el ING engloba toda la superficie nacional, para esta tesis solo fue considerado el sector de la Cordillera de los Andes argentinos (tabla 2.1). El ING constituye una herramienta esencial para la protección y manejo de los recursos hídricos en estado sólido de la República Argentina.

Esta tesis apunta a cuantificar el volumen de agua en nuestros cuerpos de hielo, que son parte de las reservas de agua dulce. Comprender el volumen de agua preservado en los glaciares y formas criogénicas de los Andes de Argentina es clave para evaluar la vulnerabilidad y posible adaptación de las diferentes regiones ante el cambio climático. El retroceso de los glaciares a lo largo de los Andes, Braun et al., (2019) está afectando a las económicas locales y regionales de múltiples formas (Johansen et al., 2018; Masiokas et al., 2020). Por ejemplo, en algunas cuencas de los Andes Centrales y Desérticos, el aumento de la pérdida de hielo ha mitigado el efecto de la sequía (Ayala et al., 2017, 2020). Sin embargo, la capacidad de los glaciares de regular el caudal en épocas de sequía depende fuertemente del volumen

de hielo remanente (Huss & Hock, 2018). Por otra parte, el fuerte retroceso de algunos de los glaciares más visitados de la Patagonia, ha afectado al turismo local en algunas zonas (Schoolmeester et al., 2018; Vuille et al., 2018). Finalmente, el fuerte retroceso de los glaciares, está dando paso a la generación y crecimiento de lagos proglaciales, potencialmente peligrosos, en aquellas cuencas antes ocupadas por los glaciares (Ruiz et al., 2022; Wilson et al., 2018).

A pesar de su importancia, el volumen de los glaciares y otras masas de hielo de los Andes de Argentina, en particular, pero también en otras vastas regiones del mundo solo se conoce con un alto grado de incerteza (Farinotti et al., 2019). Además, las estimaciones existentes para la región están basados en inventarios globales, con diferencias sustanciales a escala regional con los Inventarios nacionales (Zalazar et al., 2020).

Por consiguiente, la presente tesis permitirá, por primera vez, conocer el volumen de todos los cuerpos de hielo de la Argentina, brindando información desconocida hasta el momento, pero crítica para evaluar los recursos hídricos de las diferentes regiones de nuestra Cordillera. Los resultados de esta tesis son complementarios al Inventario Nacional de Glaciares y Ambiente Periglacial (Zalazar et al., 2020) y permitirán que los conocimientos adquiridos en cuanto a cantidad, distribución y características de los diferentes cuerpos de hielo en Argentina sean de mayor importancia para organismos públicos y privados.

1.2 Preguntas de investigación, objetivos y organización de tesis

La principal pregunta de investigación de esta tesis es: ¿Qué volumen de agua representan los cuerpos de hielo de Argentina? Para poder responder esta pregunta, es clave identificar una metodología que, ante todo, permita llenar grandes vacíos de información. ¿Cuántas “mediciones” de volumen de espesor de hielo existen en nuestra región? ¿Qué modelos o aproximaciones matemáticas podemos aplicar para cuantificar el volumen de aquellos glaciares sin datos? ¿Qué parámetros podemos introducir para mejorar nuestro cálculo de la distribución del espesor de hielo en los glaciares?

A partir de esto y para lograr el objetivo principal de esta tesis, calcular el volumen a partir de los datos que tuve disponible entre el 2005 – 2015 (si bien pueden haber datos más recientes esos no estaban disponibles a la hora de realizar esta tesis) de las reservas estratégicas de cuerpos de hielo que en el inventario de Argentina incluyen glaciares de montaña, de valle, y descarga; manchones de nieve y glaciares de escombros, se aplicó la siguiente metodología:

- Búsqueda bibliográfica de la información disponible sobre mediciones de espesor y cálculo de volumen de hielo en glaciares de los Andes del Sur.
- Recopilación de datos de espesor de hielo medidos del espesor de hielo en diferentes glaciares y otras criofomas en las 5 regiones climáticas de los Andes. En particular se utilizaron los datos disponibles para los 4 glaciares de referencia del Inventario Nacional de Glaciares (ING) (IANIGLA, 2010; www.glaciaresargentinos.com.ar) en cada una de las regiones de los Andes argentinos y otros glaciares cercanos a los mismos.
- Comparación de diferentes modelos para estimar la distribución del espesor de hielo en los glaciares del Monte Tronador.
- Cálculo del volumen de todos los cuerpos de hielo inventariados en la Argentina, aplicando diferentes métodos de escalamiento volumen-área y teniendo en cuenta los diferentes tipos que existen (glaciares de montaña, de valle, y descarga; manchones de nieve y glaciares de escombros).

Esta tesis está organizada en cinco capítulos. En el capítulo 1 se introduce la temática, haciendo hincapié en la motivación y objetivo principal de la tesis. En el capítulo 2 se detalla el contexto teórico de la evolución del conocimiento en la adquisición de datos en el cálculo del volumen de hielo, y los datos de espesor existentes a lo largo de los Andes argentinos y chilenos, así como una contextualización de la zona de estudio. En el capítulo 3, partiendo de la aproximación de flujo paralelo, usando un método de inversión de velocidad superficial, se combinaron mediciones del espesor del hielo con datos detallados de elevación y velocidad de la superficie, y se obtuvieron de espesores y volumen de hielo para los glaciares del Monte Tronador, en la zona norte de los Andes patagónicos aumentando la exactitud de las estimaciones de la distribución del espesor del hielo de todo el país. Estos resultados fueron comparados con otros datos de modelos publicados. En el capítulo 4, se utilizó la aproximación de escalamiento volumen área para estimar el volumen de hielo para todos los cuerpos de hielo inventariados en los Andes argentinos y se comparó con otras estimaciones existentes. Finalmente, el capítulo 5, contiene las conclusiones y consideraciones finales que abrirán camino a futuras investigaciones.

Capítulo 2

2 “Glaciares y volumen de hielo en los Andes de Argentina”: marco teórico y regional



Quebrada del Matienzo ubicada en la región de los Andes Centrales. Fotografía: Valentina Zorzut

2.1 Introducción

Los Andes del Sur, constituyen una de las cadenas montañosas más altas del mundo con picos de más de 6500 m s.n.m. (metros sobre el nivel del mar). Desde el punto de vista físico, la oferta hídrica en la región andina tiene condicionantes geográficos y climáticos. El estudio de estos condicionantes es imprescindible para evaluar la disponibilidad hídrica presente y futura, los grados de resiliencia, la vulnerabilidad de las diferentes regiones y la posibilidad de implementar medidas de adaptación (p. ej. Oyarzún and Oyarzún, 2011; Meza et al., 2012; Souvignet et al., 2012; Bellisario et al., 2013; Bonelli et al., 2014; Valdés-Pineda et al., 2014). En este sentido conocer el volumen de agua preservado en los glaciares es fundamental para desarrollar dichas medidas de adaptación (IANIGLA, 2010; Johansen et al., 2018).

Existen diferentes métodos para obtener el volumen total de un glaciar. El más directo es realizar un mapa de espesor de hielo a partir de mediciones directas (perforaciones) o indirectas (radar de penetración terrestre, sísmica, gravimetría, etc.). Actualmente la técnica más utilizada es el radar de penetración terrestre (GPR), ya que su eficacia ha sido comprobada en diferentes tipos de glaciares a lo largo del mundo (Gardelle et al., 2012; Macheret & Zhuravlev, 1982; Oberreuter A et al., 2014; Trombotto et al., 1999). Este método, dependiendo de la cantidad de mediciones, puede ser muy preciso, aunque es altamente laborioso e impracticable para un gran número de glaciares.

2.2 Mediciones de espesor de hielo en los glaciares de los Andes del Sur

Las primeras mediciones de espesor de hielo fueron realizadas en 1990 mediante el uso de radar, en la zona de ablación del glaciar Tyndall del Campo de Hielo Sur (CHS), donde se midieron más de 600 m de espesor (Casassa, 1992). En 1992, Gilbert et al. (1996) midieron espesores de hielo en el glaciar de la caldera del Nevado de Sollipulli en la Araucanía del sur de Chile, combinando datos de radar con gravimetría determinando un máximo superior a los 650 metros. En 1993, Casassa y Rivera (1998) volvieron a medir en el glaciar Tyndall, esta vez con un sistema de radar de captura y visualización digital, detectando valores de espesor levemente inferiores a los obtenidos en 1990.

En 1996 se determinó el espesor de hielo del glaciar Moreno mediante el método de detección sísmica. Se midió una profundidad de hielo de 540 m a 1650 m del margen del glaciar, y 684 m de profundidad al norte del centro del glaciar (Stuefer, 1999).

Luego, Rivera y Casassa (2002) implementaron un sistema de radar de impulso montado en trineos y tirado por motos de nieve que se probó con éxito en el hielo temperado del glaciar Chico del CHS, donde se midió poco más de 700 m en 1997. En Chile central, donde la mayoría de los glaciares son de menores dimensiones que los de Patagonia (Rivera et al., 2000), entre 1998 y 2001, Rivera et al. (2001) midieron los espesores de hielo en los glaciares San Francisco, Juncal Norte y Esmeralda, ubicados en Chile Central, y los glaciares Casa Pangue en el sur y Tapado en el norte del Chile.

En algunos volcanes de la zona sur de Chile también se han realizado mediciones de (radio eco sondaje) RES, por ejemplo, en los glaciares de los volcanes Villarrica y Mocho se midieron exitosamente espesores máximos de hielo de 195 y 270 m, respectivamente (Rivera et al. (2006). Para el 2008 y 2009 en los Andes Desérticos fueron realizadas mediciones sobre los glaciares Amarillo con un espesor máximo de 40 m, Los Amarrillos con 60 m, Brown con 42 m y Conconta con unos 23 m, en el marco de un convenio de asesoría técnica firmado entre la empresa minera BEASA y el CONICET. Para el proyecto Pascua Lama sobre los glaciares Toro y Esperanza la empresa Golder Associates midió 28 y 36 m de espesor; y sobre el glaciar Guanaco unos 120 m de espesor máximo (*Monitoreo de glaciares Amarillo y Los Amarrillos Pascua-Lama, Chile-Argentina, s. f.*).

En el Glaciar Tyndall, se logró un máximo de cerca de 670 m (Zamora et al., 2009), actualmente, el uso de sistemas radio eco sondaje (RES) aerotransportados ha adquirido mayor relevancia, ya que permite acceder a lugares donde antes era muy difícil llegar por presencia de grietas o elevada pendiente. El uso de helicóptero ha permitido, entre otras cosas, abarcar una mayor área de medición, lo cual ha sido beneficioso en términos de los cálculos de volúmenes de hielo. Al existir mayor densidad de datos de espesor de hielo en un glaciar, mejor es la calidad de la interpolación del espesor y más preciso es el cálculo del volumen de hielo y de agua almacenada.

En la década del 2010 la Dirección General de Aguas comenzó una tarea exhaustiva de mediciones con radar a lo largo de los Andes chilenos, donde midió espesores de hielo en los glaciares Monos de Agua, Olivares Alfa, Olivares Beta, Olivares Gamma y Juncal Sur; y en los glaciares Cipreses, Palomo y Cortaderal (DGA, 2011). Para los volcanes Villarrica y Sollipulli, se obtuvieron espesores de hielo que alcanzaron 118 y 775 m (DGA, 2014). También se realizaron mediciones en los glaciares Colonia, Nef y San Rafael, del Campo de Hielo patagónico Norte (CHN), con un máximo de 842 m de hielo temperado en el glaciar San Rafael; 726 m en el glaciar Colonia y 620 m en el glaciar Nef (DGA, 2012a).

También se realizaron mediciones en los glaciares Cipreses Norte y Universidad, ubicados en la cuenca del Rapel, registrando un máximo de 342 m en el glaciar Universidad, también se realizaron mediciones de espesor de hielo en los glaciares Esmeralda, la Paloma, del Rincón, Cerro El Plomo, Yeso, Bello, Yeso 2, Echaurren, Mesón Alto y San Francisco, ubicados en la cuenca del río Maipo. El espesor máximo que se detectó fue de 151 m en el glaciar Esmeralda (DGA, 2012b).

Para el campo de hielo se realizó un estudio entre agosto y septiembre de 2014 y septiembre-octubre de 2015 en más de 400 km de mediciones en Jorge Montt, O'Higgins y el altiplano de meseta de CHS (DGA, 2016). El desempeño del sistema de radar aerotransportado allí utilizado fue adecuado para relevar la mayor parte del espesor del hielo, incluyendo pendientes pronunciadas y zonas de grietas inaccesibles. El máximo espesor de hielo medido fue de 581 m en la zona de acumulación del glaciar Jorge Montt. Durante el 2017 el IANIGLA tomó mediciones del glaciar Agua Negra donde se midieron unos 75 m de espesor (Pierre P. comunicación personal). En los Andes del Norte de la Patagonia se tienen datos de espesor de los glaciares del Monte Tronador que fueron medidos y recopilados en el en el marco de esta tesis dando un promedio entre 140 y 210 m de espesor máximo (Zorzut et al., 2020) (Capítulo 3: ***Influencias de la estimación de pendientes en los modelos de inversión del espesor del hielo: caso de estudio sobre los glaciares del Monte Tronador, en la zona norte de los Andes patagónicos***).

2.3 Estimaciones de volumen en cuerpos de hielo de los Andes del Sur

Durante la década del 90, se presenta una fórmula empírica que relacionaba el volumen de glaciares alpinos con su área (Chen & Ohmura, 1990), estos volúmenes fueron obtenidos mediante mediciones de RES y perfiles sísmicos. La fórmula fue utilizada para calcular el volumen de otros glaciares alpinos en base al área de su superficie, registrada para esos años por el *World Glacier Monitoring Service*. Posteriormente, Meier & Bahr (1996) concluyeron para las regiones con inventarios completos de glaciares que los volúmenes de los glaciares dependen del producto de características propias de la forma del glaciar, como el ancho, el largo y la profundidad. Además de algunas condiciones de borde encontraron distintas distribuciones acumulativas del área de los glaciares a las que adaptaron funciones empíricas con parámetros determinados para cada región, utilizando el método de escalamiento para estimar el número y la distribución de los glaciares en el mundo.

Desde entonces los cálculos y metodologías para obtener el volumen de los glaciares se volvieron más precisos y globales. Radic & Hock (2010) presentaron un método estadístico utilizando la relación (volumen-área) V-A (Bahr et al., 1997; Erasov, 1968; Radić et al., 2007) para derivar volúmenes de hielo a

nivel regional y global usando datos de $\sim 123,000$ glaciares del WGMS (1989) ampliado (WGI-XF, compilada por (Cogley, 2009). En ese estudio estimaron un volumen de $8116 \pm 712 \text{ km}^3$ para un área de $29649 \pm 663 \text{ km}^2$ para la región de los Andes del Sur.

La implementación de modelos que incluyen la dinámica de flujo de hielo fue realizada por Farinotti et al. (2009). Luego Huss & Farinotti (2012) presentaron una nueva aproximación para el cálculo del espesor de hielo y volumen aplicado a todos los glaciares y campos de hielo alrededor del mundo (171,000 cuerpos de hielo según el RGI 2.0 (Arendt et al., 2012)) calibrado con 300 glaciares, utilizando un modelo dinámico simple para obtener la distribución espacial del espesor de un glaciar, que consiste en invertir su topografía superficial. El método que proponen combina el contorno del glaciar desde el (Randolph Glacier Inventory) RGI con modelos de elevación digital. Se calcula la distribución de espesores de cada glaciar basado en una inversión topográfica superficial, usando los principios de la dinámica de flujo. Dicho enfoque de base física modeló el espesor del hielo para los glaciares de los Andes del Sur y reportaron un volumen total de hielo de $6674 \pm 507 \text{ km}^3$ para un área de 32521 km^2 de acuerdo al Randolph Glacier Inventory (RGI v2) (Arendt et al., 2012).

Los modelos dinámicos existentes hasta ese momento fueron calibrados en comparación a observaciones de volúmenes optimizadas para el propósito específico de estimar el volumen total glaciar alrededor del mundo. Grinsted (2013) calibró su modelo con 254 glaciares y utilizó los tres grandes inventarios mundiales de glaciares World Glacier Inventory (WGI), en conjunto con la base de datos de la Vigilancia Mundial del Hielo Terrestre desde el Espacio (Global Land Ice Measurements from Space (GLIMS)). Por último, utilizó el recién compilado RGI v2. arrojando un volumen de 4235.4 km^3 para un área de 32546 km^2 según el RGI y un volumen 2461.6 km^3 en un área de 25925 km^2 según el WGI/GLIMS para los Andes del Sur. Esta relación se aplicó a cada uno de los registros de RGI.

Los coeficientes de la relación V–A fueron calculados por Grinsted (2013) para 4 subgrupos de cuerpos de hielo (casquetes de hielo, glaciares $> 25 \text{ km}^2$, glaciares $\leq 25 \text{ km}^2$ y para la base de datos completo). Carrivick et al. (2016) aplicaron un modelo basado en la aproximación de plástico perfecto a lo largo de las líneas centrales de los glaciares para obtener una estimación de primer orden del espesor del hielo y luego interpoló estas estimaciones de espesor a través de las áreas de los glaciares, donde se obtuvo la primera cobertura completa de la distribución del espesor de hielo, la topografía del lecho y el volumen de $5955 \pm 1191 \text{ km}^3$ para 617 glaciares entre 41°S y 55°S . El volumen total de hielo modelado fue de $1234 \pm 246 \text{ km}^3$ para el Campo de Hielo Norte (CHN) y $4326 \pm 865 \text{ km}^3$ para el Campo de Hielo Sur (CHS). Huenante (2018) estimó un volumen de $289.68 \pm 87 \text{ km}^3$ para un área de 9572.2 km^2 a través de la

relación V-A calibrando su modelo con 18 glaciares, el que fue aplicado entre los 28 y 41°S sobre el inventario de glaciares chileno dejando fuera toda la Patagonia. Farinotti et al. (2019) evaluaron mundialmente los datos de espesor del hielo y el volumen de los glaciares, utilizando diferentes modelos de inversión para obtener la distribución del espesor del hielo de los glaciares presentados en el RGI 6.0 calibrados con 38 glaciares de los Andes del Sur obtenidos de la base de datos "*The Glacier Thickness Database*" (GlaThiDa Consortium, 2019) dando un volumen de $5340 \pm 1390 \text{ km}^3$ con un área de 29368 km^2 .

2.4 Estimaciones de volumen en glaciares de escombros

En la literatura inglesa se les llama "Rock glaciers" y en Chile se usa la traducción literal (glaciar rocoso) mientras que en Argentina se sigue la denominación de A. Corte de glaciar de Escombros (Corte, 1976); termino que se adoptara a lo largo de toda la tesis.

Es importante tener una comprensión plena de todos los aportes en la hidrología del sistema de alta montaña para gestionar eficazmente los recursos hídricos a fin de mitigar o adaptarse a los impactos del cambio climático; esto incluye los glaciares de escombros (Jones et al., 2019).

Si bien las evaluaciones regionales y mundiales del cálculo del volumen de hielo han incluido a los glaciares de los Andes del Sur como parte de sus resultados (Farinotti et al., 2019; Grinsted, 2013; Huenante, 2018; Radić & Hock, 2010), las mismas están basadas en inventarios de escala global que tiene grandes deficiencias para describir las peculiaridades a escala regional. Tal es el caso de los glaciares de escombros, los cuales no son tenidos en cuenta en dichas estimaciones. Debido a su importancia regional, diferentes estudios locales estimaron el volumen para los glaciares de escombros en los Andes Centrales de Chile (Azócar & Brenning, 2010; Schaffer et al., 2019). Más recientemente, se han realizado estudios para estimar la importancia hídrica de los glaciares de escombros en diferentes regiones montañosas (Jones et al., 2019).

La reciente publicación de inventarios actualizados de los glaciares y los glaciares de escombros ha mejorado sustancialmente el conocimiento sobre su estado actual y su distribución en los Andes. Un número cada vez mayor de estudios se ha centrado en la cuantificación del hielo presente en los glaciares de escombros (Jones et al., 2018; Monnier & Kinnard, 2013), y en los posibles efectos del cambio climático en su dinámica. Los glaciares de escombros son climáticamente más resilientes que los glaciares y contienen volúmenes de hielo potencialmente valiosos desde el punto de vista hidrológico (Jones et al.,

2019). El papel de los glaciares de escombros como reservas de agua a largo plazo y fuentes de agua dulce a corto plazo en muchos sectores semiáridos de los Andes meridionales, también ha recibido una atención creciente en los últimos años (Azócar & Brenning, 2010; Jones et al., 2018; Schaffer et al., 2019). Estas masas de hielo pueden proporcionar una cantidad relativamente constante de agua dulce en muchas cuencas donde el hielo de los glaciares está ausente o es muy escaso, especialmente durante períodos secos prolongados en los que las precipitaciones también se reducen al mínimo (Schaffer et al., 2019). A escala local, los estudios realizados con métodos empíricos han estimado que, en total, los glaciares de escombros pueden representar más hielo almacenado que los glaciares de los Andes Centrales (Azócar & Brenning, 2010; Janke et al., 2017), pero se requieren más mediciones para confirmar estos resultados (Arenson & Jakob, 2010).

Dado que la información detallada sobre el subsuelo sólo está disponible para un número limitado de glaciares de escombros, las relaciones empíricas entre el espesor y el área han sido aplicadas para predecir el espesor de los glaciares de escombros y derivar el volumen (p. ej., (Azócar & Brenning, 2010; Brenning, 2005b; Jones et al., 2018). La relación empírica de ley de potencia de Brenning (2005a) fue desarrollada a partir de mediciones morfométricas de campo en 19 glaciares de roca en los Andes de Santiago, Chile (Bodin et al., 2010). En su tesis Brenning (2005a) realizó su estimación sobre un número de 185 glaciares de escombros de los Andes Centrales chilenos (27 – 35°S) con especial atención sobre los Andes de Santiago de Chile e incluyó 34 glaciares de Argentina en su análisis. En total, los glaciares de escombros en la parte chilena y Argentina alcanzan los 4.25 ± 0.85 y 4.35 ± 0.85 km³ de volumen de hielo, respectivamente. Entre los autores que trabajaron en los Andes del Sur, Azocar & Brenning (2010) estimaron para los glaciares de escombros de los Andes Chilenos entre los 27 y 33°S con un área de 147.5 km² un equivalente en agua de 2.37 km³ utilizando la relación empírica propuesta por (Brenning, 2005a).

Posteriormente, Jones et al (2019) proporcionaron la primera estimación del volumen de todos los glaciares de escombros a una escala global, para América del Sur hay 28665 glaciares de escombros con un área de 3557.69 km² y un volumen de hielo de 35.8 ± 7.16 km³. Cabe destacar que la investigación relacionada con los glaciares de escombros ha avanzado considerablemente después de la década de 1970, aunque siguen existiendo importantes lagunas en cuanto al conocimiento científico y la comprensión de la hidrología de los glaciares de escombros (Jones et al., 2018).

2.5 Entorno regional y climático

Los Andes argentinos se extienden por unos 4000 km (22 – 55°S) a lo largo del margen suroeste de América del Sur. Las mayores elevaciones ocurren en las porciones central y norte de este rango (22 – 34°S) con varios picos que superan los 6000 m s.n.m. incluyendo el Monte Aconcagua (6961 m s.n.m.), el pico más alto del mundo fuera de Asia. La amplia gama latitudinal desde los dominios subtropicales hasta los subantárticos, los pronunciados gradientes de elevación y la orientación norte-sur perpendicular a la circulación atmosférica predominante causan condiciones climáticas extremadamente diferentes y, en consecuencia, una gran variedad de tipos de masas de hielo a lo largo de los Andes del Sur. Siguiendo las regiones glacio-climatológicas de Lliboutry y otras (1998), los Andes argentinos se dividieron en cinco regiones glaciológicas. Esta regionalización es similar a la que se utilizó para el inventario de los glaciares de Chile en el lado occidental de los Andes del Sur (Barcaza et al., 2017). La región de los Andes desérticos (22 – 31°S) está situada en la parte noroccidental de la Argentina. Esta región abarca una alta cordillera (3500 – 6700 m s.n.m.) con condiciones climáticas áridas y semiáridas. Escasas precipitaciones (< 500 mm/año) se concentran generalmente durante los meses de verano australes (Fuenzalida et al., 2005; Viale et al., 2019). Más al sur, los Andes Centrales argentinos (31 – 35°S) son también caracterizados por altas elevaciones (2600 – 6900 m s.n.m.). La región recibe una modesta cantidad de precipitación anual, aumentando hacia el sur de unos 500 mm en el 31°S a 1000 mm en el 35°S (Viale & Nuñez, 2011). En la región de los Andes de la Patagonia Norte (35 – 45°S), las cantidades de precipitación aumentan considerablemente (> 2000 mm) debido al paso más frecuente de sistemas ciclónicos incrustados en los occidentales dominantes (Viale et al., 2019). Sin embargo, la elevación media de la barrera andina disminuye sustancialmente (1000 – 1500 m s.n.m.) en comparación con las latitudes del norte. En la región de los Andes Patagónicos del Sur (45 – 53°S) el paso frecuente de los sistemas ciclónicos occidentales a lo largo del año da lugar a una elevada precipitación total anual valores (> 4000 mm) (Bravo et al., 2019). La presencia de picos relativamente más altos (algunos sobre 3000 m s.n.m.) y las elevadas mesetas favorecen la presencia de la mayor concentración de glaciares en América del sur. Finalmente, los Andes en la región de Tierra del Fuego (53 – 55°S) son sustancialmente más bajos (1000 – 1500 m s.n.m.) con una orientación oeste-este, paralela a los vientos predominantes del oeste. Por lo tanto, el aumento orográfico de las precipitaciones no es tan fuerte como más al norte.

2.6 Inventario Nacional de Glaciares

El ING es una herramienta para el conocimiento de los glaciares y las geoformas periglaciares que actúan como reservas hídricas existentes en el territorio nacional. Fue realizado por el IANIGLA-CONICET con la coordinación de la Secretaria de Gobierno de Ambiente y Desarrollo Sustentable, siguiendo para su elaboración los estándares planteados por el WGMS. Modificada posteriormente por el GLIMS (www.glims.org) en la cual se basaron para clasificar los glaciares en base a diferentes parámetros morfológicos, con algunas adaptaciones dadas las particularidades que presentan muchos de los cuerpos de hielo existentes en los Andes Áridos. En esta zona, los glaciares de escombros son muy numerosos y representan un recurso hídrico de suma importancia, por lo que las clasificaciones internacionales fueron ampliadas para incorporar este tipo de glaciares y sus características principales (Zalazar et al., 2020), (Figura 2.1).

La información (mapas, informes y archivos vectoriales del Inventario Nacional de Glaciares) se encuentra disponible de forma libre y gratuita a través de la página web oficial www.glaciaresargentinos.gob.ar.

2.6.1 Definiciones

Se citan a continuación diferentes definiciones de glaciar:

Un glaciar es un cuerpo de hielo perenne, formado en la superficie terrestre por la acumulación, compactación y recristalización de la nieve, y que muestra señales de movimiento por acción de la gravedad (IANIGLA-ING, 2014).

“Una masa de hielo perenne estable o que fluye lentamente, con o sin agua intersticial, formado por la recristalización de nieve, ubicado en diferentes ecosistemas, cualquiera sea su forma, dimensión y estado de conservación. Son parte constituyente de cada glaciar el material detrítico rocoso y los cursos internos y superficiales de agua”. Además, este artículo (IANIGLA-ING, 2014) también define al ambiente periglacial en la alta montaña como: “el área con suelos congelados que actúa como regulador del recurso hídrico. En la media y baja montaña al área que funciona como regulador de recursos hídricos con suelos saturados en hielo” Argentina, senado y cámara de diputados de la nación (2010), Ley 26639 Régimen de Presupuestos Mínimos para la Preservación de los Glaciares y del Ambiente Periglacial, Argentina.

“Masa de hielo terrestre que fluye pendiente abajo (por deformación de su estructura interna y por el deslizamiento en su base), encerrado por los elementos topográficos que lo rodean, como las laderas de un valle o las cumbres adyacentes; la topografía del lecho de roca es el factor que ejerce mayor influencia en la dinámica de un glaciar y en la pendiente de su superficie. Un glaciar subsiste merced a la acumulación de nieve a gran altura, que se compensa con la fusión del hielo a baja altura o la descarga en el mar” Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC, 2001).

El proyecto GLIMS propone la siguiente definición: "Un glaciar está formado por un cuerpo de hielo y nieve que se observa al final de la temporada de deshielo, o, en el caso de los glaciares tropicales, después del derretimiento de la nieve transitoria. Esto incluye, como mínimo, todos los afluentes y alimentadores conectados que contribuyen hielo en el glaciar principal, además de todo el hielo cubierto de escombros. Se excluyen todos los de tierra expuesta, incluyendo nunataks. Una plataforma de hielo después de la zona de conexión a tierra de dos o más glaciares que está flotando en el mar se considerará como un glaciar separado". Esta definición está basada en la teledetección, por lo tanto, no implica el movimiento del hielo (Kargel et al., 2014).

La Dirección General de Aguas (DGA) (2009), propuso una definición operativa, práctica y fácil de aplicar mediante el uso de sensores remotos satelitales: Glaciar es toda superficie de hielo y nieve permanente generada sobre suelo, que sea visible por períodos de al menos 2 años y de un área igual o superior a 0.01 km² (una hectárea). O cualquier superficie rocosa con evidencia superficial de flujo viscoso, producto de un alto contenido de hielo actual o pasado en el subsuelo.

Con el fin de identificar y mapear los glaciares se clasificaron 5 categorías: glaciar descubierto, glaciar cubierto, glaciar de escombros, glaciar cubierto con glaciar de escombros y manchón de nieve (clasificación utilizada por el ING (IANIGLA-ING, 2014), adoptada a lo largo de esta tesis).

GV-Glaciar de valle: glaciar con un área de acumulación bien definida, cuya lengua esta encauzada y fluye valle abajo.

GM-Glaciar de montaña: glaciar generalmente de pequeño tamaño que se encuentra confinado por la topografía del terreno montañoso que lo rodea pero que no alcanza a fluir a lo largo de un valle; frecuentemente localizado en un circo o nicho. Incluye glaciares de circo, de nicho y de cráter.

Cabe mencionar que los glaciares de valle como los de montaña de gran tamaño, pueden tener una cobertura de detritos variable. Como por ejemplo en la región de los Andes Centrales, en algunos grandes glaciares de valle su cobertura es mayor generando una transición a glaciares de escombros.

GD-Glaciador de descarga: glaciador de valle que fluye o nace desde el interior de un campo de hielo, domo de hielo y/o sábana de hielo, transfiriendo masa hacia las zonas más bajas.

MN-Manchón de nieve / glaciarete: cuerpos de hielo o nieve permanente generados sobre la superficie terrestre a partir de la compactación y recrystalización de la nieve y/o hielo, sin una cobertura detrítica significativa, visible por periodos de al menos 2 años y que no presenten evidencias de movimiento por gravedad.

GE-Glaciador de escombros: cuerpo de detrito congelado y hielo, con evidencias de movimiento por acción de la gravedad y deformación plástica del permafrost, cuyo origen está relacionado con los procesos criogénicos asociados con suelo permanentemente congelado y con hielo subterráneo o con el hielo proveniente de glaciares descubiertos y cubiertos, y de un área mayor o igual que 0.01 km² (una hectárea). Los glaciares de escombros dependen fuertemente del aporte de detritos, nieve y hielo, se pueden clasificar por su grado de actividad en activos, inactivos y fósiles (Haeberli, 1985; Ikeda, 2004). Los glaciares de escombros activos presentan frentes abruptos (> 35°) con lineamientos de flujo, crestas y surcos longitudinales y transversales bien definidos. Una vez que dejan de moverse se llaman inactivos y aparecen como geofomas colapsadas con menor pendiente en el frente (< 35°), también puede aparecer cierta cobertura vegetal. El cuerpo de sedimentos que permanece una vez que el hielo se ha derretido se llama glaciador de escombros fósil (Barsch, 1978; Brenning, 2005a, 2005b; Trombotto, 2002).

Glaciador en surge: Son aquellos que experimentan tasas de flujo un orden de magnitud o más, por encima de 20 las velocidades normales, lo que se produce en forma irregular, cada algunos años, lo que puede deberse a cambios en los perfiles de equilibrio, cantidad de agua subglacial disponible, existencia de lagos subglaciares, entre otras.

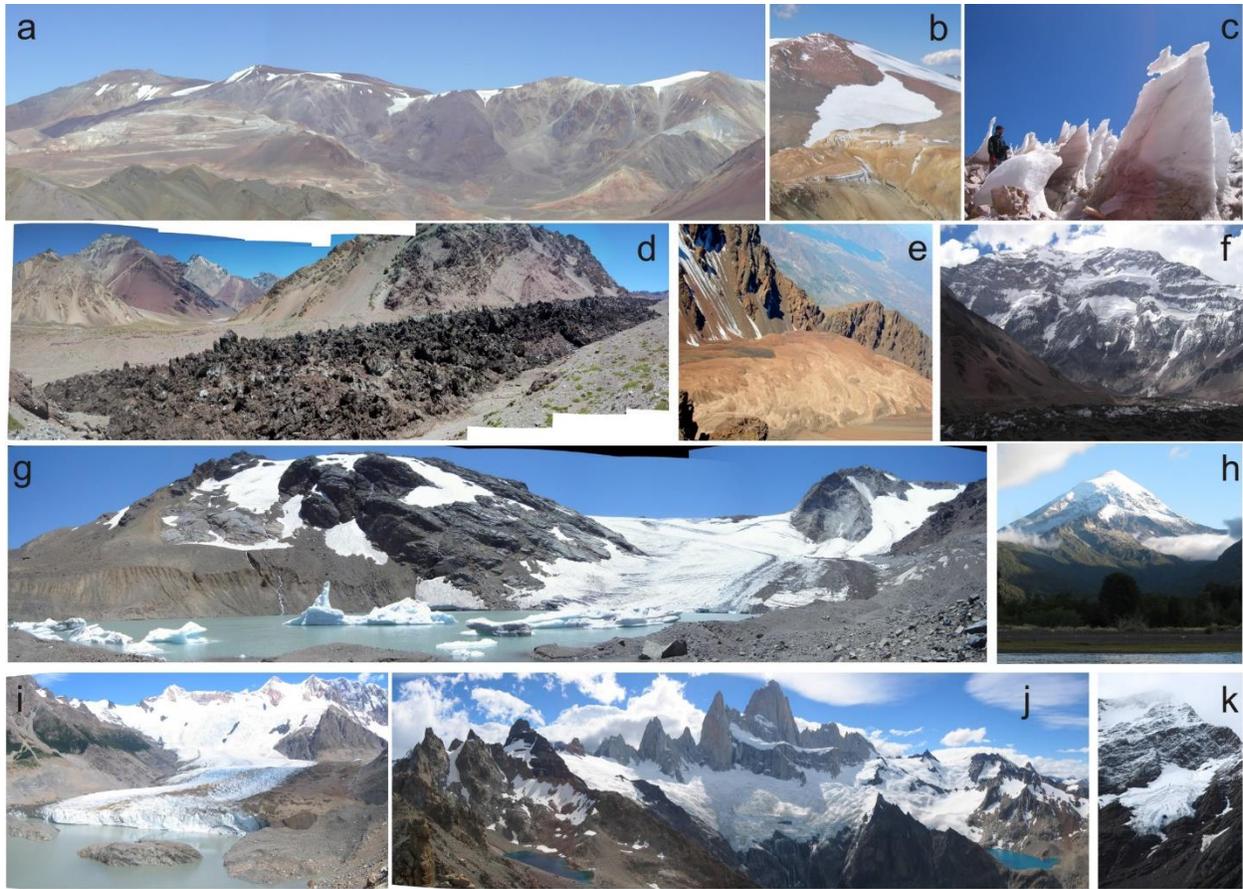


Figura 2.1. Diferentes tipos de masas de hielo que pueden ser encontradas en los Andes argentinos. **(A,B)** manchones de nieve/glaciaretos y glaciares de montaña, Andes Desérticos, **(C)** penitentes sobre glaciar de montaña, Andes Desérticos, **(D)** cobertura de escombros, glaciar en surge, Andes Centrales, **(E)** glaciares de escombros, Andes Centrales, **(F)** glaciares cubiertos y colgantes, Andes Centrales, **(G)** glaciar de valle en calving, Andes Centrales, **(H)** glaciar con forma de domo, Andes del norte de la Patagonia, **(I,J)** glaciar de valle y montaña, Andes del sur de la Patagonia, **(K)** glaciar colgante, Andes del Sur de la Patagonia. Fotos provistas por el IANIGLA-CONICET.

2.7 Organización geográfica

La presente tesis sigue la organización del Inventario Nacional de Glaciares, con cinco grandes regiones con características climáticas y topográficas propias: Andes Desérticos, Andes Centrales, Andes del Norte de la Patagonia, Andes del Sur de la Patagonia y Andes de Tierra del Fuego (Figura 2.2).

La región de los Andes Desérticos se extiende desde los 21° 46'S hasta los 31°S e incluye las porciones occidentales de las provincias de Salta, Jujuy, Tucumán, Catamarca, La Rioja y el norte de San Juan (cuena del río Jáchal). La región de los Andes Centrales se extiende entre los 31°S y 35°S e incluye la porción sur de la provincia de San Juan (cuena del río San Juan), la totalidad de la provincia de

Mendoza, y el extremo norte de la provincia del Neuquén (cuenca del río Grande). Siguiendo hacia el sur, la región de los Andes del Norte de la Patagonia se extiende entre los 35°S y 45°S e incluye los glaciares de la provincia del Neuquén (cuenca del río Neuquén) sumados a los de Río Negro y Chubut. La región de los Andes del Sur de la Patagonia incluye los glaciares de la provincia de Santa Cruz entre los 45°S y los 53°S, mientras que la región de los Andes de Tierra del Fuego abarca el extremo austral del continente.



Figura 2.2. Regiones delimitadas en el ING y cuerpos de hielo a lo largo de los Andes argentinos. Modificada de (Zalazar et al., 2020).

Dentro del marco del Inventario Nacional de Glaciares es así, que, Argentina cuenta con 8484 km² cubiertos de hielo, de los cuales 5769 se encuentran en la Cordillera de los Andes (Tabla 2.1).

En concordancia con lo observado en estudios e inventarios de glaciares realizados en otras partes del mundo, tanto a nivel país como a nivel regional se observa que las distribuciones latitudinales de los cuerpos de pequeño tamaño (glaciares de escombros) representan una proporción muy baja en cuanto al porcentaje de superficie cubierta total, pero un porcentaje muy importante en cuanto a cantidad de unidades inventariadas, ubicados principalmente en la región de los Andes Centrales. En cambio, los cuerpos más grandes son por lo general relativamente pocos, pero su distribución es proporcionalmente mucho mayor que los cuerpos de menor tamaño, concentrados en la región de los Andes del Sur de la Patagonia. (Figura 2.3)

Tabla 2.1. Área, numero de las masas de hielo por región en los Andes Argentinos.

Región	Área (km ²)	% Área	Nº Glaciares	% Nº Glaciares
Andes Desérticos	270	4.7	2986	18.6
Andes Centrales	1767	30.6	8076	50.2
Andes del Norte de la Patagonia	289	5	2153	13.4
Andes del Sur de la Patagonia	3421	59.3	2420	15.1
Andes de Tierra del Fuego	21	0.4	443	2.8

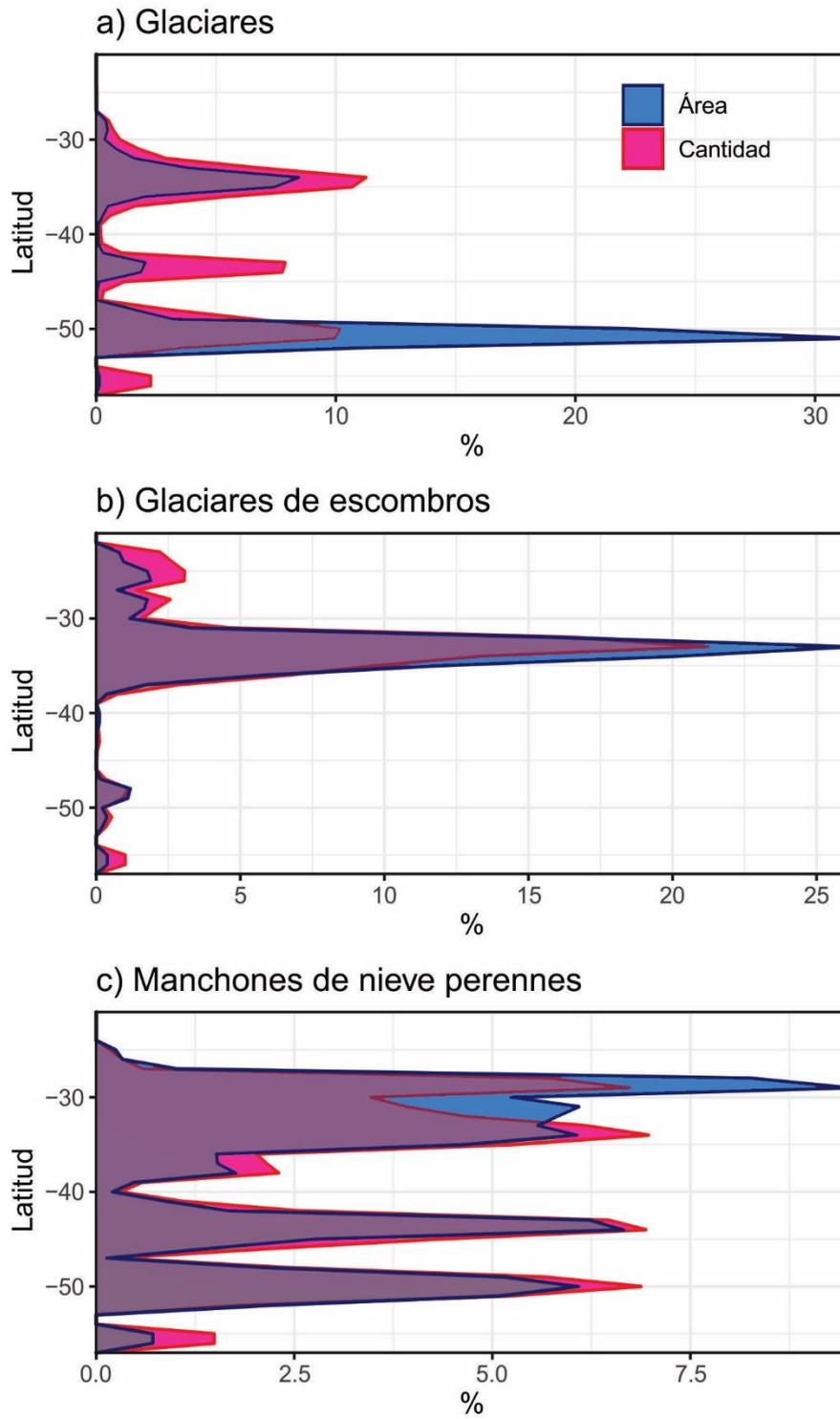


Figura 2.3. Distribución del número y área cubierta por masas de hielo considerando una banda latitudinal de un grado en los Andes argentinos. Adaptada de (Zalazar et al., 2020).

2.7.1 Andes Desérticos

En esta región se encuentra el 4.7 % de la superficie cubierta por hielo de la Cordillera de los Andes, con una extensión de 271 km². Fueron identificados un total de 2986 glaciares, los cuales se encuentran a una altura media mínima de 5000 m s.n.m. Hacia el sur de la región, en la Provincia de San Juan se puede observar un notable incremento en la cantidad de glaciares y de superficie cubierta por hielo. Tal es así que las cuencas situadas hacia el sur de los 26.5°S incluyen el 70 % de la superficie englazada de los Andes Desérticos.

El tipo de glaciar predominante corresponde a los glaciares y manchones de nieve que representan el 35 % de los cuerpos de hielo totales y se ubican a una altura promedio de 5200 m s.n.m. En la Cordillera Oriental se observan glaciares de montaña y de valle a partir de los 25°S, en particular en los cordones montañosos del oeste y en los cerros más altos. Dentro de esta categoría el 90 % está constituido por glaciares de montaña, pequeñas masas de hielo con lenguas poco desarrolladas.

La segunda categoría destacada corresponde a los glaciares de escombros (33 %), localizados a alturas medias mínimas de 4500 m s.n.m. constituyen la categoría más importante en la Cordillera Oriental hasta los 28°S. La presencia de esta cadena orogénica y las elevadas alturas que alcanza en las Provincias de Jujuy, Salta y Tucumán alcanzando los 6380 m s.n.m. en el Nevado de Cachi permite la presencia de glaciares de escombros a longitudes cercanas a los 65°O.

En contraposición al pequeño tamaño de los cuerpos de hielo de la región (superficie promedio de 0.1 km²), se destaca un campo de hielo de más de 18 km² de extensión ubicado entre las cinco cumbres principales del Monte Pissis (6882 m s.n.m.), en el límite entre las provincias de La Rioja y Catamarca.

2.7.2 Andes Centrales

Los Andes Centrales constituyen la segunda región con mayor cobertura de hielo con 1767 km², el 31 % de la superficie total englazada de la Cordillera de los Andes. Sin embargo, se posiciona en primer lugar entre las regiones con mayor cantidad de glaciares, presentando el 50 % de los cuerpos de hielo (8076 unidades), los cuales pueden encontrarse a una altura mínima media de a 4100 m s.n.m.

Las dimensiones de los glaciares son mayores que los registrados en los Andes Desérticos, con una superficie media de 0.22 km². Si bien, el 96 % tiene una superficie inferior a 1 km², se han identificado al

menos diez glaciares de valle con extensiones superiores a los 10 km². El glaciar más extenso de la región es el Tunuyán (57 km²) en la cuenca del río Tunuyán en la provincia de Mendoza.

Esta región se caracteriza por la diversidad de cuerpos de hielo. Con frecuencia se observan glaciares de valle que inician en su porción superior como glaciares descubiertos para luego cubrirse de detritos en su porción terminal hasta constituir glaciares de escombros.

Considerando la diversidad de cuerpos de hielo presente en los Andes centrales, los glaciares de valle y de montaña constituyen el 39 % de todas las geoformas. Suelen ubicarse por encima de los 4400 m s.n.m., no obstante, en las cuencas meridionales de los Andes Centrales este tipo de glaciar puede encontrarse a partir de los 3460 m s.n.m. Se observa un predominio de glaciares de valle y de montaña en las cuencas situadas hacia el oeste de la Cordillera Principal, hacia el sur de los 33.5°S. Las mayores superficies con hielo descubierta de la región se encuentran en la subcuenca del río Tupungato, perteneciente al río Mendoza, y la subcuenca del sector norte del río Tunuyán en la cuenca del río homónimo, cada una constituye el 20 % del total. Dentro de esta categoría, los más numerosos son los glaciares de montaña (75 %) y los glaciares de valle (25 %).

Los glaciares de escombros (31 % del total regional) se ubican predominantemente en las cuencas situadas en el norte hasta los 32.5°S, desde los 3800 m s.n.m., aunque en las cuencas meridionales pueden hallarse a partir de los 3200 m s.n.m. Particularmente, en la cuenca del río San Juan se da el mayor porcentaje de cobertura de glaciares de escombros del país.

En las cuencas ubicadas hacia el este se observa un fuerte predominio de glaciares de escombros y glaciares de valle, estos últimos representan el 15 % de todos los cuerpos de la región. Las otras categorías registradas en los Andes Centrales son glaciares de montaña y valle con el 11 % y manchón de nieve con el 4 %.

2.7.3 Andes del Norte de la Patagonia

Esta región representa el 5 % del área englazada en los Andes de Argentina, una superficie de 289 km² distribuida en 2153 cuerpos de hielo (13 % de los cuerpos de hielo del país).

Los glaciares predominantemente sin cobertura de detritos y ubicados a una altura en general mayores a los 1700 m s.n.m, constituyen el 75 % de las masas hielo. La gran mayoría (93 %) son glaciares de montaña y los restantes glaciares de valle. Los manchones de nieve (20 %) se ubican a unos 100 metros

por encima de la elevación promedio de los glaciares descubiertos. Los restantes tipos de glaciares alcanzan solo el 5 % del total en la región y los pocos glaciares cubiertos con glaciar de escombros pueden observarse hacia el norte de la misma, los cuales suelen localizarse a partir de los 2500 m s.n.m.

En esta región el 71 % de la superficie total de hielo se encuentra concentrada en solo dos cuencas, Puelo Inferior y Futaleufú. La cuenca del Puelo Inferior contiene 42 % de la extensión total de los glaciares, en esta cuenca se encuentran los dos glaciares más extensos de la región el glaciar Esperanza Norte (10 km²) y el Glaciar Manso (8.7 km²) en las provincias de Chubut y Río Negro, respectivamente. Por otro lado, la cuenca de Futaleufú concentrando la mayor cantidad (47 %) de los manchones de nieve de la región.

Los cuerpos de hielo de los Andes norte presentan un tamaño medio de 0.1 km², dimensiones que resultan similares a los encontrados en los Andes Desérticos, la otra región con menor cobertura de hielo del país.

2.7.4 Andes del Sur de la Patagonia

En esta región se encuentra la mayor extensión de hielo de los Andes de Argentina (59 % del área total). Este porcentaje equivale un área de 3421 km² ocupada por masas de hielo que se contabilizan en 2420 unidades (15 % del total).

En la región predominan los glaciares de valle, montaña y descarga (con una extensión del 95 %), principalmente en el centro oeste, donde se destacan por su número y área que cubren. En general, los glaciares de esta región se desarrollan por encima de los 1400 m s.n.m. Si bien los glaciares de montaña (92 %) son los más numerosos, esta región contiene grandes glaciares de valle e inmensos (más de cientos de kilómetros cuadrados) glaciares de descarga que drenan el Campo de Hielo Sur hacia la cuenca del río Santa Cruz. A lo largo de la región, los glaciares de escombros representan menos del 1 % de la superficie cubierta por hielo en esta región y, al igual que los manchones de nieve (1 %), se sitúan a una altura mínima promedio de 1600 m s.n.m. En general, los glaciares de escombros se desarrollan en los cordones más orientales de los Andes del Sur por encima de los 1600 m s.n.m.

Debido a la gran extensión de algunos de los glaciares de la región, la superficie media (1.4 km²) de los cuerpos de hielo de los Andes del Sur de la Patagonia es muy superior al resto de país.

La cuenca del río Santa Cruz contiene el 89 % de la superficie cubierta por hielo de la región y el 53 % del país. Aquí se encuentran los glaciares argentinos de mayor tamaño como el Upsala (782 Km²) y

el Viedma (737 Km²) y el famoso glaciar Perito Moreno (244 Km²). Estos cuerpos de hielo se sitúan a cotas mínimas cercanas a los 200 m s.n.m., alturas muy inferiores a las observadas en el resto del país.

2.7.5 Andes de Tierra del Fuego

En la Isla Grande de Tierra del Fuego se encuentra tan solo 0.4 % (21 km²) de las áreas englazadas de los Andes de Argentina, distribuidos en 433 cuerpos de hielo (3 % del total).

La diversidad de cuerpos de hielo registrada por el Inventario Nacional puede observarse en la isla fueguina, siendo los glaciares de valle y de montaña los que predominan ocupando el 57 % de la superficie. Estos cuerpos de hielo se ubican a una altura mínima media de 940 m s.n.m. La siguiente categoría está constituida por los glaciares de escombros, los cuales representan el 25 % de la superficie englazada de la Isla y se sitúan a alturas mínimas medias de 870 m s.n.m. Finalmente, los manchones de nieve componen el 18 % restante de la totalidad de los glaciares fueguinos, ubicándose a una altura mínima media de 971 m s.n.m.

Alrededor del Lago Fagnano, se concentra el 87 % de los glaciares de la Isla Grande de Tierra del Fuego destacándose el glaciar Grande, el de mayor tamaño de toda la isla (0.9 km²) y otros cinco glaciares con áreas de más de 0.5 km². En general, en esta región, los cuerpos de hielo se caracterizan por presentar menores dimensiones con respecto a otras regiones, siendo su tamaño medio de 0.05 km².

2.8 Conclusiones y discusiones

Las mediciones de espesor de hielo son clave a la hora de calcular el volumen de los cuerpos de hielo. Hasta ahora el mayor volumen de datos adquiridos está concentrada en territorio chileno. La mayoría de ellos, obtenidos por empresas privadas y organismos del estado en relación con diferentes proyectos. Esto deja en evidencia la falta de acuerdos que hay en nuestro país entre organismos públicos que realicen el estudio y empresas privadas que los financien. Si bien las políticas nacionales son diferentes en cada país, es sumamente importante gestionar líneas de financiamiento para que estos estudios puedan desarrollarse en Argentina con mayor facilidad y así incrementar las inversiones para cofinanciar las investigaciones futuras.

Aunque existen estudios mundiales sobre el volumen de los glaciares y de los glaciares de escombros que incluyen a la región, la información local para cotejar sus resultados sigue siendo muy

escasa y por lo tanto sus resultados deben ser evaluados antes de ser incorporados en estudios de escala local o regional.

Si bien la elevación de la cordillera es de mayor a menor cota a lo largo de los Andes de Argentina en sentido N-S; el gradiente climático varia en dos direcciones bien pronunciadas. Por un lado, desde los Andes Centrales hacia el sur la cantidad de precipitaciones disminuye de oeste a este, variando el clima de más árido a más húmedo a medida que nos acercamos al sur del país. Y por el otro, encontramos para los Andes Desérticos una variabilidad climática de más árido a más húmedo desde el oeste hacia el este debido al efecto de la diagonal árida. De las evidencias anteriores, surge el amplio abanico de tipos de cuerpos de hielo en nuestro país, de menos espesos a más espesos y de menor a mayor cantidad en relación al área que ocupan. Por ejemplo, los glaciares de escombros son más extensos y numerosos en los Andes Centrales. Por este motivo, es clave que se evalúe el contenido de hielo y su impacto en el sistema hidrológico. La gran variabilidad de cuerpos y tamaños de glaciares que tiene el país, demuestra la necesidad de que las reservas de agua sean evaluadas a escala local. No es posible comprender o conocer el comportamiento a lo largo de toda la cordillera observando solamente una región.

Existe una notoria falta de datos de espesor y volumen de hielo para poder realizar estimaciones más precisas sobre el volumen de los glaciares de la Argentina en el largo terreno que ocupan, este capítulo demuestra y plasma los conocimientos adquiridos e incentiva su uso por parte de organismos públicos y privados para continuar con la adquisición de datos.

Capítulo 3

3 Influencias de la estimación de pendientes en los modelos de inversión del espesor del hielo: caso de estudio sobre los glaciares del Monte Tronador, en la zona norte de los Andes patagónicos



Vista desde la hostería al Monte Tronador ubicado en los Andes del Norte de la Patagonia, Bariloche, Rio Negro. Fotografía: Valentina Zorzut

3.1 Resumen

El espesor del hielo de los glaciares es fundamental para cuantificar los recursos hídricos en las regiones montañosas, y además constituye una variable esencial para los modelos de flujo de hielo. En tal sentido, en este trabajo de investigación, se aplicó un método de inversión de velocidad superficial, que permitió combinar mediciones del espesor del hielo con datos detallados de elevación y velocidad de la superficie. Al mismo tiempo se derivaron estimaciones de espesor y volumen de hielo para los glaciares del Monte Tronador, en la zona norte de los Andes patagónicos.

En ese mismo contexto, se ensayó la dependencia del modelo de inversión con la pendiente superficial mediante el remuestreo de la pendiente de glaciares usando tamaños variables (de 16 a 720 m) de filtro de suavizado.

Si bien los volúmenes totales de los glaciares no difieren considerablemente, es necesario destacar que las estimaciones del espesor del hielo muestran una mayor variabilidad según el tamaño del filtro. Debido a esto, las escalas de suavizado más pequeñas (más grandes) dan espesores de hielo más delgado (más grueso) y mayor ruido (más bajo) en la distribución espacial del espesor del hielo. De este modo, un tamaño de filtro de 300 m, equivalente a cuatro veces el espesor medio del hielo, produce una distribución de espesor sin ruido y con una precisión de 35 m. Aunado a este criterio, se estimó el volumen de los glaciares Monte Tronador en $4.8 \pm 2 \text{ km}^3$, con un espesor de hielo promedio de 75 m. Por otro lado, la comparación de los resultados obtenidos en este estudio con evaluaciones regionales y globales anteriores muestra que la calidad de los inventarios de glaciares es una fuente importante de discrepancias. En consecuencia, los resultados obtenidos al incluir la pendiente superficial como parámetro de entrada revelaron un aumento de la precisión de las estimaciones de distribución del espesor del hielo.

3.2 Introducción

El volumen de hielo de los glaciares es un parámetro clave para cuantificar los recursos hídricos en las regiones montañosas y su posible contribución al aumento del nivel del mar. Asimismo para vincular topografías superficiales y subglaciales, y al mismo tiempo constituye una variable para el modelado del flujo de hielo (Farinotti et al., 2017). Existen varios métodos para inferir el volumen total de los glaciares: enfoques de escala de volumen-área (Bahr et al., 1997), esquemas de parametrización (Haeberli & Hoelzle, 1995) y modelos físicos basados en la dinámica del flujo de hielo y la conservación de masas (Farinotti et al., 2009; Morlighem et al., 2011; Gantayat et al., 2014). Recientemente, ha habido un aumento en el número de estudios que utilizan varios enfoques de inversión numérica para recuperar la distribución del espesor del hielo a partir de las mediciones de la superficie y las características de los glaciares (Farinotti et al., 2017). Gantayat et al. (2014) propusieron un modelo numérico basado en la inversión de la aproximación de flujo paralelo, utilizando únicamente mapas de velocidad superficial y pendiente superficial del glaciar como datos de entrada.

La aproximación de flujo paralelo supone que los glaciares se deforman solo por cizalla simple; con el exponente n de la ley de flujo de Glen igual a 3, el flujo depende principalmente del espesor del hielo (H) y la pendiente superficial (α) ($U_s \sim H^4 \alpha^3$), (U_s) son las velocidades superficiales. Entonces, pequeños cambios en la pendiente o la geometría del glaciar pueden alterar significativamente el flujo (Cuffey & Paterson, 2010). Los gradientes de tensión longitudinal (compresión y extensión) producen variaciones de onda corta en la topografía superficial que influyen en la distribución del espesor del hielo. Por lo tanto, para cumplir con la aproximación de flujo paralelo, es importante suavizar la topografía de la superficie (Oerlemans, 2001; Gantayat et al., 2014); de lo contrario, los errores en la distribución del espesor del hielo podrían propagarse exponencialmente (Bahr et al., 2014).

A partir de esto y utilizando mediciones de espesor de hielo de radar de penetración terrestre (GPR), un modelo de elevación digital detallado (DEM) y mapas de velocidad de la superficie del hielo, se implementó un modelo de inversión de flujo paralelo para derivar mapas de distribución de espesor de hielo y volúmenes de hielo totales para los glaciares del Monte Tronador. Siguiendo esta metodología se analizó la sensibilidad de estos modelos a la topografía de la superficie (Gantayat et al., 2014), específicamente al tamaño del filtro de suavizado (es decir, la distancia), utilizado para remuestrear la pendiente superficial. Por último, se compararon los resultados con estimaciones previas de espesor y volumen de hielo para los glaciares Monte Tronador, derivadas de modelos de distribución de espesor de

hielo no calibrados (Carrivick et al., 2016; Farinotti et al., 2019), y enfoques de escala volumen-área (Bahr et al., 1997).

3.3 Área de estudio

El Monte Tronador (se ubica entre las coordenadas 41.15° S, 71.88° O, 3475 m s.n.m) es un estratovolcán extinto ubicado en la zona norte de los Andes patagónicos a lo largo de la frontera argentina-chilena. Sus laderas superiores albergan una de las cubiertas de hielo contiguas más extensas de la región (~ 57 km² en 2012; (Ruiz et al., 2015)). En base a sus características morfológicas, los 13 glaciares del Monte Tronador se pueden agrupar en nueve glaciares de montaña, todos ubicados por encima de los 1400 - 1500 m s.n.m. (Alerce, Castaño Overa, Cóndor, Frías, Norte, Peulla, Mistral, Parra y Vuriloches), y cuatro valles glaciares con lenguas cubiertas de detritos que descienden a elevaciones más bajas (Verde, Casa Pangué, Manso y Blanco) (Ruiz et al., 2017).

Aparte de los estudios recientes sobre el balance de masa geodésico y las velocidades superficiales de los glaciares del Monte Tronador (Ruiz et al., 2015, 2017), es escaso el conocimiento sobre otras características glaciológicas, y especialmente sobre el espesor del hielo. Es así que, la única medición del espesor del hielo en tierra realizada en el área se adquirió en el año 2000 en la lengua cubierta de escombros del glaciar Casa Pangué (Fig. 3.1). Mediante la aplicación de un sistema de radar de impulsos de baja frecuencia, Rivera et al. (2001) determinaron un espesor medio del hielo de 170 ± 10 m a 860 m sobre el nivel del mar. En 2012, la Dirección General de Aguas de Chile, llevó a cabo una serie de estudios de radar a bordo de helicópteros en el sector chileno del Monte Tronador, proporcionando una cobertura más completa del espesor del hielo (Dirección General de Aguas, 2014).

Las evaluaciones regionales y globales anteriores de la distribución del espesor del hielo incluyen los glaciares del Monte Tronador. Carrivick et al. (2016) modelaron el volumen y el espesor del hielo para los glaciares patagónicos (41 - 55° S) utilizando la ecuación de la aproximación de plástico perfecto. Para Monte Tronador, informaron un espesor de hielo medio de 40 m con un máximo de 143 m y un volumen total de hielo de 2.6 km³. En su evaluación global del espesor del hielo y el volumen de los glaciares, Farinotti et al. (2019) aplicaron diferentes modelos de inversión para recuperar la distribución del espesor del hielo de todos los glaciares en el Inventario de glaciares Randolph (RGI) 6.0 (RGI Consortium, 2017). Sus resultados para los glaciares del Monte Tronador arrojan un espesor de hielo medio de 61 m con un máximo de 262 m, y un volumen total de hielo de 4.3 km³. Es interesante destacar que, ninguno de estos

modelos fueron calibrados con mediciones “*in situ*” del espesor del hielo, asimismo no sé considero como dato de entrada la velocidad de la superficie del hielo.

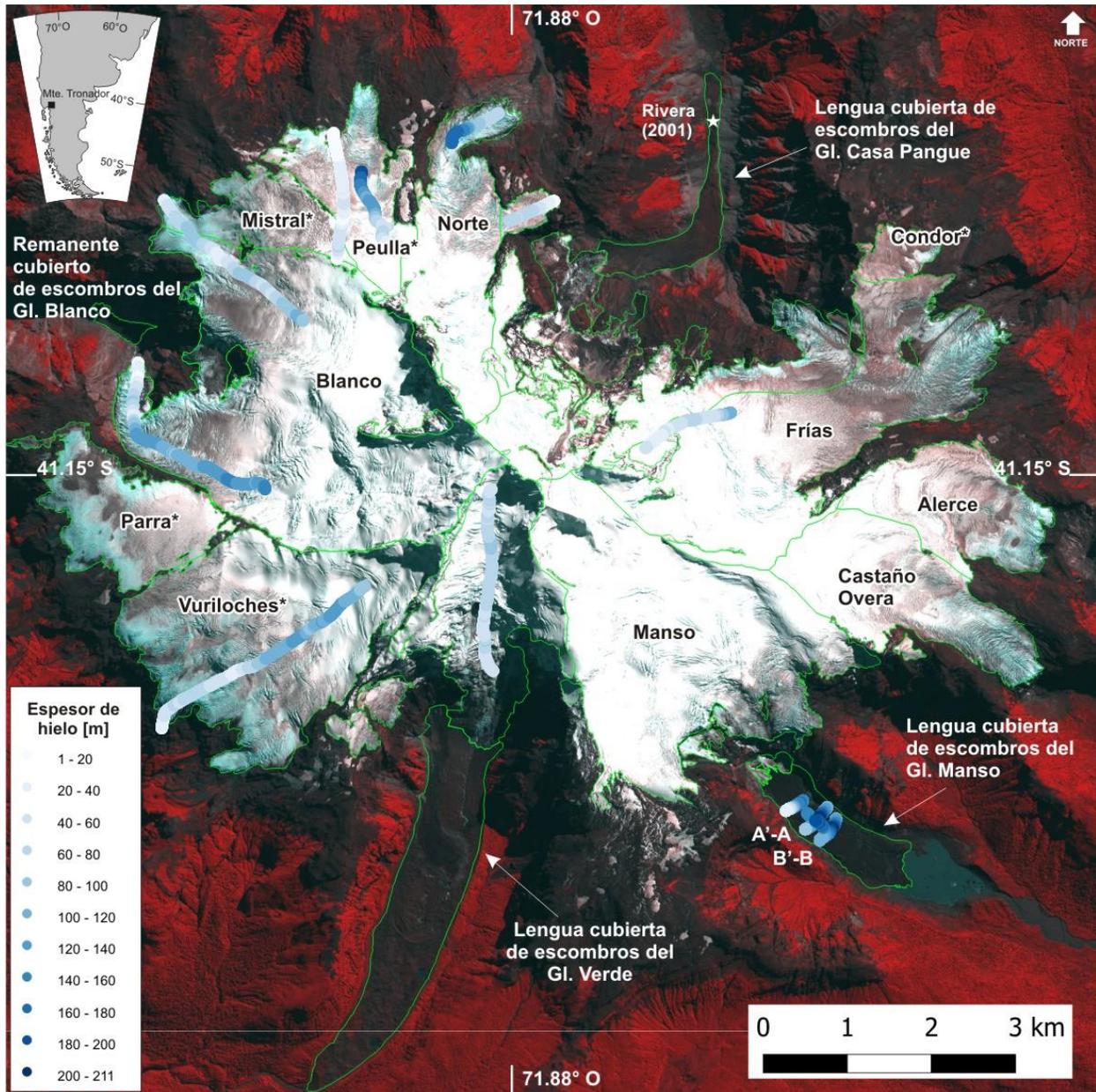


Figura 3.1. Glaciares y mediciones de GPR disponibles en el Monte Tronador (* indica nombres no oficiales dados por Ruiz et al., 2017). Imagen de fondo: imagen satelital Pléiades pan-sharpened en falso color, 7 de marzo de 2012, PGO, CNES-Airbus D & S (Ruiz et al., 2015). Los límites individuales de los glaciares están indicados por finas líneas verdes. Las líneas azules gruesas y graduadas muestran la ubicación de los perfiles GPR discutidos en el texto, incluidos dos transectos transversales (A -A, B -B) sobre la lengua cubierta de escombros del glaciar Manso (Fig. Suplementaria SM1). La estrella muestra la ubicación de las observaciones del espesor del hielo realizadas por Rivera et al. (2001).

3.4 Datos y métodos

3.4.1 Observaciones realizadas del espesor del hielo

El conjunto de datos de espesor de hielo más extenso se derivó de una serie de estudios aéreos con un radar de penetración terrestre (GPR) de baja frecuencia, que opera a una frecuencia central de 25 MHz (Dirección General de Aguas, 2014). El relevamiento se realizó durante el verano de 2012 (Fig. 3.1), y las mediciones suman 23.8 km de perfiles GPR en nueve glaciares (Vuriloches, Verde, Peulla, Parra, Norte, Mistral, Frías, Casa Pangue y Blanco). El sistema GPR fue controlado y operado desde la cabina del helicóptero. Las antenas se montaron en una estructura de aluminio que colgaba entre 40 y 50 m por debajo del helicóptero y se conectaron a la unidad de control mediante un cable de fibra óptica. La elevación de las antenas se midió en tiempo real con un Sistema de Posicionamiento Global Diferencial (DGPS) y un altímetro láser. La Dirección General de Aguas (2014) proporciona una descripción detallada de los métodos utilizados para recuperar estimaciones del espesor del hielo a partir de los radargramas sin procesar.

Para el caso particular de esta tesis, las mediciones realizadas en helicópteros de 2012 se complementaron con 3.2 km de prospecciones GPR adquiridas en la lengua cubierta de escombros del glaciar Manso durante el otoño de 2018 (Fig. 3.1; Complementaria Fig. SM1). Se contó con un sistema GPR liviano y de bajo consumo de energía, diseñado para estudios de glaciares realizados a pie en áreas de difícil acceso (Oberreuter et al., 2014). Se utilizó una antena de frecuencia central de 5 MHz acoplada a un Sistema de Posicionamiento Global Diferencial (DGPS) para determinar con precisión la ubicación de los perfiles del radar. Se realizó el procesamiento con el software Radan 6 y se aplicó una velocidad de propagación de ondas de 0.168 m ns^{-1} para recuperar el espesor del hielo de los radiogramas sin procesar.

Si bien la Dirección General de Aguas (2014) controló cuidadosamente el cruce de perfiles GPR para validar sus interpretaciones, no proporcionaron estimaciones de incertidumbre para sus mediciones. Por lo general, se asume que la resolución vertical teórica de los datos GPR está entre un cuarto y la mitad de la longitud de onda electromagnética (Sheriff & Geldart, 2006). Finalmente, de manera semejante, se tomó la mitad de la longitud de onda como una estimación y a diferencia, se calculó una incertidumbre de 4 m para las mediciones de GPR aerotransportadas en el conjunto de datos de la Dirección General de Aguas (2014), y 17 m para las mediciones en tierra adquiridas en el glaciar Manso para este estudio.

Un aspecto importante a considerar fue que debía evitarse la autocorrelación entre las mediciones de GPR, en tal sentido los datos del radar se remuestrearon para establecer correspondencia

con las celdas de cuadrícula de 16 m de la salida del modelo final. En los casos que una celda contenía más de una medición de GPR, se utilizó el valor medio. A continuación del remuestreo a los 27 km de transectos GPR con una resolución de 16 m, se recuperaron 1292 mediciones en 10 de los 13 glaciares principales del Monte Tronador. El espesor medio del hielo medido para cada glaciar oscila entre 76 y 150 m, con una media general de 88 m. Por consiguiente, el espesor máximo del hielo varía entre 140 y 210 m, con valores superiores a 150 m para los glaciares Manso, Verde, Peulla y Blanco. Por otra parte, el espesor máximo del hielo se encuentra típicamente a una altitud de alrededor de 2000 m sobre el nivel del mar, no obstante, en la lengua del glaciar Manso, el máximo de 210 m se encuentra a menor altura, alrededor de los 1000 m sobre el nivel del mar. (Fig. 3.1).

3.4.2 Descripción del modelo de espesor de hielo

La aproximación del flujo laminar (Ec. (1)) asume que los glaciares se deforman por cizalla simple y, por lo tanto, las líneas de flujo son paralelas (Cuffey & Paterson, 2010):

$$EC. 1 \quad U_s = U_b + \frac{2A}{n+1} \tau_b^n H$$

donde U_b y U_s son las velocidades superficiales y basales, n es el exponente de la ley de flujo de Glen, A es el parámetro de reptación (una medida de la dureza del hielo), H es el espesor del hielo y τ_b es el esfuerzo basal ($\tau_b = f \rho g H \sin \alpha$), donde ρ es la densidad del hielo, g la aceleración debida a la gravedad, f el factor de forma y α la pendiente superficial.

La distribución del espesor del hielo para los glaciares del Monte Tronador se estimó reordenando los términos de la ecuación (1) en:

$$EC. 2 \quad H = \frac{(U_s - U_b)^{n+1}}{2A} * \frac{1}{(f * \rho * g * \sin(\alpha))^{n+1/n+1}}$$

Donde se usó $n = 3$, $A = 2.4 \times 10^{-24} \text{ Pa}^{-3} \text{ s}^{-1}$ (hielo templado glaciar; (Cuffey & Paterson, 2010)), un valor constante para $\rho = 917 \text{ kg m}^{-3}$, $g = 9.8 \text{ m s}^{-2}$ y $f = 0.8$ (Haeberli & Hoelzle, 1995), y se asume que la velocidad basal es proporcional a la velocidad superficial ($U_b = a \times U_s$), donde a es la constante de proporcionalidad.

3.4.3 Entrada de datos

Ruiz et al. (2015) derivaron las velocidades de la superficie del hielo para los glaciares del Monte Tronador a partir de tres pares de imágenes de satélite Pléiades adquiridas entre marzo y mayo de 2012.

Los espacios de menos de 0.15 km² se rellenaron mediante un método de interpolación bilineal, lo que dio como resultado un mapa de cobertura total, resolución de 16 m, de las velocidades superficiales medias anuales de todos los glaciares del Monte Tronador (Fig. 3.2b). Ruiz et al. (2017) digitalizaron manualmente los contornos de los glaciares (Fig. 3.1) a partir de una ortoimagen pancromática de Pléiades del 21 de abril de 2012. Luego, las divisiones de hielo se corrigieron utilizando vectores de desplazamiento de superficie del mapa de velocidad de superficie de 2012 (Ruiz et al., 2015). Aquí, se estimó la pendiente superficial de un DEM de Pléiades (PLEI DEM) generado a partir de un triplete (reverso, nadir y frente) de imágenes de Pléiades adquiridas el 21 de abril de 2012. Las pendientes derivadas se volvieron a muestrear en una cuadrícula de 16 m para mantener la coherencia con el mapa de velocidad superficial de 2012 (Ruiz et al., 2015). Luego, se utilizaron los contornos de los glaciares (Ruiz et al., 2017) para enmascarar el terreno sin hielo (Fig. 3.2a).

3.5 Configuración experimental

Se aplicó un filtro de remuestreo en el PLEI DEM para evaluar la influencia de la pendiente superficial en los cálculos del espesor del hielo. En primer lugar, se volvió a muestrear el PLEI DEM de resolución original de 16 m utilizando un filtro de suavizado promedio ponderado a diferentes escalas, desde 1 × (sin filtrar, resolución de 16 m) a 45 × (equivalente a un tamaño de celda de 720 m). Luego, se redujo la escala de la cuadrícula de superficie remuestreada al tamaño de celda original de 16 m mediante interpolación de splines. Finalmente, para cada DEM suavizado, la pendiente superficial se obtuvo utilizando el algoritmo de Zevenbergen y Thorne (1987) implementado en el software SAGA GIS (3.2 o superior).

Las cuadrículas de pendiente suavizada resultantes (en adelante SSL abreviado) se vuelven a muestrear a diferentes escalas espaciales (1 x a 45 x es el promedio de un área cubierta por 45 x 45 pixel da 720 mt²) con valores de elevación que dependen de la morfología local de las celdas, pero tienen la misma resolución espacial que el mapa de velocidad de superficie (16 m) (Fig. 3.2c y Fig. Complementaria SM2). Finalmente, siguiendo a Gantayat et al. (2014), se eliminaron roturas abruptas en las cuadrículas de espesor de hielo utilizando un filtro de suavizado de celdas de 3 × 3. Para probar la influencia de los cálculos de pendientes, se evaluó el modelo (Ec. (2)) para cada una de las cuadrículas de pendientes.

Dado que no hay mediciones de velocidad basal para los glaciares del Monte Tronador, se estimaron las velocidades basales como una proporción de las velocidades superficiales ($a = U_b/U_s$). El parámetro a para cada glaciar se obtuvo probando iterativamente el modelo (Ec. (2)) en 10000 corridas,

con un valor entre 0 y 1, y los valores de H seleccionados al azar de la mitad de las mediciones de espesor de hielo disponibles para cada glaciar y cada grilla de pendiente de superficie. El resto de las mediciones de espesores se reservaron para la validación del modelo. Se seleccionó el mejor valor de a para cada glaciar en función de la diferencia más pequeña entre el modelo y las mediciones del espesor del hielo en términos del sesgo y el error cuadrático medio (RMSE) de los residuos (Tabla 3.1). Para los glaciares sin mediciones de espesor de hielo (Parra, Alerce, Castaño Overa, Casa Pangue y Condor), se usaron valores de glaciares con similitudes en tamaño y morfología, así como en espesor de hielo y velocidades superficiales (Ruiz et al., 2015, 2017).

Al terminar en un lago proglacial, el frente del glaciar Manso ha experimentado un aumento reciente en la velocidad superficial probablemente asociado con un mayor deslizamiento basal debido a una mayor presión del agua subglacial (Ruiz et al., 2015). Al igual que Vieli et al. (2000) y Stuefer et al. (2007), para tener en cuenta este efecto en la derivación del parámetro a , se permitió que a aumentara exponencialmente con la elevación decreciente en la lengua inferior del glaciar Manso. En el área de acumulación y la parte superior de la lengua del glaciar, se calculó iterativamente a como para el resto de los glaciares, pero a medida que se acerca al término, a aumenta exponencialmente, alcanzando un valor máximo de 0.997 en el frente de hielo.

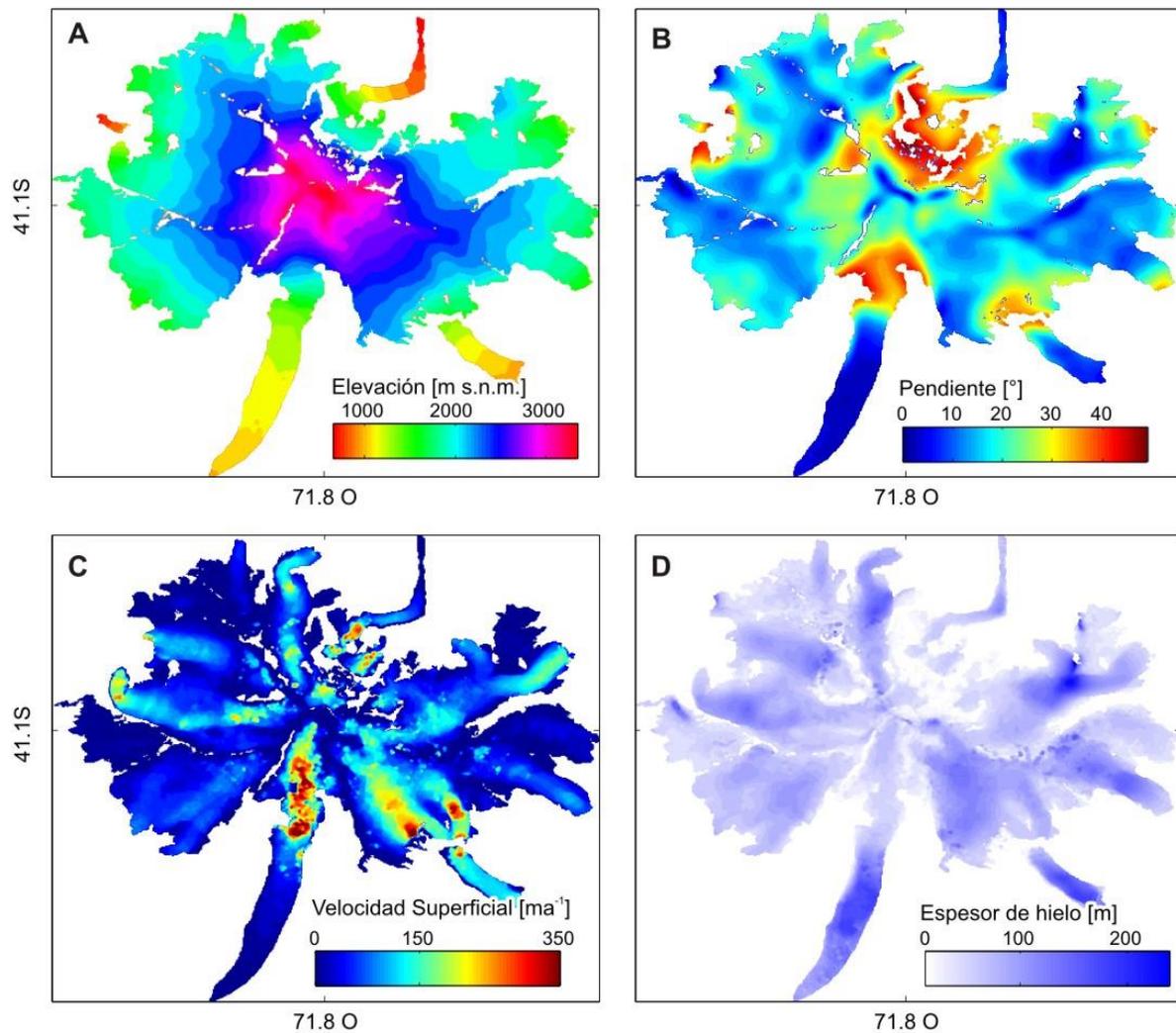


Figura 3.2. Datos de entrada utilizados para el modelo. (a) Elevación de la superficie del hielo desde el PLEI DEM. (b) Pendiente de superficie de un DEM remuestreado utilizando el enfoque SSL a una escala espacial de 18 x. (c) Velocidad superficial para 2012 (Ruiz et al., 2015). (d) Estimación del espesor del hielo para una pendiente superficial remuestreada a una escala espacial de 18 x.

La incertidumbre del modelo de espesor del hielo se cuantificó tomando las derivadas parciales de cada variable en la ecuación (2) (consulte la ecuación complementaria (SM1)). La precisión de los resultados del modelo para cada cuadrícula de pendiente (ver Materiales suplementarios) se evaluó en términos de las diferencias entre el espesor del hielo modelado (después de la calibración del parámetro a) y el 50 % restante ($n = 646$) de las mediciones del espesor del hielo. Se utilizaron estadísticas de sesgo (BIAS), mediana (MED), RMSE, rango intercuartílico (IQR) e intervalo de confianza (IC) para cuantificar la

distribución del error. Tomando como referencia a Farinotti et al. (2017), también se expresó la precisión de los resultados del modelo final seleccionado en relación con la media de las mediciones del espesor del hielo (Tabla 3.2).

3.6 Resultados

3.6.1 Distribución del espesor del hielo

Los mapas de distribución del espesor del hielo derivados de las diferentes cuadrículas SSL ($1 \times a$ a $45 \times$) muestran el mismo patrón general (Fig. 3.3; Fig. Complementaria SM3), con estimaciones de volumen de hielo total medio de 4.6 km^3 , y un rango de 0.35 km^3 (Tabla 3.2; Material suplementario SM4). Las escalas de remuestreo más pequeñas ($1 \times a$ a $15 \times$) muestran un mayor ruido, con hielo glaciar en general más delgado (espesor medio entre 70 y 72 m), pero estimaciones de espesor máximo de hielo más altas ($> 360 \text{ m}$). Por otro lado, las escalas de remuestreo más grandes ($30 \times a$ a $45 \times$) muestran hielo glaciar más suave y grueso (espesor medio entre 75 y 80 m) y un espesor máximo de hielo entre 240 y 264 m. Las corridas de modelos con tamaños de filtro de remuestreo entre $18 \times$ y $25 \times$ también muestran distribuciones de espesor de hielo más suaves, con una media entre 71 y 73 m y un máximo entre 254 y 282 m. Para tamaños de filtro espacial más pequeños ($1 \times a$ a $15 \times$), se encuentran áreas de hielo más grueso ($> 150 \text{ m}$) alrededor de pequeñas áreas cóncavas (puntos de acumulación) en casi todos los glaciares (Figs. 3.3a, b).

Tabla 3.1. Residuos de a con una escala de remuestreo de $18 \times$.

Glaciar	Enfoque SSL				
	a	min a	max a	BIAS	RMSE
Vuriloches	0.66	0.68	0.76	0.001	20.7
Verde	0.86	0.85	0.93	0.004	10.5
Peulla	0.36	0.25	0.70	0.001	27.9
Parra ^a	0.78	0.54	0.85	0.001	27.9
Norte	0.1	0.09	0.6	0.001	33.4
Mistral	0.81	0.54	0.85	0.002	27.9
Manso	0.59	0.12	0.68	0.002	83.4
Cóndor ^b	0.36	0.25	0.70	0.001	40.8
Frías	0.78	0.78	0.84	0.001	19.3
Castaño Overa ^b	0.36	0.25	0.51	0.001	40.8
Casa Pangué ^c	0.59	0.78	0.84	0.002	83.4
Blanco	0.62	0.58	0.80	0.001	20.4
Alerce ^a	0.78	0.54	0.85	0.001	27.9

Los valores mínimo y máximo de a son para todo el conjunto de escalas espaciales. ^a Por características morfológicas similares, se utilizaron los mismos valores de a que los derivados para el glaciar Mistral para los glaciares Parra y Alerce. ^b Debido a características morfológicas similares, se utilizaron los valores de a para el glaciar Peulla para Castaño Overa y Condor. ^c Debido a características morfológicas similares, se utilizaron los valores de a para el glaciar Manso para el glaciar Casa Pangué.

Para tamaños espaciales más grandes ($> 18 \times$), las áreas de hielo más gruesas se encuentran en los glaciares montañosos Norte y Frías, y en las lenguas cubiertas de escombros de los glaciares Verde y Manso (Figuras 3.3c, d). Aunque los resultados son más ruidosos a escalas de remuestreo más pequeñas, el enfoque SSL produce una distribución más suave del espesor del hielo sin la presencia de límites definidos. Las estimaciones de precisión no muestran fuertes variaciones entre las diferentes pendientes calculadas, con BIAS entre -1 y -4 m, RMSE entre 29 y 49 m, e IC entre 98 y 178 m (Tabla 3.2; Figuras suplementarias SM6 y SM7).

3.6.2 Estimaciones de volumen de hielo

Por consiguiente las estimaciones del volumen de hielo total para todos los glaciares del Monte Tronador combinados, así como las obtenidas para cada glaciar individual, son relativamente cerca en todas las escalas de remuestreo (Tabla 3.3). En simulaciones con diferentes tamaños de filtro ($1 \times a 45 \times$),

los volúmenes totales para glaciares individuales varían entre 4 y 27 % de la media de todas las simulaciones combinadas. Es notable que, las mayores diferencias relativas se encuentran en los glaciares más pequeños; Condor (0.5 km²), Parra (2.5 km²) y Alerce (2.5 km²), con diferencias relativas de 27, 26 y 20 %, respectivamente.

3.7 Discusión

En síntesis, se ha demostrado que el modelo de inversión numérica (Ec. (2)), basado en la aproximación de flujo paralelo propuesta por Gantayat et al. (2014) para calcular el espesor del hielo glaciar a partir de la velocidad superficial y la pendiente, funciona de manera similar a otros modelos que requieren más datos de entrada (Farinotti et al., 2017). Por consiguiente, la aproximación de flujo paralelo es válida cuando la deformación del hielo es impulsada únicamente por un esfuerzo cortante simple, es decir, sin esfuerzo cortante de compresión, extensión u otro tipo de esfuerzo cortante en una dirección diferente al plano xz a lo largo de las líneas de flujo. Por lo anteriormente expuesto y debido a la relación exponencial entre la deformación del hielo y el esfuerzo cortante ($n = 3$), el flujo del glaciar es muy sensible a los cambios de pendiente ($U_s \sim H^4 \alpha^3$; (Cuffey & Paterson, 2010)). Los ensayos para probar la sensibilidad del modelo introduciendo al parámetro de pendiente, requirieron la utilización del PLEI DEM suavizado incrementalmente para calcular la pendiente superficial.

3.7.1 Incertidumbre y sensibilidad del modelo

Gantayat et al. (2014) observaron que la incertidumbre del modelo (Ec. (SM1)) depende de la incertidumbre en (1) las estimaciones de velocidad U_b y U_s , (2) el parámetro de reptación A , (3) el factor de forma f , (4) la densidad del hielo ρ y (5) la estimación de la pendiente superficial α .

Tabla 3.2. Volumen glaciar y espesor de hielo de los glaciares Monte Tronador derivado con el enfoque SSL a una escala de remuestreo de 18 ×

Modelos	Área km ²	Volumen km ³	H.Media m	H.Máx. m	RMSE m	RMSE %	BIAS m	IQR m	Mediana m	CI
SSL	61.7	4.8 ± 2	75	300	31	35	- 1.5	- 0.1	31	113
FAR	67.8	4.3 ± 2	55	266	35	39	- 16	- 12	35	109
CAR	65	2.6 ± 3	40	138	50	56	- 38	- 41	44	117

También se muestran los valores de Farinotti et al. (2019) y Carrivick et al. (2016). RMSE, error cuadrático medio en metros; RMSE (%), RMSE relativo a la media de las mediciones del espesor del hielo;

IQR, rango intercuartílico; IC: intervalo de confianza para las desviaciones percentiles de las mediciones del espesor del hielo.

Utilizando la prueba nula sobre áreas inmóviles sin hielo, Ruiz et al. (2015) estiman que la incertidumbre de los datos de velocidad de la superficie del hielo obtenidos en tres períodos separados en marzo-mayo de 2012 varía entre 11 y 22 m a^{-1} . Sin embargo, esta estimación es muy conservadora, ya que incluye terreno boscoso donde los patrones de sombras proyectadas introducen errores de desplazamiento mayores. Al considerar áreas no boscosas, los errores varían entre 5 y 10 m a^{-1} . Se decidió evaluar la incertidumbre del modelo utilizando estos rangos de error más altos y más bajos. La suma de los errores independientes para las tres cuadrículas de desplazamiento separadas da una incertidumbre general para las velocidades superficiales medias anuales de 2012, de 26 o 12 m a^{-1} , ya sea que se tengan en cuenta o no las áreas boscosas.

Al cuantificar la incertidumbre en U_b , se propagó la incertidumbre en a , tomando la desviación estándar máxima para cada glaciar (0.2), y en U_s , y se obtuvo una incertidumbre de 50 o 23 m a^{-1} . Debido a la alta precisión del PLEI DEM (Berthier et al., 2014), se asume que la incertidumbre en la pendiente superficial es pequeña. No obstante, dado que la incertidumbre de la pendiente depende de la topografía local, se considera aceptable que la incertidumbre α se encuentra entre 1° y 3° . Finalmente, siguiendo a Gantayat et al. (2014), se establecen las incertidumbres en A , f y ρ en $8 \times 10^{-25} \text{ Pa}^{-3} \text{ s}^{-1}$, 0.1 y 90 kg m^{-3} , respectivamente.

Tomando como base los valores de incertidumbre máxima y mínima para los diferentes componentes, se estimó que las incertidumbres medias en el espesor del hielo modelado oscilan entre 107 y 57 m. Sin duda, para áreas bajas (donde tanto la pendiente como la velocidad superficial son cercanas a cero), las incertidumbres relativas al espesor del hielo podrían ser mucho más considerables. En consecuencia, la gran variedad de incertidumbres muestra que el modelo es muy sensible a las entradas de velocidad de superficie y pendiente. Por ejemplo, un aumento de 1 m a^{-1} en la incertidumbre de la velocidad superficial representa un aumento del 6 % en la incertidumbre del espesor del hielo. Mientras tanto, un aumento de 0.1° en la incertidumbre de α da como resultado un aumento del 1 % en la incertidumbre del espesor del hielo.

3.7.2 Distribución y precisión del espesor del hielo

Mediante el análisis de los mapas de distribución del espesor del hielo (Fig. 3.3; Fig. Suplementaria SM3), junto con la evaluación estadística de las estimaciones del volumen de hielo (Tabla 3.2 Figs. Suplementarias SM5 y SM6), se evaluaron las compensaciones entre los diferentes tamaños de filtro de suavizado. En general, la precisión de las estimaciones del espesor del hielo es similar para las cuadrículas SSL suavizadas en diferentes escalas espaciales, con un sesgo de -0.9 a -3.5 m, y RMSE de 29 a 47 m, lo que da una precisión relativa para las estimaciones del espesor medio del hielo de 30 - 50 %. Si bien el espesor promedio también es similar entre los tamaños de filtro, como se mencionó anteriormente, los valores de espesor máximo y donde el hielo es más grueso varían considerablemente según la escala de remuestreo. Estas variaciones en la distribución del espesor del hielo reflejan la sensibilidad de los métodos de inversión de la velocidad superficial a las estimaciones de la pendiente superficial. La similitud en las estimaciones de precisión se explica mejor por el hecho de que la mayoría de las mediciones del espesor del hielo se obtuvieron en áreas de pendiente suave, que no cambian considerablemente entre cuadrículas SSL en diferentes escalas espaciales. Dado que las estadísticas de error no muestran diferencias sustanciales en el rendimiento del método, a partir de estas afirmaciones se sugiere que debe manejarse con prudencia al analizar los resultados del modelo basándose únicamente en las estadísticas de error.

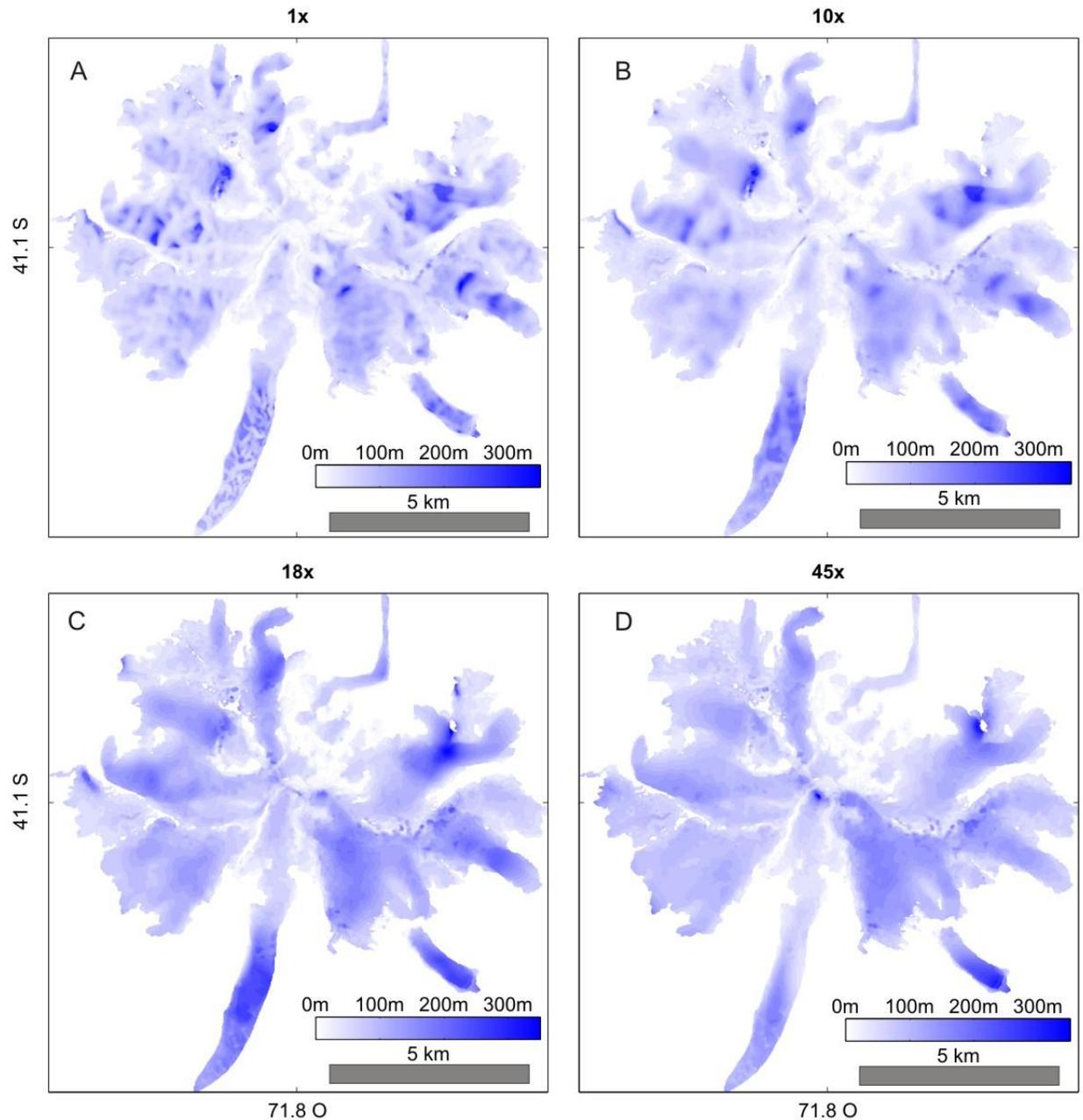


Figura 3.3. Distribuciones de espesor de hielo derivadas de SSL remuestreadas a diferentes escalas espaciales (a) 1 ×: sin remuestreo, (b) 10 ×: escala de remuestreo de 160 m, (c) 18 ×: escala de remuestreo de 290 m (este tamaño espacial se seleccionó como la más adecuada), y (d) 45 ×: escala de remuestreo de 720 m.

Los resultados de este estudio indican que los tamaños de filtro espacial más grandes ($> 15 \times$) se comportan mejor para recuperar una distribución del espesor del hielo más suave y realista. Sin embargo, la escala espacial utilizada para suavizar la pendiente debe evaluarse antes de recuperar los resultados finales. Para tener en cuenta la influencia de los gradientes de esfuerzos longitudinales y cumplir con la

aproximación de flujo paralelo, la pendiente debe suavizarse en una distancia entre una y cuatro veces el espesor del hielo (Kamb & Echelmeyer, 1986) o, como sugirieron Cuffey & Paterson (2010), más de tres o cuatro veces. Esta regla de oro podría usarse para buscar la distancia más apropiada sobre la cual volver a muestrear la pendiente (Gantayat et al., 2014). En el caso de los glaciares Monte Tronador, considerando una distancia de cuatro veces el espesor medio del hielo derivado de las simulaciones realizadas (73 m), o el espesor medio calculado a partir de las mediciones de GPR (90 m), se sugiere que un tamaño de filtro espacial entre 240 y 360 m (15 × a 22 ×) serían suficientes para evitar el efecto de los gradientes de esfuerzos longitudinales. El filtro de suavizado de 290 m (18 ×) equivale a cuatro veces el espesor medio del hielo y produce una distribución de espesor sin ruido con el mismo patrón que los tamaños de filtro más grandes. Dado que la precisión no varía considerablemente entre simulaciones a diferentes escalas, se sugiere que el SSL en la escala de 18 × es representativo de la distribución del espesor del hielo en el Monte Tronador. El método SSL, u otros enfoques de suavizado que conservan la topografía local, parecen proporcionar una solución sencilla para calcular las pendientes de los glaciares para métodos de inversión que requieren la velocidad de la superficie como datos de entrada. En 2000, Rivera et al. (2001) realizaron la primera medición de espesor de hielo GPR en Monte Tronador, en la lengua inferior cubierta de escombros del glaciar Casa Pangué (Fig. 3.1), y midieron un espesor de hielo de 170 ± 10 m. Casa Pangué ha experimentado una considerable pérdida de masa entre 2000 y 2012, más de 80 m en 12 años (Ruiz et al., 2017). Restando el espesor del hielo medido por Rivera et al. (2001) de la elevación de la superficie del hielo del 2000 SRTM (SRTM banda-X; (Ruiz et al., 2017) coloca la elevación del lecho rocoso en esta ubicación en 690 ± 20 m (por suma cuadrática de los errores de medición SRTM y GPR).

Tabla 3.3. Volumen del glaciar y espesor máximo del hielo modelados para glaciares individuales

Glaciar	Área (km ²)	Volumen de aproximación SSL (km ³)			
		18×	Medio	Max	Min
Vuriloches	6.5	0.48	0.48	0.5	0.46
Verde	6.9	0.59	0.53	0.59	0.44
Peulla	2	0.12	0.12	0.12	0.11
Parra	2.5	0.14	0.15	0.19	0.12
Norte	3.1	0.27	0.26	0.28	0.23
Mistral	1.4	0.07	0.07	0.08	0.06
Manso	9.3	0.83	0.86	1.02	0.79
Condor	0.5	0.02	0.02	0.03	0.02
Frías	6.9	0.53	0.51	0.54	0.48
Castaño Overa	3.2	0.33	0.32	0.34	0.28
Casa Pangué	6.3	0.37	0.31	0.34	0.28
Blanco	10.9	0.8	0.8	0.81	0.73
Alerce	2.4	0.13	0.15	0.18	0.12

En comparación, la elevación del lecho rocoso calculada a partir del espesor del hielo de la aproximación SSL (con el filtro de suavizado de 18 ×) y el DEM PLEI 2012 es 703 ± 31 m. Aunque se basa en una sola medición, este análisis simple muestra que el modelo se desempeñó dentro de la precisión estimada incluso para un área no calibrada mediante mediciones.

3.7.3 Comparación con reconstrucciones existentes

La reciente disponibilidad de inventarios de glaciares y los avances en los métodos de inversión han dado lugar a una gran cantidad de estudios que mapean la distribución del espesor del hielo de los glaciares en diferentes regiones montañosas de todo el mundo (Farinotti et al., 2009, 2019; Huss & Farinotti, 2012), que incluyen los Andes del sur (Carrivick et al., 2016; Millan et al., 2019). Entre estos estudios, Carrivick et al. (2016) y Farinotti et al. (2019) informaron la distribución del espesor del hielo en Monte Tronador con suficiente detalle para permitir la comparación con los resultados de esta tesis (Figs 3.4a, b).

Utilizando un enfoque de plasticidad perfecta, Carrivick et al. (2016) modelaron el espesor del hielo de los glaciares Monte Tronador (denominados glaciares del Parque Nacional Vicente Pérez Rosales),

y reportaron un espesor medio de 40 m, un espesor máximo de 143 m, y un volumen total de hielo de 2.6 km³, que corresponde a casi la mitad del volumen según las mejores estimaciones realizadas en esta tesis (SSL 18 × 4.8 ± 2 km³). Farinotti et al. (2019) analizaron los resultados de tres métodos de inversión diferentes (Frey et al., 2014; Huss & Farinotti, 2012; Maussion et al., 2019) para recuperar la distribución del espesor del hielo de los glaciares incluidos en el Randolph Glacier Inventory (RGI 6.0) (RGI Consortium, 2017) y utilizó la base de datos de espesor de glaciares (GlaThida) 2.0 (GlaThiDa Consortium, 2019) como fuente de mediciones de espesor de hielo para calibrar y validar los resultados del modelo. Si bien es posible analizar los resultados de los diferentes modelos de forma independiente, se hace referencia al resultado compuesto de consenso, una media ponderada de los diferentes modelos utilizados para estimar el volumen global de glaciares. Para los glaciares del Monte Tronador, Farinotti et al. (2019) informaron una solución compuesta con un espesor de hielo medio de 55 m, un espesor máximo de 266 m y un volumen de hielo total de 4.3 km³, que está más cerca de las mejores estimaciones.

El análisis estadístico de las diferencias en el espesor del hielo entre los resultados de esta investigación de SSL y los de Carrivick et al. (2016) revela un mayor sesgo negativo y casi el doble del error en el último estudio (- 38 m sesgo y 50 m RMSE). La distribución del espesor del hielo de Farinotti et al. (2019) muestra una mejor concordancia con los resultados propuestos en este estudio (RMSE de 31 m), sin embargo, todavía presenta un sesgo negativo considerable (- 16 m). Ninguno de los estudios utilizó mediciones del espesor del hielo para la calibración del modelo, lo que podría explicar las diferencias entre sus resultados y los presentados en este estudio. Sin embargo, un análisis detallado de sus mapas de distribución del espesor del hielo revela otras fuentes de discrepancia que merece mencionarse (Fig. 3.4).

Primero, la representación de los glaciares (por ejemplo, el inventario de glaciares utilizado como datos de entrada) parece ser una fuente importante de discrepancias. Carrivick et al. (2016) utilizaron el inventario de Davies & Glasser (2012), que mapearon los glaciares en el Monte Tronador como una sola masa de hielo contigua. Aunque su inventario no incluyó las lenguas cubiertas de escombros de menor elevación de los glaciares Manso, Verde y Casa Pangué, informaron un área cubierta de hielo un poco más grande (65 km²) que la nuestra (Fig. 3.4a). En base a estos datos, Carrivick et al. (2016) sugirieron que todos los glaciares en Monte Tronador, y sus correspondientes volúmenes de hielo, estaban por encima de 1500 m s.n.m., mientras que los resultados de esta investigación, consistentes con Farinotti et al. (2019), muestran que 12 - 14 % del volumen de hielo se encuentra debajo de esta elevación. La distribución del espesor del hielo con la elevación tiene implicaciones importantes para las proyecciones futuras de cambios en el volumen del hielo.

Farinotti et al. (2019) utilizaron el RGI 6.0 (RGI Consortium, 2017), que muestra una mejor concordancia con los contornos de los glaciares utilizados en este estudio (Ruiz et al., 2017) (Figuras 3.4b, c). Aunque no se reporta información sobre la fecha de la imagen base utilizada para mapear los contornos del glaciar, la extensión de las lenguas Manso y Casa Pangue sugiere una fecha anterior a 2012. Además de las diferencias en la extensión del hielo de las lenguas glaciares cubiertas de escombros, identificamos otros factores que afectan los mapas de distribución del espesor del hielo. Dado que el RGI 6.0 no incluye afloramientos internos, Farinotti et al. (2019) modelaron espesores de hielo de hasta 70 m en áreas sin cobertura de hielo actual. Los métodos automáticos para dividir áreas cubiertas de hielo en glaciares individuales descritos en Kienholz et al. (2013), e implementados en el RGI 6.0 (RGI Consortium, 2017), generan un mayor número de glaciares (24 vs 14) con sus respectivas divisiones de hielo. Dado que los modelos utilizados por Farinotti et al. (2019) utilizan contornos de glaciares y divisiones de hielo como una indicación de espesor cero del hielo, estas divisiones artificiales se ubican en sectores de hielo de hasta 130 m de espesor (Figuras 3.4d, e). La mayor extensión general de los glaciares y la inclusión de afloramientos internos como áreas cubiertas de hielo parecen compensar la subestimación del espesor del hielo por el modelo de consenso. Sin embargo, los glaciares más delgados y pequeños sugeridos por Farinotti et al. (2019) tendrán implicaciones para estimar el impacto a futuro de los cambios climáticos en estos glaciares. Millan et al. (2019) han registrado inconsistencias similares entre el modelo de consenso de Farinotti et al. (2019) y las observaciones del espesor del hielo a lo largo de los Campos de Hielo Patagónicos Norte y Sur.

3.7.4 Escala de volumen-área para los glaciares Monte Tronador

Una de las técnicas más utilizadas para recuperar el volumen de los glaciares es el llamado método de escala de V-A (Bahr et al., 1997). Este método empírico debe calibrarse con datos de volumen glaciar conocidos ((Bahr et al., 2015), sin embargo, la mayoría de las veces se ha utilizado sin suficientes datos de calibración (Grinsted, 2013; Radić & Hock, 2010). Para probar la aplicabilidad del método de escala de volumen-área en el área de estudio, se realizaron dos ejercicios simples.

Primero, se usaron los coeficientes k (0.027) y γ (1.36) propuestos inicialmente por Bahr et al. (1997) para la ley de potencia área-volumen basada en datos de 144 glaciares. En segunda instancia, se derivaron estos coeficientes empíricamente de la relación entre el área y el volumen en base a los resultados utilizando el enfoque SSL en la escala de $18 \times$ (Cuadro 3). Al trazar el área y el volumen de los glaciares en este estudio revela valores para los parámetros k y γ de 0.0567 y 1.16, respectivamente.

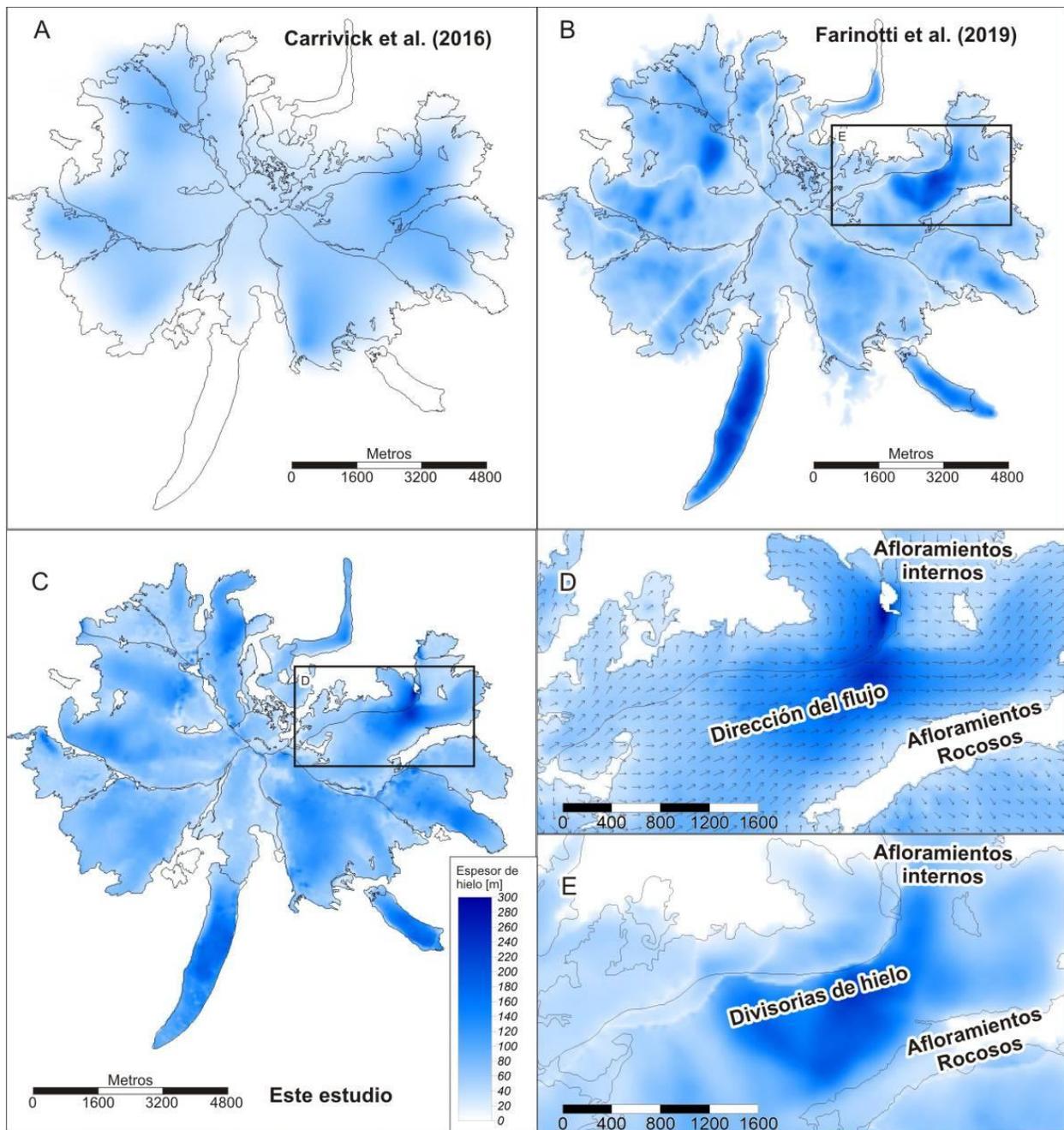


Figura 3.4. Comparación de la distribución del espesor del hielo para los glaciares del Monte Tronador en relación con los contornos de los glaciares estudiados por Ruiz et al. (2017). Distribución del espesor del hielo siguiendo (A) Carrivick et al. (2016), (B) Farinotti et al. (2019) y (C) utilizando el enfoque SSL. (D) y (E) Primer plano de la división de hielo entre los glaciares Frías y Casa Pangue, con el espesor del hielo derivado con (D) el enfoque SSL, y (E) el modelo de consenso de distribución del espesor del hielo de Farinotti et al. (2019). Nótese la ausencia de afloramientos rocosos y afloramientos internos en (E), así como el desfase entre las divisiones de hielo en los contornos del glaciar versus el mapa de espesor.

En consecuencia aplicando este método, el volumen total de hielo en Monte Tronador se subestima en un 31 % (3.25 km^3) en relación con los resultados obtenidos en este estudio (Figura 3.5).

3.8 Conclusiones

Siguiendo la metodología de Gantayat et al. (2014), se aplicó la ley de flujo paralelo de la dinámica del hielo para estimar la distribución del espesor del hielo para los glaciares Monte Tronador, utilizando mapas de pendiente superficial y velocidad superficial del hielo con una resolución espacial de 16 m. Para probar la sensibilidad del modelo de inversión a la pendiente superficial, se analizaron diferentes tamaños de filtros de suavizado. Si bien se concluyó que la precisión de los mapas de espesor del hielo derivados utilizando diferentes escalas de suavizado fue similar (BIAS ~ 0 y RMSE ~ 31 m), es necesario resaltar que la distribución espacial del espesor del hielo muestra una mayor variabilidad según el tamaño del filtro. La distribución espacial del espesor del hielo se mejora en gran medida mediante el enfoque SSL, en particular utilizando filtros de suavizado con tamaños similares al rango de distancia teórico sugerido para tener en cuenta el efecto de los gradientes de tensión longitudinales.

Los mejores resultados de esta investigación sugieren un volumen total de hielo para los glaciares Monte Tronador de $4.8 \pm 2 \text{ km}^3$, con espesores de hielo promedio y máximo de 75 y 300 m, respectivamente. Una comparación con las distribuciones de espesor de hielo publicadas recientemente para estos glaciares (Carrivick et al., 2016; Farinotti et al., 2019) muestra que, incluso sin considerar los diferentes enfoques de modelado, la precisión de los inventarios de glaciares tiene un gran impacto en la distribución de espesor de hielo. Esto tiene considerables implicancias para los estudios de modelización del flujo de hielo, las estimaciones del volumen total de los glaciares y la cuantificación futura de los recursos hídricos en las regiones montañosas.

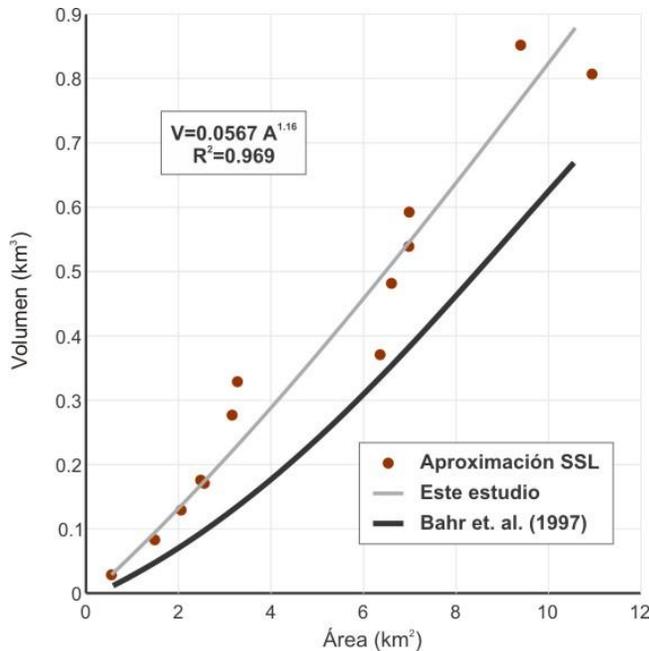


Figura 3.5. Relación volumen-área de los glaciares Monte Tronador (puntos rojos). El coeficiente de determinación (R^2) y la ecuación están basados en datos del presente estudio.

El uso de filtros espaciales de paso bajo para suavizar la topografía de los glaciares y los datos de velocidad superficial podría mejorar significativamente los modelos de inversión, permitiendo una mejor detección de los límites de los glaciares y reconstrucciones más precisas de la distribución del espesor del hielo.

Se ensayó un enfoque de relación volumen-área para estimar el volumen total de hielo. Cuyos resultados mostraron que, utilizando los coeficientes establecidos empíricamente propuestos por Bahr et al. (1997), el volumen total podría estar subestimado en al menos un 31 %. Por este motivo, se sugiere precaución al utilizar enfoques sencillos y no calibrados para recuperar el volumen del glaciar en áreas sin mediciones del espesor del hielo.

De las evidencias anteriores, se concluye que el enfoque SSL proporciona una mejora significativa en la alimentación de los modelos de inversión numérica cuando se trata de recuperar la distribución del espesor del hielo a partir de las mediciones de superficie o de las características de los glaciares. Para cuantificar mejor el almacenamiento de agua en los glaciares y estimar los impactos del cambio climático en los Andes, es necesario utilizar diferentes enfoques de modelización y un mayor número de mediciones del espesor del hielo para su calibración y validación.

3.9 Material suplementario.

Influencias de la estimación de pendientes en los modelos de inversión del espesor del hielo: caso de estudio sobre los glaciares del Monte Tronador, en la zona norte de los Andes.

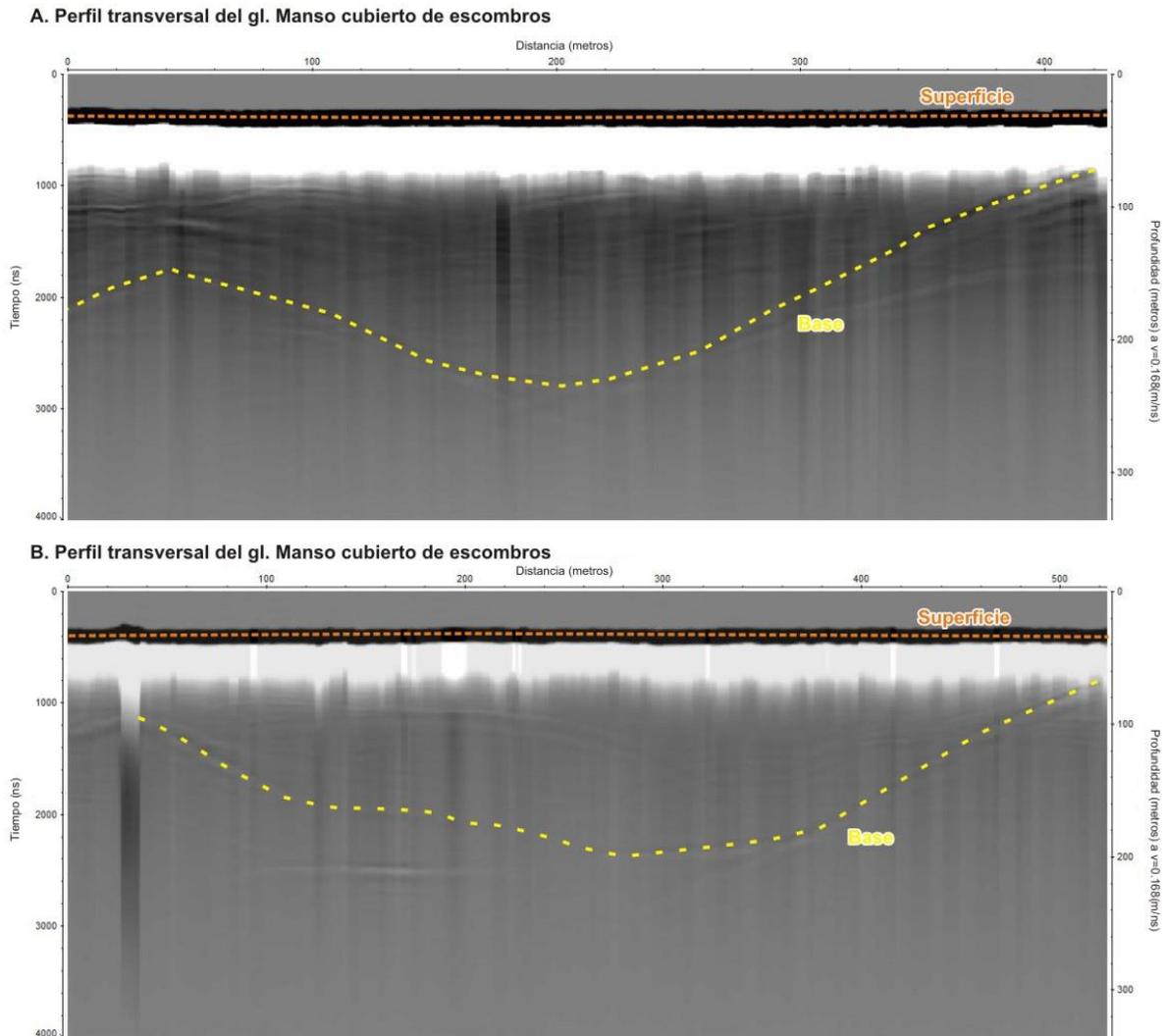


Figura SM1. Ejemplo de dos perfiles transversales de GPR de la lengua cubierta de escombros en el glaciar Manso. Véase la figura 3.1 para la ubicación de los perfiles.

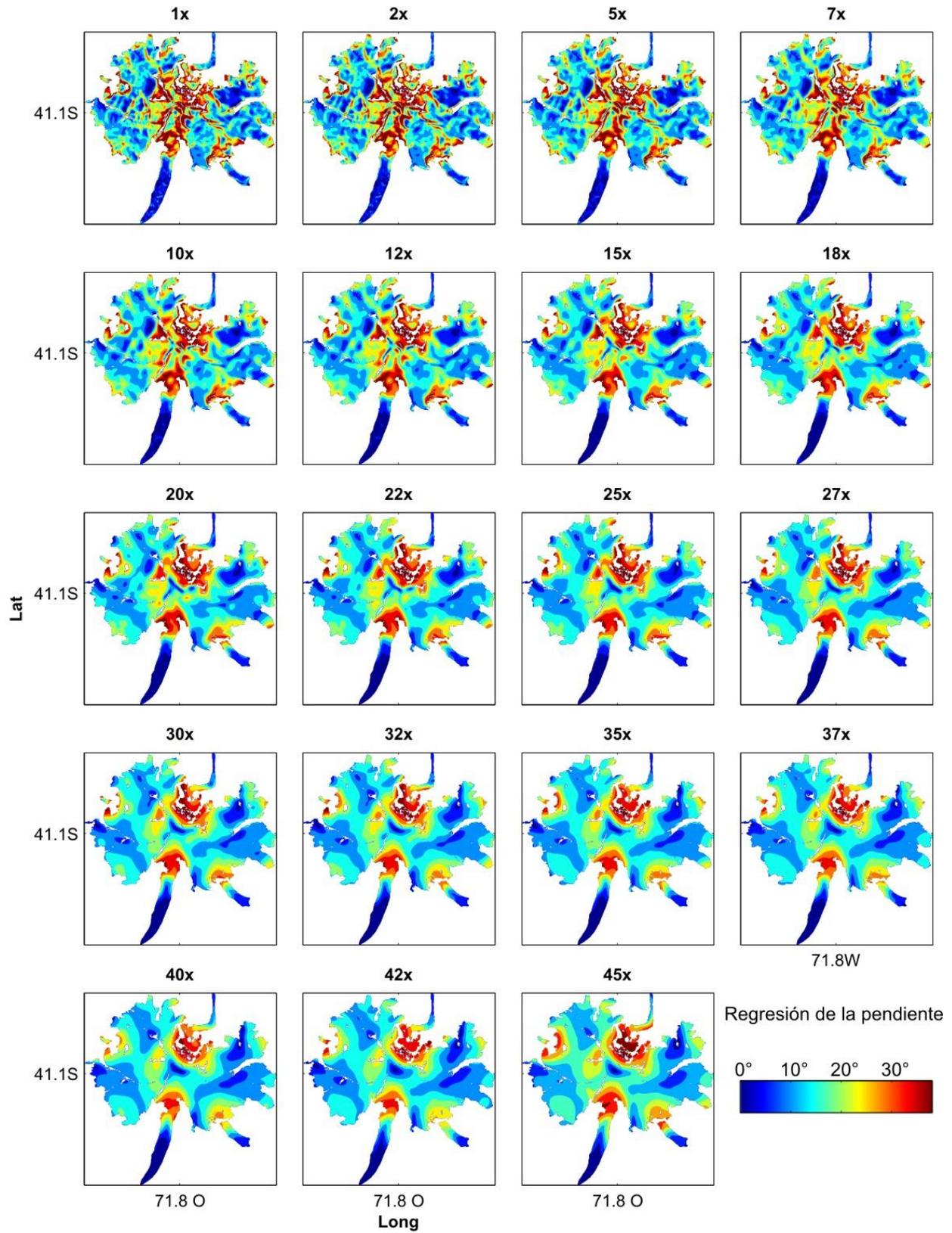


Figura SM 2. Mapas de pendiente superficial remuestreados a diferentes escalas espaciales.

Análisis de incertidumbre

Ecuación SM 1:

$$\frac{\sigma H}{H} = 0.25 \left[\frac{\sigma U_s}{U_s} + \frac{\sigma U_b}{U_b} + \frac{\sigma A}{A} + 3 \frac{\sigma f}{f} + 3 \frac{\sigma \rho}{\rho} + 3 \frac{\sigma \sin \alpha}{\sin \alpha} \right],$$

donde σH es la incertidumbre en el modelo del espesor de hielo (H), σU_s es la incertidumbre de la velocidad superficial (U_s), σU_b es la incertidumbre de la velocidad basal (U_b), σA es la incertidumbre del parámetro de reptación (A), σf es la incertidumbre del factor de forma (f), $\sigma \rho$ es la incertidumbre debida a la densidad del hielo (ρ), y $\sigma \sin \alpha$ es la incertidumbre en el seno de la pendiente superficial ($\sin \alpha$).

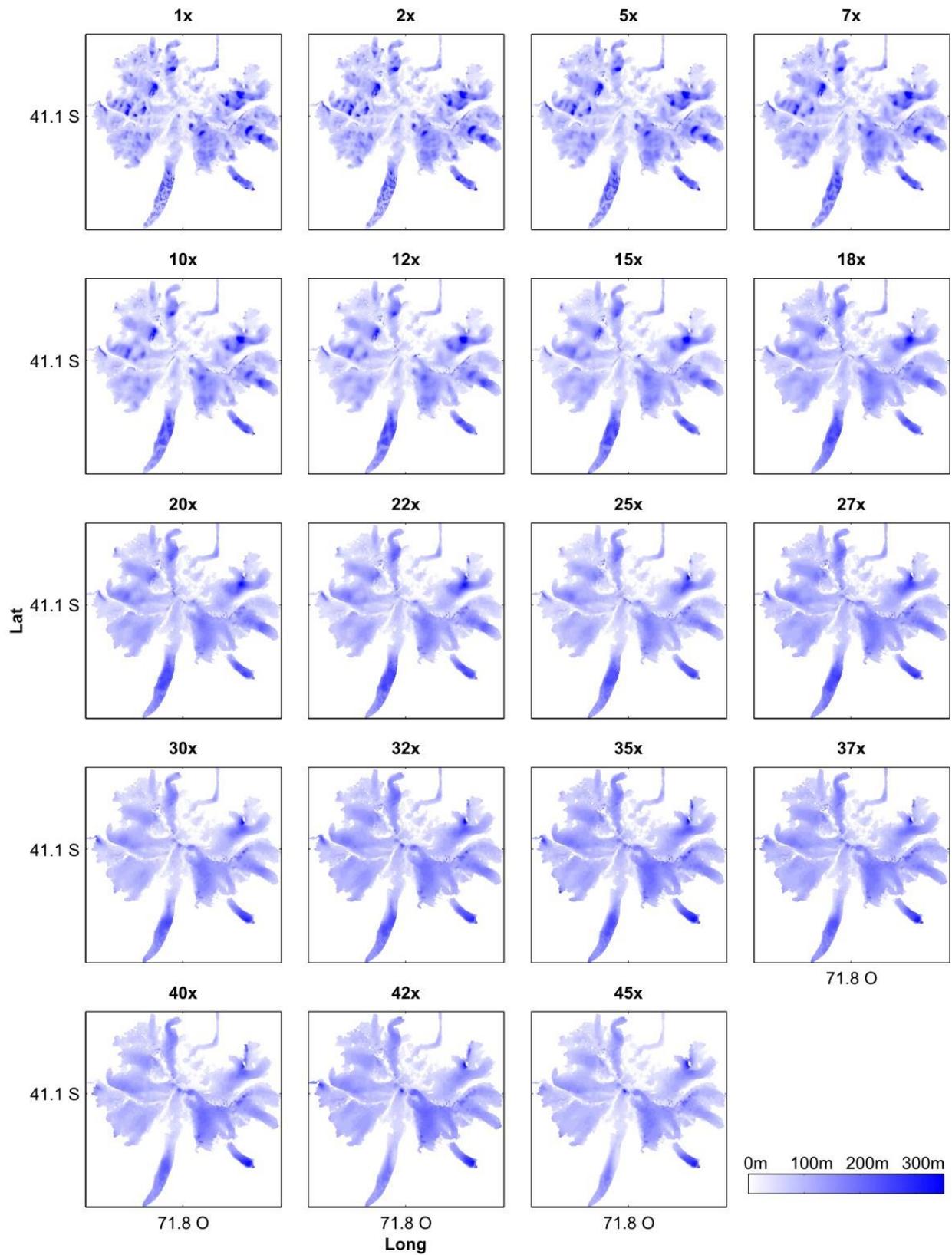


Figura SM 3. Mapas de distribución del espesor de hielo para todas las escalas del filtro SSL.

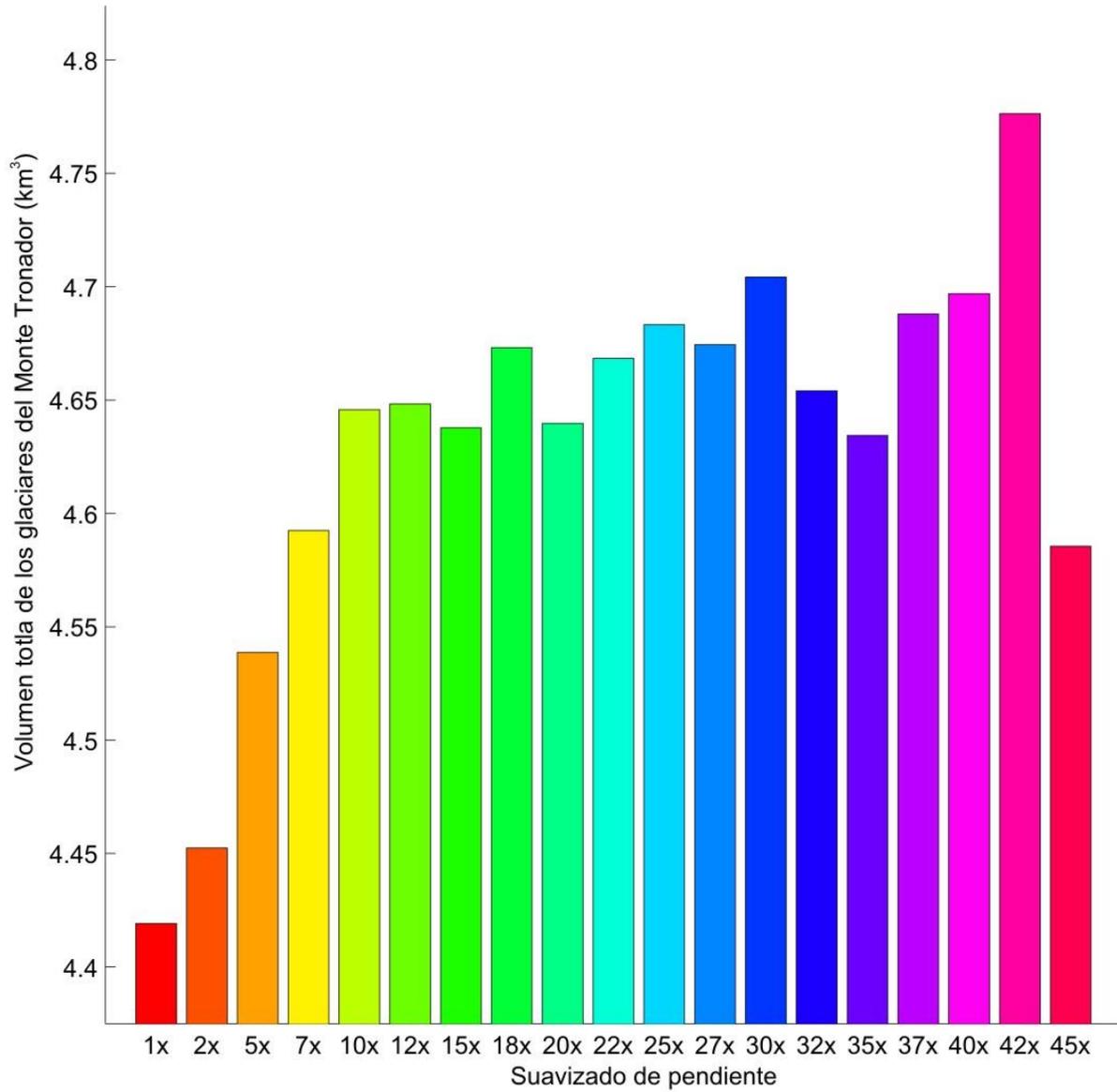


Figura SM4. Estimaciones del volumen total de hielo para todas las escalas del filtro SSL.

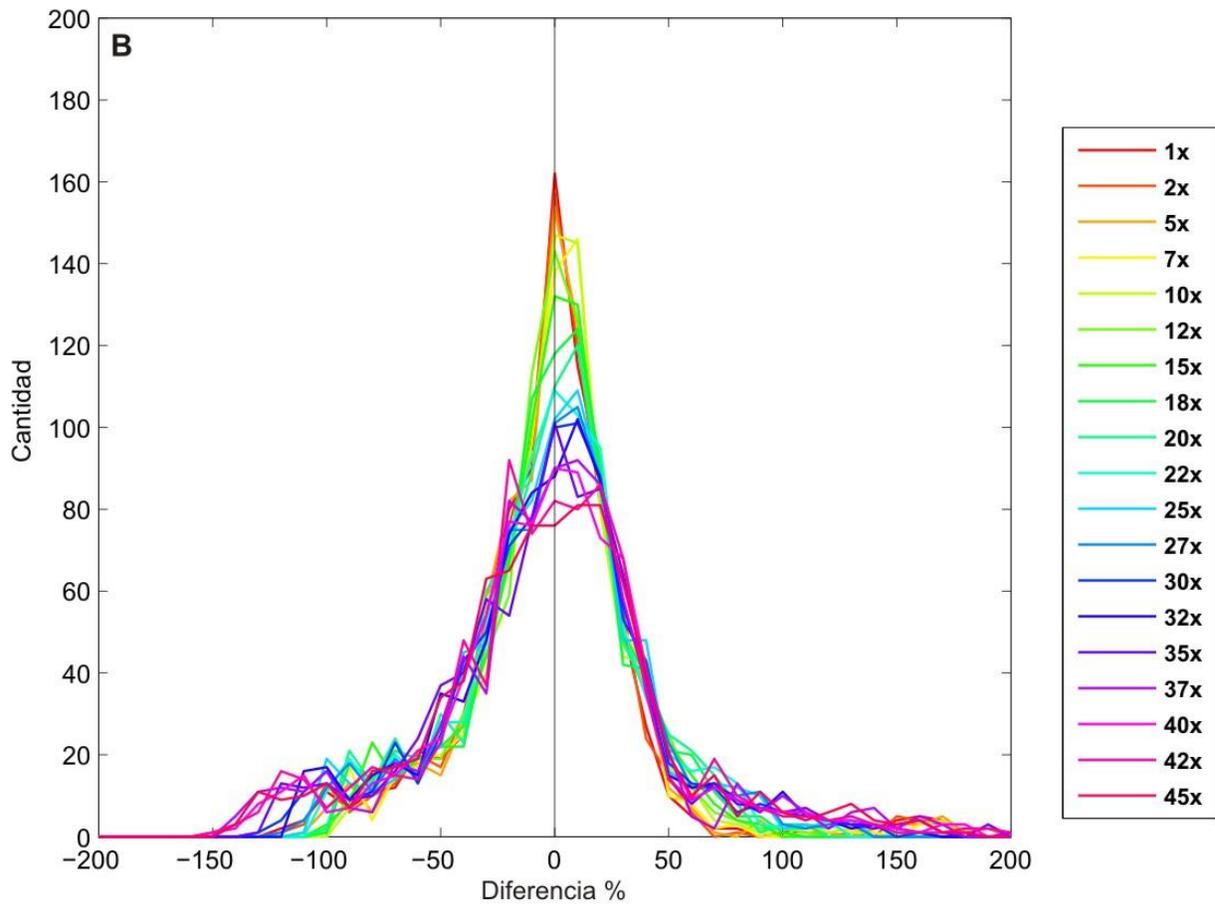
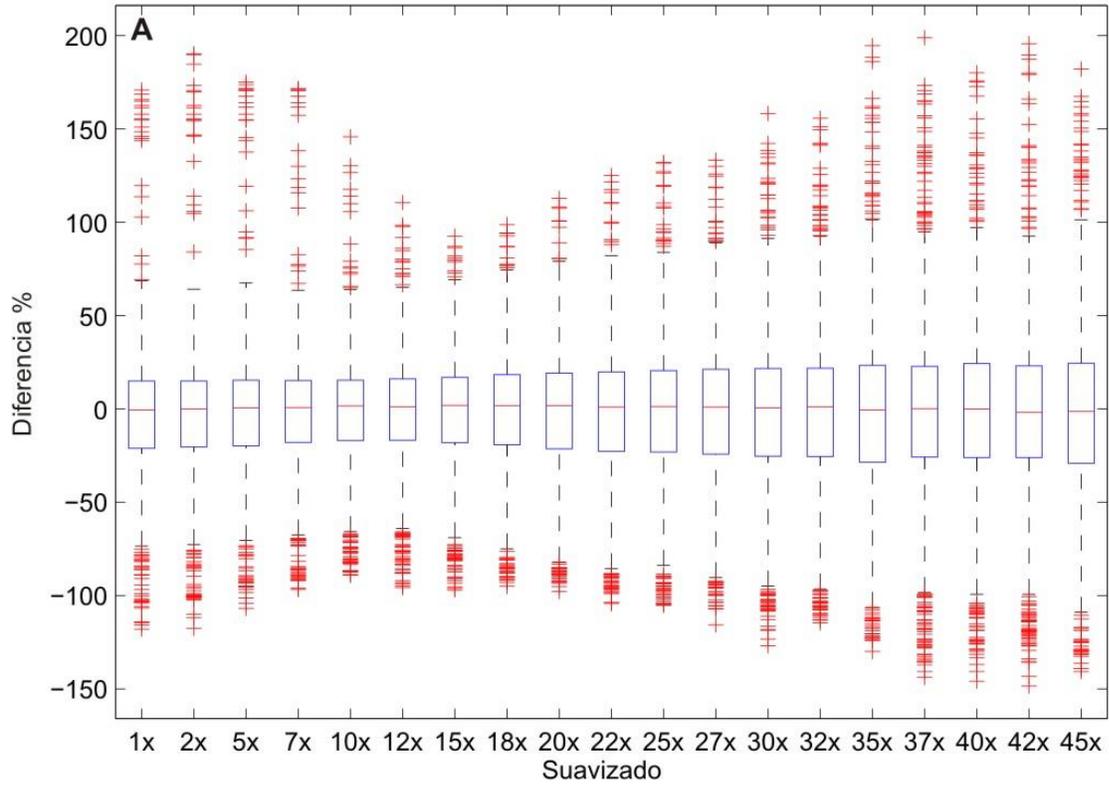


Figura SM5. Diferencia entre el espesor del hielo modelado a diferentes escalas espaciales SSL, en relación con la media de las mediciones del espesor del hielo. A) En cada caja, la marca roja central es la mediana, los bordes de la caja son los percentiles 25th y 75th, y los whiskers son los percentiles 5th y 95th. B) Histogramas de diferencias para cada una de las escalas del filtro espacial SSL.

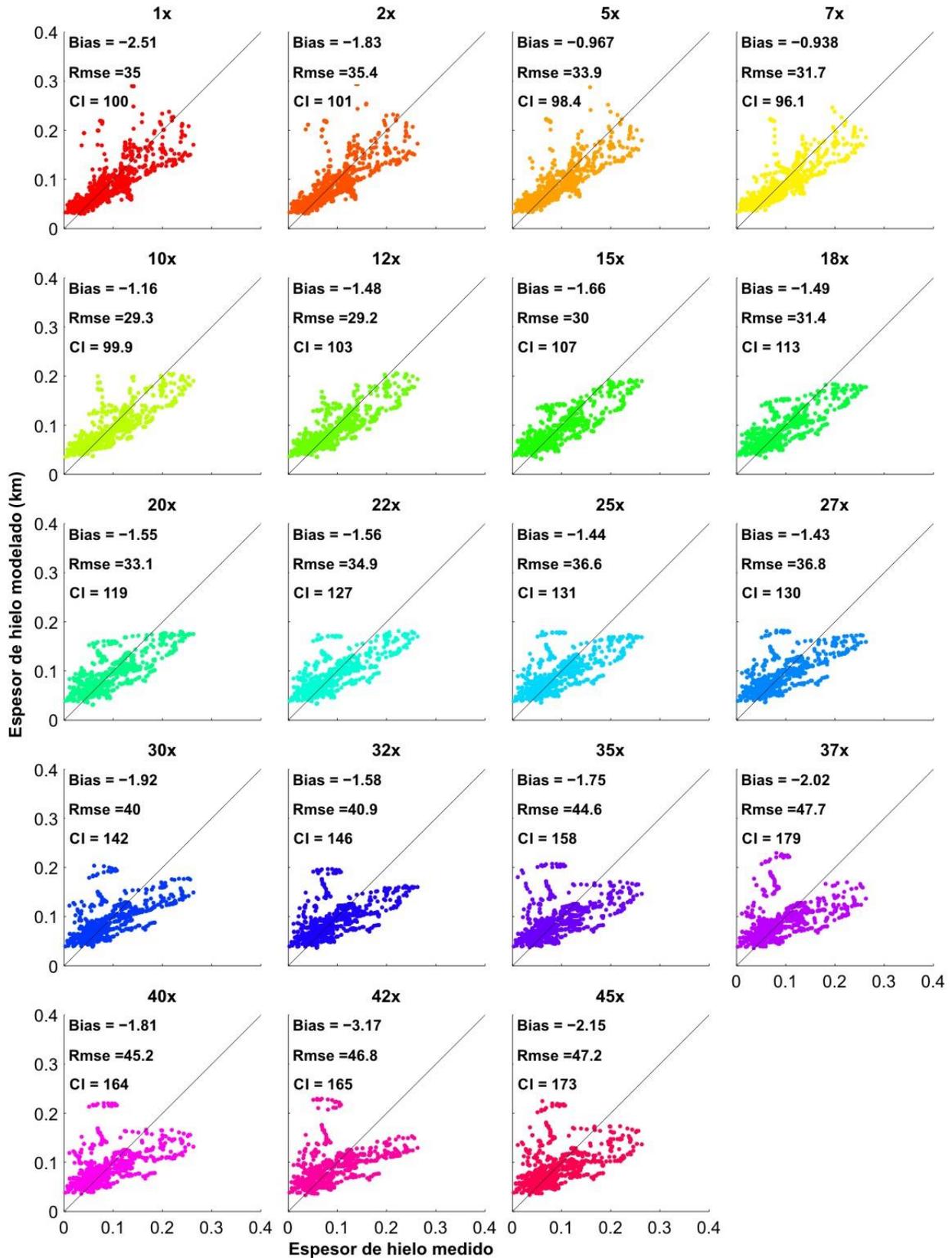


Figura SM6. Estimaciones de precisión para el espesor del hielo derivadas de las diferentes escalas del filtro SSL.

Capítulo 4

4 Volumen de los cuerpos de hielo de los Andes argentinos



Vista del glaciar Perito Moreno (59.29° S y 73.03° O) ubicado en la región de los Andes de Patagonia Sur.
Fotografía: Valentina Zorzut.

4.1 Resumen

El volumen de los glaciares es clave para cuantificar su importancia como reservas de agua y su posible contribución al aumento del nivel del mar. En esta tesis, se calculó el volumen de los 16078 cuerpos de hielo (5769 km^2) identificados por el Inventario Nacional de Glaciares en los Andes de Argentina utilizando diferentes relaciones escalares entre volumen y extensión. Primero, todos los glaciares con estimaciones de volúmenes en los Andes de Argentina y Chile fueron considerados como una única población. Segundo, atentos a las diferencias latitudinales en la distribución de glaciares, las mismas masas de hielo fueron divididas por región. En tercer lugar, las masas de hielo fueron separadas por región y por su clasificación morfológica. Finalmente, para los glaciares de escombros se utilizaron diferentes proporciones de hielo entre los activos e inactivos.

La mejor estimación del volumen de hielo para los Andes Argentinos es de $765 \pm 230 \text{ km}^3$ de hielo. Los glaciares de descarga representan el 0.07 % del total de los cuerpos de hielo, el 19 % del área, y el 71 % ($539 \pm 162 \text{ km}^3$) del volumen total. Los glaciares de valle representan el 2.5 % del total de los cuerpos de hielo, el 31 % del área y un 20 % ($154 \pm 46 \text{ km}^3$) del volumen total; y con un 8 % a los glaciares de montaña ($60 \pm 18 \text{ km}^3$) representan el 13.5 % del total de los cuerpos de hielo y el 21.5 % del área. Por su parte los manchones de nieve que representa 36 % del total de cuerpos de hielo y 4 % de la superficie total, representan tan solo el 1 % ($5 \pm 2 \text{ km}^3$) del volumen total. Finalmente, los glaciares de escombros que representan el 48 % del total de los cuerpos de hielo y 10 % de la superficie total, tan solo representan 1 % ($7 \pm 2 \text{ km}^3$) del volumen total.

Estimaciones previas del volumen de hielo para los Andes del Sur utilizando relaciones de escalamiento volumen-área tienen diferencias asociadas de hasta el 20 % en el volumen total. Al no existir grandes diferencias en el cálculo del volumen total no presentarán un impacto sustancial en la contribución potencial al aumento del nivel del mundo, pero sí tendrán un efecto significativo en el cálculo de los recursos hídricos futuros, especialmente en aquellas regiones en que los glaciares de escombros, manchones de nieve y los glaciares pequeños sean los más numerosos, ya que es en esas regiones donde se encuentran las mayores diferencias alcanzando valores de hasta el 53 % con respecto a la estimación propuesta en esta tesis.

4.2 Introducción

Argentina es uno de los pocos países del mundo que cuenta con varios miles de kilómetros cuadrados de glaciares y permafrost de montaña rico en hielo en su territorio. Según el Inventario Nacional de Glaciares, los Andes argentinos contienen 16078 masas de hielo que cubren una superficie de 5769 km² los que están ubicados entre los 200 y los 6900 m s.n.m. (Zalazar et al., 2020). Los cuerpos de hielo (glaciares, manchones de nieve y glaciares de escombros) constituyen componentes cruciales del sistema hidrológico de montaña y son reconocidos como “reservas estratégicas” de agua para las zonas bajas adyacentes y gran parte de la diagonal árida del país (Zalazar et al., 2017). Conocer cuánta agua está almacenada en las masas de hielo de los Andes argentinos es crucial para determinar los impactos de la reducción de los cuerpos de hielo sobre los recursos hídricos terrestres.

Aunque a partir de mediciones directas e indirectas, solo se conoce el volumen de menos del 1 % de los glaciares del mundo (GlaThiDa Consortium, 2019), hoy en día existen estimaciones del volumen de hielo para todos los glaciares del mundo (e.g. Farinotti et al., 2019; Grinsted, 2013; Radić et al., 2013). Sin embargo, no todas las estimaciones fueron calibradas o validadas con datos de los Andes argentinos y ninguna de ellas toma en cuenta las particularidades de los diferentes cuerpos de hielo a lo largo del país.

Existen diferentes métodos para obtener el volumen de hielo de un glaciar. El más directo es realizar un mapa de espesor de hielo a partir de mediciones directas (perforaciones) o indirectas (radar de penetración terrestre, sísmica, gravimetría, etc.). Actualmente la técnica más utilizada es el radio eco sondaje (RES) también conocida como georadar, ya que su eficacia ha sido comprobada en diferentes tipos de glaciares a lo largo del mundo (Macheret & Zhuravlev, 1982; Singh et al., 2012) y en los Andes (Oberreuter et al., 2014; Rivera et al., 2001). Este método, dependiendo de la cantidad de mediciones puede ser muy preciso por ejemplo al 10 % del espesor total (Oberreuter et al., 2014), aunque es altamente laborioso e impracticable para un gran número de glaciares. Por lo tanto, se han desarrollado diferentes métodos numéricos para estimar el volumen de gran cantidad de glaciares, los cuales van desde métodos empíricos, hasta modelos numéricos en tres dimensiones del flujo de glaciar (Farinotti et al., 2009; Linsbauer et al., 2012; Radić & Hock, 2006). La elección de los diferentes métodos depende de la cantidad de glaciares, calidad de información de entrada y del objetivo del trabajo.

El método empírico de escalamiento volumen-área (V-A), debido a su sencillez y la escasa cantidad de información que requiere, ha sido ampliamente utilizado para estimar el volumen actual y futuro de

los glaciares (Bahr et al., 2015; Farinotti et al., 2009; Grinsted, 2013; Radić & Hock, 2010). Si bien debe calibrarse con valores conocidos del volumen de los glaciares, la mayoría de las veces, se ha utilizado con pocos datos de calibración (Grinsted, 2013; Radić & Hock, 2010).

El objetivo del presente trabajo es calcular el volumen de todos los cuerpos de hielo existentes en los Andes de Argentina según el Inventario Nacional de Glaciares (Zalazar et al., 2020), a través de la aplicación del método de escalamiento V-A, atendiendo a las particularidades de las diferentes regiones de los Andes y los diferentes tipos de masas de hielo que existen. Este trabajo, permitirá mejorar nuestro conocimiento de las reservas estratégicas de agua de la Argentina.

4.3 Área de estudio

Los Andes del Sur es una de las cadenas montañosas más altas del mundo con picos de más de 6500 m s.n.m. (metros sobre el nivel del mar), en Argentina los Andes se extienden por unos 4000 km (22 – 55°S). A los fines de este trabajo, y siguiendo las regiones glacio-climatológicas de Lliboutry et al. (1998) adaptadas por el Inventario Nacional de Glaciares (Zalazar et al., 2020), los Andes argentinos pueden dividirse en cinco regiones (Tabla 4.1).

Los Andes Desérticos (17.5 – 31°S) incluyen todas las cuencas del noroeste argentino hasta la cuenca del río Jáchal en la provincia de San Juan. En esta región, las condiciones de aridez (< 500 mm/año) (Fuenzalida et al., 2005; Viale et al., 2019) limitan la formación de nieve y hielo a los picos más altos. La altura mínima promedio en la que encuentran los cuerpos de hielo de esta región sobre los 5000 m s.n.m. Esta región se caracteriza por tener cuerpos de hielo pequeños, con una superficie media de 0.1 km². Una notable excepción es un campo de hielo de unos 18 km² de superficie que se ubica entre las cinco cumbres principales del Monte Pissis (6882 m s.n.m) (Zalazar et al., 2020).

Los Andes Centrales (31 – 35°S) se extienden desde la cuenca del río San Juan en la provincia homónima, hasta la cuenca del río Colorado en el norte de la provincia del Neuquén. La mayor parte de las precipitaciones en este sector de los Andes ocurre durante el invierno aumentando hacia el sur desde 500 mm a los 31°S hasta 1000 mm a los 35°S (Viale & Nuñez, 2011). Esta región es la porción más elevada de la cordillera de los Andes y alberga varios cerros de más de 6000 m s.n.m. entre los que se destaca el cerro Aconcagua con 6961 m s.n.m. Esta combinación de particularidades climáticas y geográficas hace que la región de los Andes Centrales tenga una gran diversidad de cuerpos de hielo, desde glaciares de gran tamaño como el glaciar Tunuyán con 57 km², hasta geoformas complejas únicas, que en su porción

superior son glaciares descubiertos y que al bajar se van cubriendo de detritos hasta terminar como glaciares de escombros (Zalazar et al., 2020). La altura mínima promedio en la que se encuentran las masas de hielo de esta región es 2650 m s.n.m y el tamaño promedio es de 0.22 km², evidenciando su mayor contenido de glaciares de escombros.

Los Andes del Norte de la Patagonia (35 - 45°S) abarca desde la cuenca del río Neuquén en la provincia homónima, hasta las cuencas de los ríos Simpson, Senguer y Chico, en la provincia de Santa Cruz. En esta zona disminuye la altura de la cordillera pero aumentan las precipitaciones (más de 2000 mm anuales) (Viale et al., 2019), producto de los vientos húmedos provenientes del Pacífico. Predominan los glaciares descubiertos por encima del resto. El tamaño medio de los cuerpos de hielo es de 0.1 km², los dos glaciares de mayor tamaño están ubicados en la cuenca de los ríos Manso y Puelo: el glaciar Esperanza (10 km²) y el glaciar Manso (7.5 km²). Hacia el centro de la región, alrededor de los 42°S, existe una importante concentración de hielo descubierto en forma de glaciares de valle y de montaña. En promedio, los glaciares de esta región se ubican por encima de los 1800 m s.n.m.; y los glaciares de escombros se ubican en los cordones montañosos al este del eje principal.

Los Andes del Sur de la Patagonia (45 – 53°S) se extiende desde las cuencas del río Deseado y de los lagos Buenos Aires y Pueyrredón al norte, hasta las cuencas de los ríos Gallegos y Chico, en la provincia de Santa Cruz. La cordillera en esta región es baja, con una altura media de 1350 m s.n.m y el paso frecuente de los sistemas ciclónicos occidentales a lo largo del año da lugar a una elevada precipitación anual (> 4000 mm) (Bravo et al., 2019). Estas singularidades permiten el desarrollo de grandes campos de hielo, entre los que se destaca el Campo de Hielo Patagónico Sur (12500 km² de superficie), la masa de hielo más grande del hemisferio sur fuera de la Antártida que nuestro país comparte con Chile (www.glaciaresargentinos.gob.ar). En esta región, la superficie media de los cuerpos de hielo es de 1.4 km², muy superior al resto de las regiones. Los glaciares de mayor tamaño de la región y del país son el Upsala (785 km²), seguido por el Viedma (737 km²). También se encuentra en esta región el glaciar Perito Moreno (244 km²), mundialmente conocido como atractivo turístico. En esta región los glaciares se ubican a una altura mínima promedio de 1510 m s.n.m.; y los glaciares de escombros al este del cordón montañoso.

Los Andes Fueguinos (53 – 55°S) en la Isla Grande de Tierra del Fuego que son una continuación de la cordillera con un cambio de orientación en sentido oeste-este, las precipitaciones provenientes del Pacífico disminuyen de oeste a este por lo que en esta región encontraremos glaciares de pequeño tamaño, como el Martial Este (0.1 km²). El tamaño medio de estas masas de hielo es de 0.05 km² y la

altura mínima media es de 930 m s.n.m. En la Isla Grande de Tierra del Fuego el 87 % de los glaciares se concentran principalmente alrededor del lago Fagnano. Al norte del lago sólo encontramos glaciares de escombros y algunos manchones de nieve.

Tabla 4.1. Cantidad y tipo de glaciares en las cinco regiones de los Andes del Sur de Argentina según el Inventario Nacional de Glaciares. (G: de valle, montaña y descarga; MN: Manchón de Nieve, GE: Glaciar de escombros).

Región	Tipo de glaciar	Cantidad glaciares	Área km ²
Andes Desérticos	G	110	100
	MN	1220	30.5
	GE	1656	13.3
	Total	2986	143.8
Andes Centrales	G	985	1150
	MN	1582	67
	GE	5509	550
	Total	8076	1767
Andes del Norte de la Patagonia	G	494	226
	MN	1575	59
	GE	84	4
	Total	2153	289
Andes del Sur de la Patagonia	G	859	3345
	MN	1296	55
	GE	265	21
	Total	2420	3421
Andes de Tierra del Fuego	G	116	12
	MN	174	4
	GE	153	5
	Total	443	21

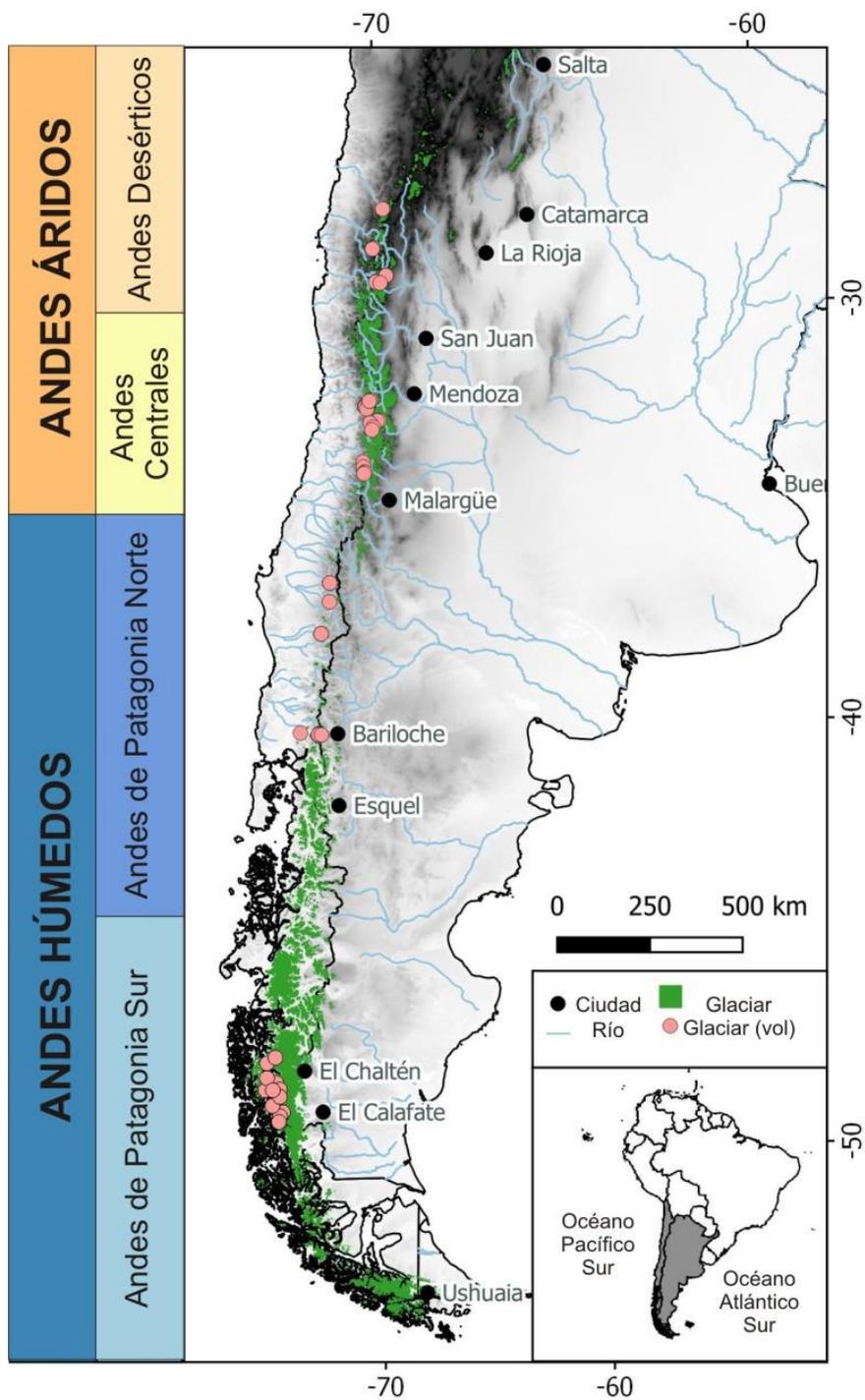


Figura 4.1. Distribución de los glaciares a lo largo de los Andes de Argentina y Chile (en verde). Los puntos rosas indican la ubicación de los 57 glaciares con información de volumen utilizados en este estudio.

4.4 Antecedentes de estimaciones de volumen de hielo en glaciares

Diferentes estimaciones mundiales del volumen de los glaciares han incluido a los glaciares de los Andes del Sur (Tabla 4.2). Radic & Hock (2010) estimaron con el método V-A para los Andes del Sur un volumen de $8116 \pm 712 \text{ km}^3$ distribuidos en un área de $17884 \pm 278 \text{ km}^2$ usando como referencia el World Glacier Inventory 'extended format' (WGI-XF) (World Glacier Monitoring Service (WGMS), 1989). Por su parte, Huss & Farinotti (2012) utilizaron un enfoque de base física para modelar la distribución del espesor de hielo de todos los glaciares presentes en el Randolph Glacier Inventory (RGI v2) (Arendt et al., 2012), para los Andes del Sur reportaron un volumen total de hielo de $6674 \pm 507 \text{ km}^3$ distribuidos en un área de 32521 km^2 . Grinsted (2013) utilizó diferentes inventarios (WGI, GLIMS y RGI V2) y el método de escalamiento V-A para estimar el volumen de hielo en glaciares de todo el mundo, para los Andes del Sur obtuvo un volumen de 4235.4 km^3 distribuidos en un área de 32546 km^2 según el RGI v2, y un volumen 2461.6 km^3 distribuidos en un área de 25925 km^2 según el WGI/GLIMS; con un error del 25 %.

Carrivick et al. (2016) aplicaron un modelo basado en la aproximación de plástico perfecto para estimar la distribución de hielo y el volumen de 617 glaciares mapeados por Davies y Glasser (2012) entre los 41°S y los 55°S . En total, estos autores, estimaron un volumen de $5955 \pm 1191 \text{ km}^3$ distribuidos en $22717 \pm 454 \text{ km}^2$. Huenante (2018) estimó un volumen de $289 \pm 107 \text{ km}^3$ para un área de 9572 km^2 utilizando el método de escalamiento V-A entre los 28 y 41°S sobre el inventario de glaciares chileno del 2014. Farinotti et al. (2019), utilizaron diferentes modelos de inversión para obtener la distribución del espesor del hielo de los glaciares presentados en el RGI 6.0 (Consortium, 2017). En este caso, los diferentes modelos fueron calibrados con información para 38 glaciares de los Andes del Sur (*GlaThiDa 2.0*) (Gärtner-Roer et al., 2016). Según el promedio ponderado de los cinco modelos, los Andes del Sur contienen un volumen de $5340 \pm 1390 \text{ km}^3$ distribuidos en un área de 29368 km^2 .

Tabla 4.2. Diferentes estimaciones del método de escalamiento V-A usados en los Andes del Sur.

Autores	Glaciares	Glaciar > 25 km²	Comentarios
Barh et al. (1997)	$0.276 A^{1.36}$		Ajustado a 144 glaciares
Radic & Hock (2010)	$0.036 A^{1.375}$	$0.054 A^{1.25}$	Adaptado por Grinsted (2013)
Huss & Farinotti (2012)	$0.028 A^{1.327}$		Adaptado por Grinsted (2018)
Grinsted (2013)	$0.044 A^{1.23}$	$0.054 A^{1.2}$	Usando inventarios globales
Huenante (2018)	$0.022 A^{1.227}$		Usando inventario chileno (2014)

4.5 Antecedentes de estimaciones del volumen en glaciares de escombros

Para gestionar sustentable y eficientemente los recursos hídricos en zonas de montaña es crucial comprender todos los aportes a la hidrológica del sistema de alta montaña, además de los glaciares y la nieve incluyendo los glaciares de escombros (Jones et al., 2019). Existen muy pocas mediciones de espesor y contenido de hielo en glaciares de escombros, es por eso que, hasta el momento solo se han aplicado relaciones empíricas para realizar aproximaciones de espesor y volumen de los glaciares de escombros no medidos (Jones et al., 2019). En particular, relaciones empíricas entre el espesor y el área, han sido aplicadas para predecir el espesor y derivar el volumen de los glaciares de escombros a escala regional y global (Azócar & Brenning, 2010; Brenning, 2005b; Jones et al., 2018; Perucca & Esper Angillieri, 2011).

Brenning (2005a) desarrolló una relación empírica a partir de mediciones morfométricas de campo en 19 glaciares de roca en los Andes de Santiago de Chile (Bodin et al., 2010). Según este autor, el espesor medio de los glaciares de escombros es función del área. En su tesis, Brenning (2005a) aplicó la relación empírica para 185 glaciares de escombros de los Andes Centrales chilenos y 34 glaciares de escombros en los Andes Centrales de Argentina. Determinando que el volumen de hielo en los glaciares de escombros en la parte chilena y Argentina alcanza los 3 ± 1 y 4 ± 1 km³, respectivamente.

A partir de la relación empírica propuesta por Brenning (2005a), Azocar & Brenning (2010), estimaron para 2560 glaciares de escombros de los Andes Chilenos entre los 27 y 33°S con un área de 147.5 km² un volumen de hielo de 2.17 km³ con una incertidumbre del orden del – 50 % al + 100 % por ciento.

Más recientemente, Jones et al (2019), aplicando la relación empírica de Brenning (2005a), proporcionaron la primera estimación del volumen de todos los glaciares de escombros a escala global. Según este estudio, existen en toda América del Sur 28665 glaciares de escombros con un área de 3558 km² y un volumen de hielo de 35 ± 7 km³.

4.6 Metodología y fuente de datos

4.6.1 Glaciares con información de volumen de hielo en los Andes del Sur

De los casi 30000 glaciares en los Andes del Sur (Barcaza et al., 2017; Zalazar et al., 2020), se realizó una búsqueda para esta tesis donde se recopilaron 73 glaciares entre los 28°S y los 50°S con alguna estimación reciente del volumen de hielo (Figura 1). El apéndice (Tabla A) contiene la lista completa, donde se identifica la clasificación morfológica del glaciar, coordenadas geográficas, elevación, área,

volumen y referencias bibliográficas de los utilizados para esta tesis. En total se identificaron 13 glaciares en los Andes Desérticos, 21 en los Andes Centrales, 27 en los Andes del Norte de la Patagonia y 12 en los Andes del Sur de la Patagonia. A continuación, se describen brevemente los métodos utilizados para obtener el volumen de los diferentes glaciares, para mayor detalle referirse a las publicaciones citadas.

Pitte et al. (2022), presentaron el volumen para el glaciar Agua Negra en la Cuenca de Jáchal a partir de espesores de hielo medido mediante eco sondajes terrestre. También realizó una compilación del volumen para otros 12 glaciares de los Andes Desérticos (Argentina y Chile), en estos casos se utilizaron diferentes metodologías para obtener el volumen a través de mediciones de radar (métodos de interpolación, software Surfer).

Zorzut et al. (2020) (*Ver capítulo 3*) presentaron el volumen para 13 glaciares del Monte Tronador, calculados a partir de la distribución de espesores de hielo obtenidos con un modelo basado en la aproximación de flujo paralelo (Cuffey & Paterson, 2010) y utilizando la pendiente y velocidad superficial como datos de entradas. El modelo fue calibrado y validado con más de 27 km de mediciones de espesor de hielo mediante eco sondaje aéreo.

Huenante, (2018), a partir de los informes de la Dirección General de Aguas (2014 a y b; 2011) calculó el volumen para 37 glaciares en los Andes de Chile entre los 29° y los 51°S, interpolando los espesores de hielo medidos mediante eco sondaje aéreo y terrestre con el método de las curvaturas mínimas.

Millan et al. (2019) combinaron mediciones gravimétricas, eco sondajes y estudios batimétricos con los resultados de Carrivick et al. (2016) y calcularon la distribución del espesor de hielo para los Campos de Hielo de la Patagonia. A partir de las grillas de espesor de hielo de Millan et al. (2019) se calculó el volumen para los 12 glaciares de descarga del Campo de Hielo Sur que fluyen hacia la cuenca del río Santa Cruz utilizando la extensión de estos glaciares según el Inventario Nacional de Glaciares de Argentina (Zalazar et al., 2020).

4.6.2 Cálculo de volumen para glaciares y manchones de nieve

El método de escalamiento volumen-área (V-A) es un método empírico, basado en que el volumen del glaciar es proporcional a su área superficial (Bahr et al., 1997). El cálculo del volumen de hielo para los 2588 glaciares y los 5894 manchones de nieve de los Andes Argentinos se estimó utilizando Ecuación 1.

Ec. (1)

$$V = kA^\gamma$$

El coeficiente de proporcionalidad (k) y el exponente (γ) se obtuvieron a través de una regresión lineal a partir de los glaciares con valores de volumen.

4.6.3 Filtrado de valores anómalos de volúmenes de hielo

Las estimaciones de volumen encontradas en la literatura provienen de fuentes con diferentes criterios de mapeos de los glaciares, cantidad de mediciones y métodos de interpolación, es por eso que antes de analizar las diferentes relaciones empíricas propuestas se realizó una primera relación volumen-área para estos glaciares (Figura 4.2 A). En total, de los 73 glaciares (Apéndice, tabla A), 16 fueron excluidos del estudio ya que arrojaban altos valores de error, quedando 57 glaciares restantes, con los que se analizó y calculó el volumen de hielo en los Andes de Argentina. De los 16 glaciares excluidos, se identificaron 10 glaciares donde las diferencias entre la primera relación V-A y los valores medidos superan el 100 %; todos ellos fueron identificados como posibles valores atípicos (nombre adoptado de referencia para los valores que fueron removidos de la población original, Figura 4.2 A). De los 10 glaciares (señalados en verde), uno se ubica en los Andes Desérticos (30°S) (glaciar Brown inferior), y el resto en los Andes de Patagonia Norte (37.5° y los 40°S). En el caso de los glaciares de los Andes del Norte de la Patagonia, todos los que cuenta con valores anómalos están ubicados en volcanes (como en el caso del Nevado de Sollipulli, el Volcán Villarrica, el Volcán Mocho-Choshuenco, el Velluda, el Llaima, el Callaqui y el Osorno), donde es difícil identificar las divisorias de hielo debido a su morfología y la falta de datos del flujo de hielo (Ruiz et al., 2015). También se removieron 5 glaciares que se consideraron como anómalos ya que formaban parte de los volcanes mencionados anteriormente (color amarillo) observándose las mismas problemáticas en cuanto al mapeo en la delimitación de los cuerpos.

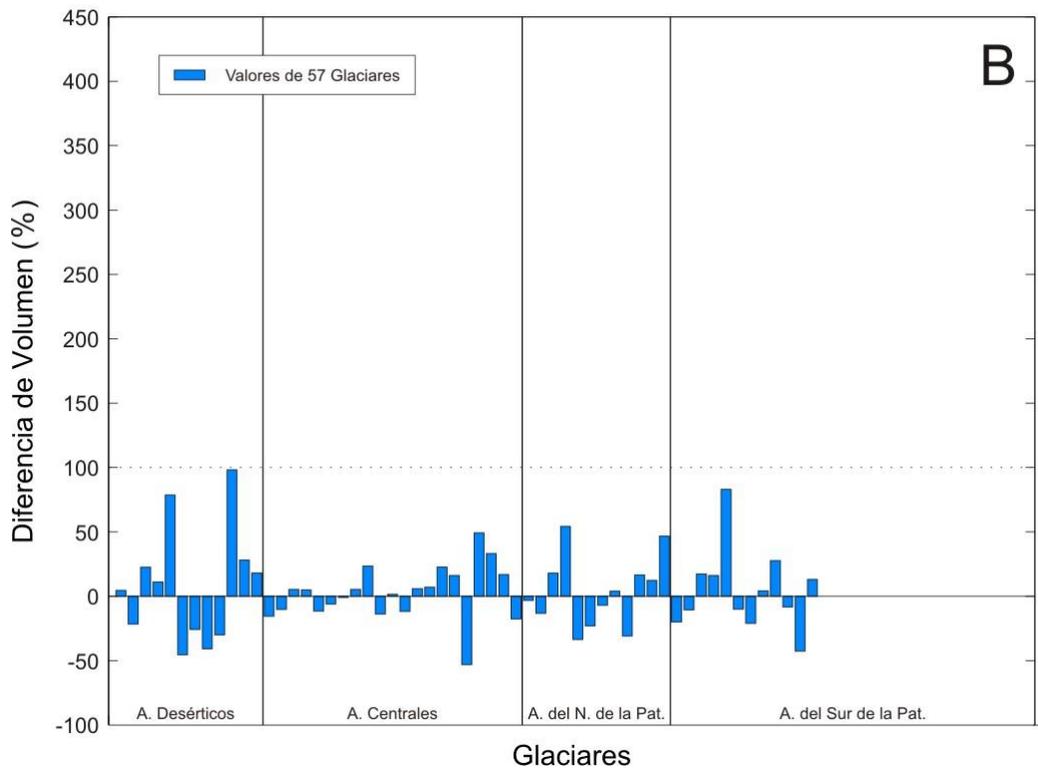
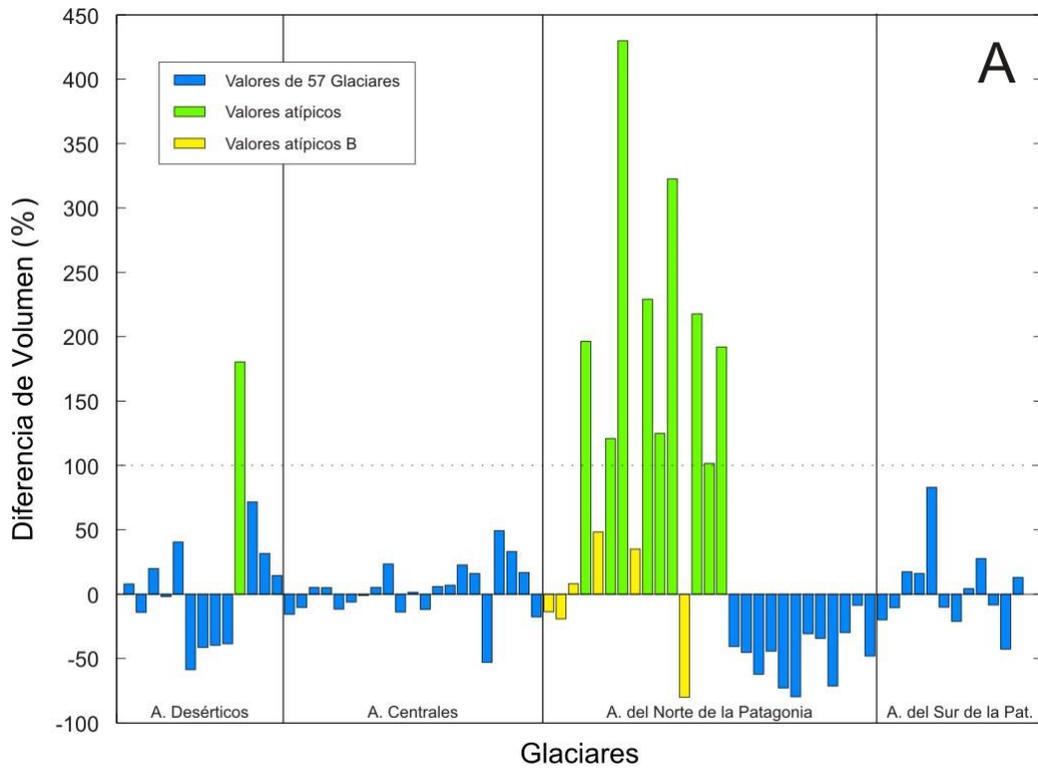


Figura 4.2. Valores residuales de la diferencia del volumen modelado con respecto al volumen medido para los 73 glaciares identificados a lo largo de los Andes (A) y con respecto a los 57 seleccionados (B) con menos de 100% diferencia.

4.6.4 Diseño de los experimentos

Utilizando los 57 glaciares seleccionados, se realizaron 3 experimentos para obtener los coeficientes k y γ de la Ecuación 1 de diferentes maneras. El primero, denominado Volumen-Área Todos (VAT) toma en cuenta a todos los glaciares como una sola población. El segundo experimento, denominado Volumen-Área Regional (VAR) separa a los glaciares por regiones de los Andes Argentinos. Finalmente, el tercer experimento, denominado Volumen-Área Clase (VAC) separa a los glaciares por región y también por su clasificación morfológica (Manchones de Nieve, Glaciares de Montaña, Glaciares de Valle y Glaciares de Descarga). Debido a la falta de datos para algunas clases de glaciares en algunas regiones, se procedió a comparar las clases por región para evaluar las posibles similitudes y/o diferencias morfométricas y así extrapolar los coeficientes de una misma clase, de regiones diferentes o para distintas clases, pero de la misma región. Una vez obtenidos los coeficientes (Tabla 4.3) se calculó el volumen de todas las masas de hielo en los Andes de Argentina para cada experimento., según su área en el ING (Zalazar et al., 2020).

Tabla 4.3. Coeficientes k & γ para cada experimento según la región de los Andes Argentinos.

VAT	Región	Coeficientes escalares		
		VAR		VAC
V= 0.0277 A ^{1.3735}	Andes Desérticos	V= 0.0251 A ^{1.4153}	Glaciar Montaña	V= 0.0251 A ^{1.4153}
			Glaciar Valle ¹	V= 0.0251 A ^{1.4153}
	Andes Céntricos	V= 0.0265 A ^{1.2946}	Glaciar Montaña	V= 0.0260 A ^{1.2705}
			Glaciar Valle	V= 0.0259 A ^{1.3558}
	Andes del norte de la Patagonia	V= 0.0514 A ^{1.1977}	Glaciar Montaña	V= 0.0535 A ^{1.1729}
			Glaciar Valle	V= 0.0466 A ^{1.2482}
	Andes del sur de la Patagonia	V= 0.0255 A ^{1.3855}	Glaciar Montaña ²	V= 0.0535 A ^{1.1729}
			Glaciar Valle ³	V= 0.0466 A ^{1.2482}
			Glaciar Descarga	V= 0.0255 A ^{1.3855}
	Andes de Tierra del Fuego	V= 0.0514 A ^{1.1977}	Glaciar Montaña ²	V= 0.0535 A ^{1.1729}
			Glaciar Valle ³	V= 0.0466 A ^{1.2482}

¹Debido a las características morfológicas similares, se utilizaron los mismos valores (k & γ) que se derivaron para los glaciares de montaña de los Andes Desérticos en los glaciares de valle de la misma región.²⁻³Debido a las características morfológicas similares, se utilizaron los mismos valores (k & γ) que se derivaron para los glaciares de montaña y valle de los Andes del norte de la Patagonia. Para los mismos en los Andes del sur de la Patagonia y en los Andes de Tierra del Fuego.

4.6.5 Estimación del error del cálculo de volumen

La precisión de los resultados fue evaluada en términos de la estadística de los residuales de las diferentes regresiones lineales, para ello se utilizaron: el r^2 como una medida de la explicación de la varianza, el error cuadrático de la raíz (RMSE) como una medida del error de las regresiones, el error medio (BIAS) para conocer los sesgos sistemáticos y el rango intercuartil (IQR) como una medida del error máximo (Tabla 4.4). Los errores tanto (RMSE, BIAS, IQR) se expresan en porcentual con respecto al valor medido.

4.6.6 Cálculo de volumen de glaciares de escombros

Para estimar el volumen de hielo contenido en los 7667 glaciares de escombros se utilizó la relación empírica entre el espesor y el área ($h - S$) propuesta por Brenning (2005a) y que ha sido aplicada

para derivar el volumen de los glaciares de escombros en diferentes regiones del planeta (Jones et al., 2019). Brenning (2005a) estima el espesor medio de permafrost rico en hielo (h) en glaciares de escombros como $\bar{h} = c S^\beta$, donde (S) es la superficie del glaciar de escombros (km^2), c es un parámetro de escala (50) y β un exponente de escala (0.2). Luego el volumen del glaciar de escombros se obtiene multiplicando el espesor medio por la superficie del glaciar de escombros.

$$V = \bar{h} S$$

El volumen de hielo para los 7596 glaciares de escombros se estimó posteriormente mediante la multiplicación de V y el contenido de hielo estimado (% por vol.) y suponiendo un factor de conversión de la densidad del hielo de 917 kgm^{-3} (Cuffey & Paterson, 2010). El contenido de hielo estimado utilizado es de 15 – 30 % para glaciares de escombros inactivos y 40 – 70% para glaciares activos. Es importante mencionar que estos datos obtenidos no han tenido calibración y que por tanto, estas estimaciones pueden contener un alto grado de error.

4.7 Resultados

4.7.1 Resultados de las regresiones para los 57 glaciares seleccionados

Es importante encontrar una relación empírica V-A local que se adapte a la cordillera de los Andes argentinos. Con este objetivo, en la presente tesis se analizan detalladamente 57 glaciares (apéndice, tabla A) sobre los que existe perfiles RES, y cuyos volúmenes fueron estimados previamente. En total los 57 glaciares seleccionados conforman un área total de 2585 km^2 con un volumen total medido de 809 km^3 . Las regresiones usadas en los experimentos tienen un r^2 mayor o igual a 0.95, con una incertidumbre (RMSE) del orden del 30 % del error, aunque en algunos casos (VAT) puede llegar hasta un 40 %. La calibración fue realizada con todos los glaciares disponibles, por lo tanto, no se realizó una validación independiente de los modelos. En todos los casos los errores presentados corresponden al RMSE de las regresiones expresado en forma porcentual con respecto al valor medido. Según los diferentes experimentos el volumen de hielo contenido en los 57 glaciares es de $714 \pm 286 \text{ km}^3$ (VAT), $708 \pm 212 \text{ km}^3$ (VAR) o $708 \pm 212 \text{ km}^3$ (VAC) (Tabla 4.4).

En todos los casos las diferencias con los valores medidos se encuentran dentro del margen de error establecido. Las mayores diferencias entre los experimentos se observan en los glaciares más pequeños, por el contrario, para los grandes glaciares descarga del Campo de Hielo Sur en la cuenca del río Santa Cruz los tres experimentos coinciden (Figura 4.3). Si se analiza en detalle lo que ocurre región a

región, encontramos que, por ejemplo, para los glaciares de Patagonia Sur los 3 modelos son similares difiriendo en un $\sim 12.5\%$. Esto es debido a que tanto para VAR como para VAC se utilizaron los mismos coeficientes para esta región (ya que solo hay glaciares de descarga para la región de Patagonia Sur con datos de volumen), mientras que en VAT, al tener los valores más altos de volumen y área tiene un fuerte peso en la regresión. En cambio, para el resto de las regiones que si hay valores de k & y ajustados para cada tipo de glaciar se puede discutir cual modelo tiene mejor ajuste. Para los Andes de Patagonia Norte se observa que tanto VAR como VAC están muy próximos al valor medido ($\sim 1.25\%$) en tanto VAT difiere en un (26 %) para esa zona; esto implica que el ajuste mejora cuando se tienen en cuenta las categorías por clase de glaciar. En los Andes Centrales todos los modelos sobreestiman los volúmenes; el que mejor se ajusta es el método VAR con un -0.33% de diferencia; mientras que VAC difiere en un -6% y VAT -30% . Por último, en los Andes Desérticos, el mayor ajuste lo tiene el método VAT (8 %), mientras que para los otros dos es el mismo (13 %) esto es debido a que se utilizaron los mismos coeficientes de la categoría glaciares de montaña para ambos experimentos. Esto vuelve a poner en primer plano, la necesidad de más datos que permitirían poder tener mayor control sobre las regresiones si los valores de (k & y) fueran obtenidos para cada categoría de glaciar específica.

Tabla 4.4. Estimación del volumen y estadística de los residuales para los tres experimentos.

Experimentos	Cantidad de Glaciar	Área km^2	Vol. med. km^3	Vol. mod km^3	R^2	RMSE %	BIAS %	IQR %
VAT	57	2585	809	714	0.95	40	7	48
VAR	57	2585	809	708	0.95	30	4	32
VAC	57	2585	809	708	0.95	30	4	31

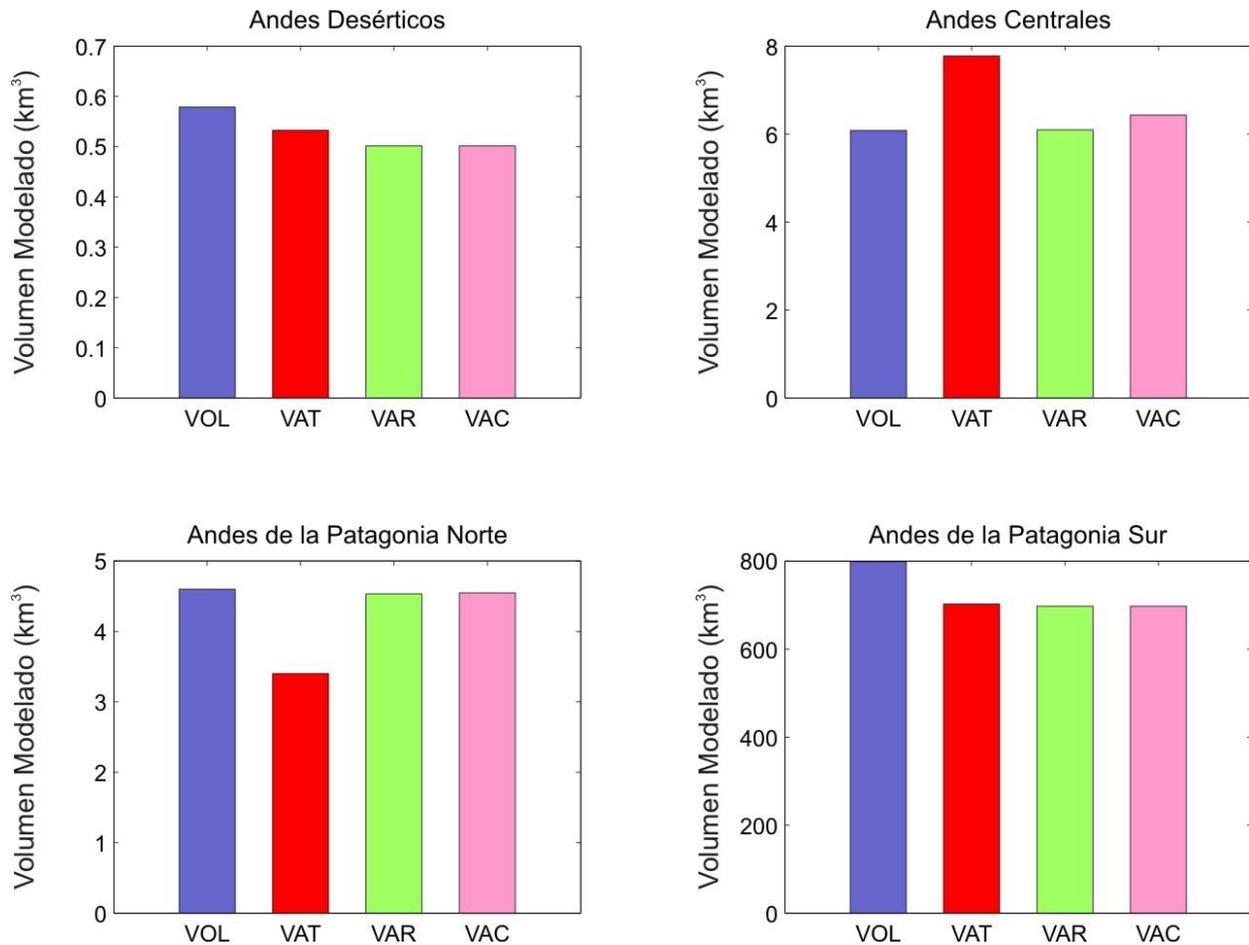


Figura 4.3. Estimación del volumen de hielo usando los 3 experimentos (VAT, VAR, VAC) propuestos en este trabajo para los Andes de la Argentina para cada región en comparación con el volumen medido.

4.7.2 Volumen total para todas las masas de hielo de los Andes de Argentina

Para este trabajo se utilizó un total de 57 glaciares (Apéndice, tabla A) donde; primero todas las masas de hielo con datos de volúmenes en los Andes de Argentina y Chile fueron utilizadas para obtener una única relación V-A para todos los Andes. Segundo se tuvo en cuenta las diferencias latitudinales por región, y tercero se dividió a las masas de hielo por su clasificación morfológica. Los parámetros (k & y) como parte fundamental en la ecuación V-A, fueron ajustados de tres formas diferentes para los glaciares y manchones de nieve. Para los glaciares de escombros se utilizó la aproximación de Brenning (2005a) teniendo en cuenta si fueron clasificados como activos o inactivos.

Para las 16078 masas de hielo en la Cordillera de los Andes Argentinos con áreas mayores a 0.01 km^2 y una superficie total de 5769 km^2 el volumen de hielo total es de $776 \pm 310 \text{ km}^3$ si se los analiza como una sola población (VAT). Cuando se lo analiza por regiones (VAR) el volumen de hielo total es levemente

menor ($765 \pm 230 \text{ km}^3$). Finalmente, cuando también se los analiza también por la clase (VAC) el volumen total es levemente mayor ($781 \pm 234 \text{ km}^3$). (Figura 4.4).

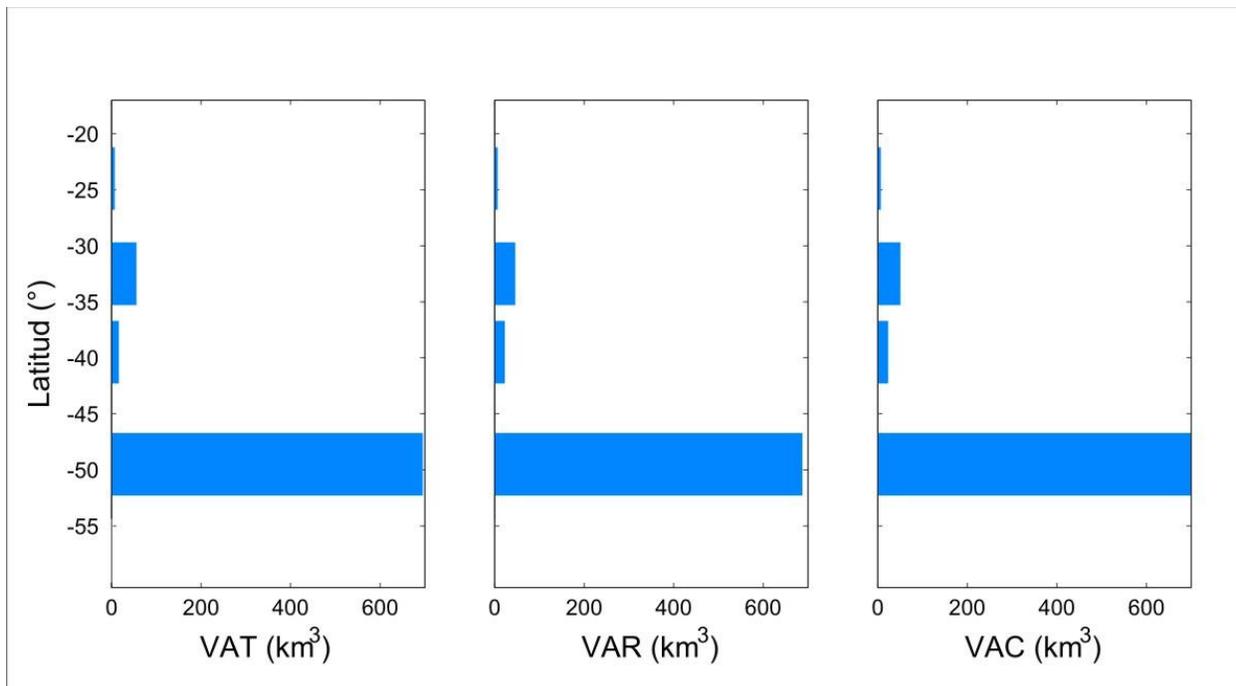


Figura 4.4. Distribución del volumen de hielo a través de las 5 regiones a lo largo de los Andes de Argentina, teniendo en cuenta los 3 experimentos del volumen total calculado.

Utilizando los resultados por regiones (VAR), en los Andes del Sur de la Patagonia, que representa el 59 % del área y el 15 % del total de las masas de hielo (Tabla 4.1) se concentra casi el 90 % ($688 \pm 206 \text{ km}^3$) del volumen de hielo de la Argentina. Por el contrario, en los Andes Centrales en donde se encuentra el 50 % del total de masas de hielo y el 30 % del área cubierta, contiene tan solo el 7 % ($57 \pm 17 \text{ km}^3$) del volumen total. En los Andes de Norte de la Patagonia, con el 13 % del número total de cuerpos y solo 5 % de la extensión total, se concentra el 2 % ($15 \pm 5 \text{ km}^3$) del volumen total. En los Andes Desérticos, con solo el 4 % del número de cuerpos y 2 % del área total, el volumen total de hielo es menos de 1 % ($6 \pm 2 \text{ km}^3$) del volumen total. Finalmente, en los Andes Fueguinos, donde el total de cuerpos representa menos del 3 % del total y la extensión de los mismos es apenas un 0.4 % del total, el volumen de hielo representa 0.1 % ($0.6 \pm 0.2 \text{ km}^3$) del volumen total (Figura 4.4 y Tabla 4.5).

Los tamaños de las masas de hielo van desde $\sim 0.01 \text{ km}^2$ hasta casi 1000 km^2 . El 97 % de todas las masas de hielo son menores a los 0.5 km^2 (principalmente glaciares de escombros y manchones de nieve perenne) y en total representan un volumen de 12 km^3 . Por el contrario, los 6 glaciares de descarga

situados en los Andes de la Patagonia Sur, entre $\sim 49^{\circ}\text{S}$ y 50°S (por ejemplo: Upsala, Viedma, Perito Moreno, Spegazzini) representan el $\sim 71\%$ del volumen total y un 31% de toda la superficie cubierta de hielo del país.

Tabla 4.5: Volumen modelado por experimento en km^3 en las regiones del país para cada categoría de glaciar.

Región	VAT				VAR				VAC				VA
	GM	GV	GD	MN	GM	GV	GD	MN	GM	GV	GD	MN	GE
A. Desérticos	3	1	1	1	2	1	1	1	3	1	1	1	0.8
A. Centrales	8	41	1	1	13	36	1	1	7	36	1	1	6
A. Pat. Norte	9	6	0	1	9	4	0	2	14	7	0	2	0.02
A. Pat. Sur	38	117	540	1	37	113	537	0.5	44	117	536	2	0.2
A. T. del Fuego	0.2	0	0	0.03	0.5	0	0	0.1	1	0	0	0.11	0.05
Total	58	165	542	4	60	154	539	5	69	161	538	6	7

GM (glaciar de montaña); GV (glaciar de valle); GD (glaciar de descarga); MN (manchón de nieve); GE (glaciar de escombros).

Utilizando los resultados para las diferentes clases de glaciares (VAC), las masas de hielo más voluminosas del ING son los glaciares de descarga (con una cantidad de 12, menos del 0.1% del total) con un área de 1809 km^2 y un volumen de hielo de $538 \pm 161\text{ km}^3$ (69% del total) seguidos por los glaciares de valle (con una cantidad de 401 glaciares, 3% del total) con un área de 1795 km^2 y con un volumen de hielo de $161 \pm 48\text{ km}^3$ (21% del total), luego los glaciares de montaña (con una cantidad de 2175, 14% del total) con un área de 1242 km^2 y con un volumen de $69 \pm 21\text{ km}^3$ (9% del total). Con un volumen mucho menor, $7 \pm 2\text{ km}^3$ (con una cantidad de 7596, 47% del total) continúan los glaciares de escombros con un área de 646 km^2 . Finalmente, los manchones de nieve (con una cantidad de 5894, 37% del total) son la clase de cuerpos de hielo que menor volumen representan $6 \pm 2\text{ km}^3$ (1% del total) con un área de 278 km^2 (Tabla 4.5).

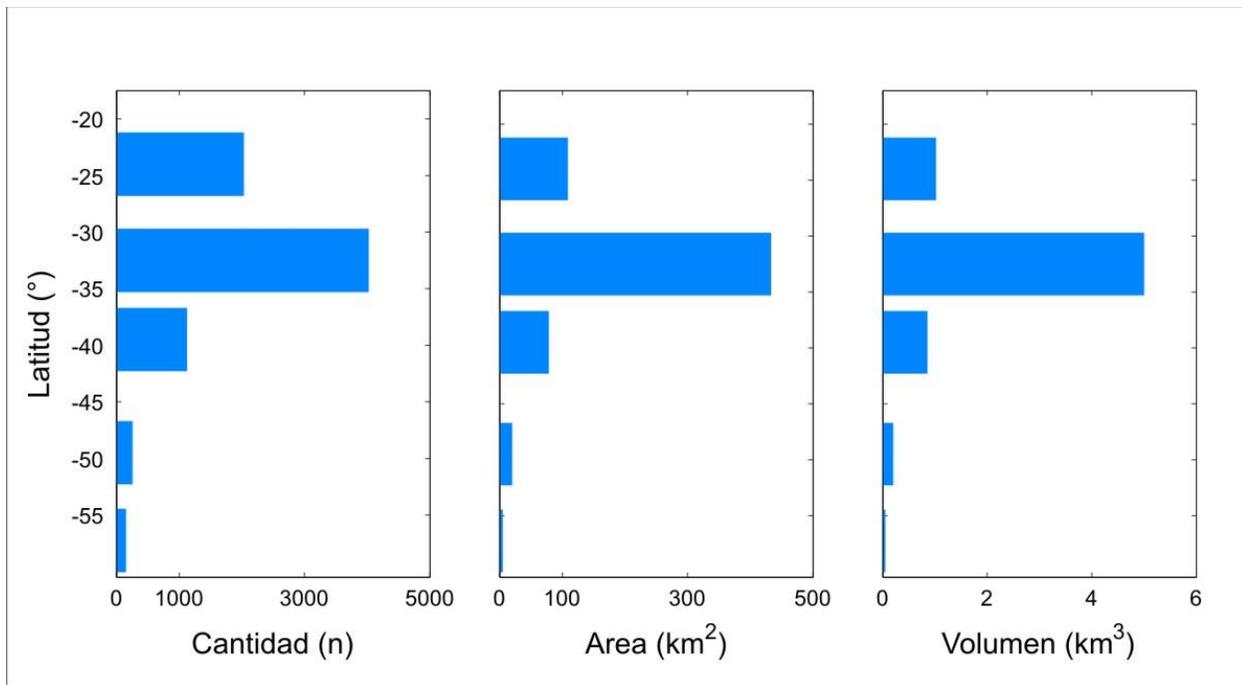


Figura 4.5. Distribución de los glaciares de escombros regionalmente teniendo en cuenta la cantidad, el área y el volumen.

A pesar de su escaso volumen, los glaciares de escombros son muy numerosos (48 % del total de cuerpos) y se encuentran principalmente en los Andes Centrales, donde cubren un área de 433 km² con un volumen de hielo de 5 ± 1.5 km³, mientras que en los Andes Desérticos cubren un área de 109 km² con un volumen de 1 ± 0.3 km³. En los Andes Patagónicos y Fueguinos, donde este tipo de cuerpos no son comunes, cubren una extensión total de 30 km² y tienen un volumen total de 0.27 ± 0.3 km³ (Tabla 4.5; Figura 4.5).

4.8 Discusión

4.8.1 Relaciones empíricas

Los tres experimentos utilizados para conocer el volumen de hielo de los cuerpos de hielo de la Argentina arrojaron resultados similares. La cantidad de varianza explicada por cada regresión lineal es de ~95 %. También, las incertidumbres según el tratamiento estadístico de los residuales no muestran grandes diferencias (Tabla 4.4). En particular, el método VAT, donde todos los glaciares, sin importar clase ni región, fueron agrupados en una sola población tiene la mayor incertidumbre. Sin embargo, la diferencia entre usar la relación para todos los Andes o al dividir en regiones y categorías es de tan solo el ~11 %. En cambio, entre los experimentos VAR y VAC las medidas de error son equivalentes (Tabla 4.4).

Las mayores diferencias en términos porcentuales entre los experimentos se observan en los glaciares más pequeños (25 % más profundos), por el contrario, para los grandes glaciares de descarga del Campo de Hielo Sur en la cuenca del río Santa Cruz los tres experimentos coinciden (con menos del 1 % de diferencia) (Figura 4.3, 4.4), debido a que para los 3 experimentos se usaron los mismos coeficientes (k & γ) porque se usó la misma base de datos, a su vez al ser los de mayor área son los que tienen más peso en la relación volcando el mejor ajuste para esta región o tipo de glaciares. En cambio, donde los manchones de nieve son los cuerpos de hielo dominantes las diferencias serán mayores en términos porcentuales, ya que es ahí donde los (k & γ) utilizados para cada experimento difieren más. Esto demuestran la importancia de calibrar la relación V-A para cada tipo de glaciar.

Ambos métodos (VAR y VAC) entregan resultados que son similares, aunque VAT tiene una mayor incertidumbre. Con el fin de utilizar el más sencillo y rápido en el procesamiento de los datos se sugiere usar la relación VAR. Sin embargo, es posible que esta similitud entre los dos métodos se deba a la falta de datos para los diferentes tipos de glaciares. Por lo tanto, es esperable que, con una mayor cantidad de estimaciones y una mejor representatividad en los tipos de glaciares, sea más apropiado usar una relación que contemple los diferentes tipos de glaciares (VAC). Mientras tanto, esto no suceda, se sugiere que separar por regiones (VAR) es más preciso que no hacerlo (VAT).

4.8.2 Correlación entre las clases de glaciares para los coeficientes k & γ

A continuación, se presentan los análisis comparativos entre la base de datos de los 57 glaciares y la base de datos del ING para diferentes categorías de glaciares en las distintas regiones. Dado que la base de datos proviene mayormente de glaciares chilenos en la región de los Andes Desérticos y los Andes Centrales, se efectuaron estudios comparativos para reflejar, que la representatividad de los glaciares chilenos respecto a cada categoría es válida al comparar las áreas versus las elevaciones con respecto a los glaciares argentinos (Fig.4.6). Primero se comparó la categoría glaciar de montaña para los Andes Desérticos (Fig. 4.6.A) donde se observa que la similitud entre los 12 glaciares chilenos y la base del ING tiene una buena representatividad entre los 4750 y los 5500 metros de elevación. Lo mismo vemos (Fig. 4.6.B) cuando comparamos a los 16 glaciares de montaña chilenos con los del ING para los Andes Centrales; el ajuste observado muestra una buena representatividad por encima de los 3750 metros de elevación; al igual que sucede para los glaciares de valle que se encuentran por encima de los 4500 m. (Fig. 4.6.C). Este análisis valida que se pueden usar los mismos coeficientes (k & γ) para estimar el volumen de los glaciares del lado argentino a partir de los 57 glaciares.

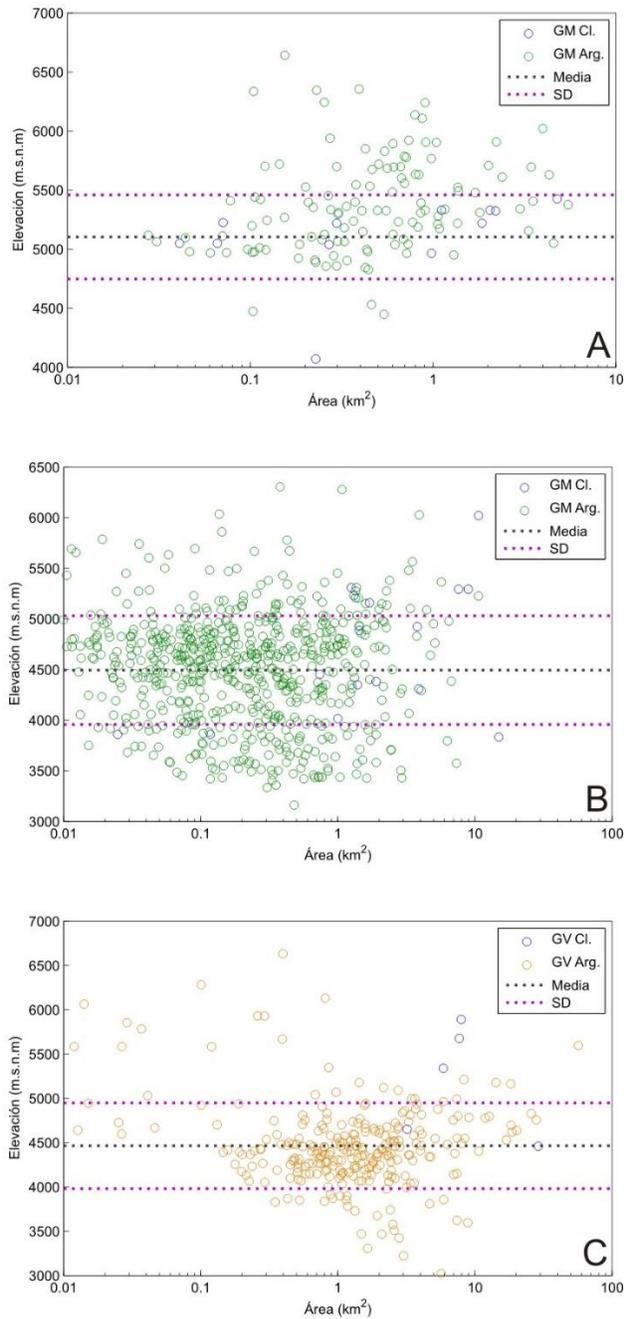


Figura 4.6. Elevación en relación al área de los glaciares de montaña. **A)** Para los Andes Desérticos, desviación estándar (SD) 411.8 m y una media de 5377 m. **B)** Para los Andes Centrales con un SD de 536.8 m y una media de 4494 m. **C)** Para los glaciares de valle de Argentina y Chile en los Andes Centrales un SD de 483.7 m y una media de 4465 m.

Teniendo en cuenta la falta de datos para algunas clases de glaciares en algunas regiones, se analizó de manera comparativa las clases por región para evaluar las posibles similitudes y/o diferencias morfométricas y así obtener los coeficientes para todas las clases en todas las regiones. Por ejemplo, en los Andes Desérticos, el ING identificó 9 glaciares de valle (GV) con áreas entre los 0.3 y 10 km² con largos

entre 1 y 7 km que sin embargo tienen tamaños (largo y área) similares a los 118 glaciares de montaña (GM), (Figura 4.7.A, B). Un caso particular es el del Monte Pissis ubicado en los Andes Desérticos a los 27°45'19.1"S 68°47'56.5"W que según el ING por su morfología fueron identificados como un campo de hielo con 18 km². Al analizarlo un poco más en detalle se estima más bien que los glaciares de esta zona corresponden a glaciares de montaña y por lo tanto para este trabajo para no utilizar los mismos coeficientes que los derivados para el Campo de Hielo Patagónico Sur, cuyos glaciares tienen una morfología y dinámica muy diferente a estos, se los considero como glaciares de montaña. No obstante, se recomienda seguir estudiando con mayor detalle esta extensa masa de hielo debido a su compleja morfología y peculiaridad en la zona.

Por otro lado, en Patagonia Norte, las categorías de los GM presentan morfológicamente similitudes con los GM de las regiones de Patagonia Sur y los Andes de Tierra del Fuego por lo tanto se les adjudicó los mismos coeficientes. Lo mismo para los GV de Patagonia Norte que al presentar su morfología similar con respecto a los GV de Patagonia Sur y Tierra del Fuego se usaron esos coeficientes (Tabla 4.3).

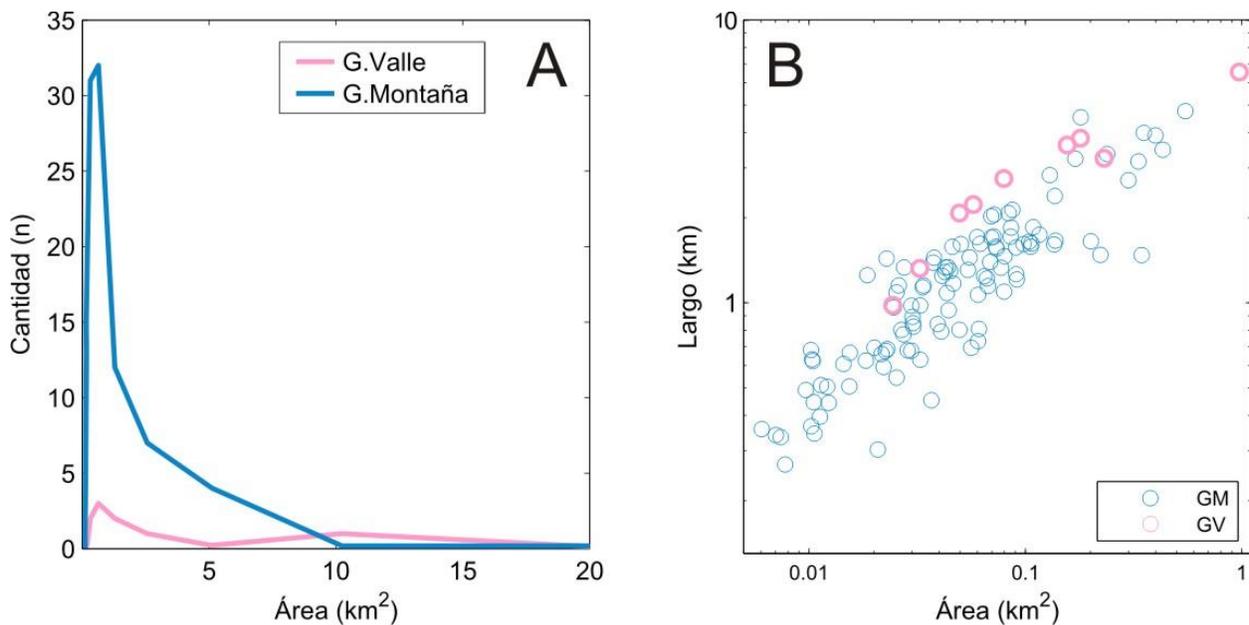


Figura 4.7. Comparación de las categorías de GM y GV en los Andes Desérticos, teniendo en cuenta **A)** las áreas y los largos; **B)** las cantidades y las áreas.

4.8.3 Volumen de hielo por cuenca hidrográfica para cada tipo de glaciar

El ING, además de estar estructurado en grandes regiones, está delimitado por cuenca hidrográfica, por lo tanto, a partir de los resultados obtenidos es posible cuantificar la importancia como reservas de agua en estado sólido de los diferentes tipos de glaciares.

Tabla 4.6. Volumen de hielo en km³ según cada tipo de glaciar (GD: glaciar descubierto; GV: glaciar de valle; GM: glaciar de montaña; MN: manchón de nieve; GEA: glaciares de escombros activos; GEI: glaciares de escombros inactivos) para las diferentes cuencas identificadas en el ING según el experimento VAR (volumen área regional).

Región	Cuencas	Volumen de tipos de formas de glaciares (km ³)						Total
		GD	GV	GM	MN	GEA	GEI	
Andes Desérticos	R. Pilcomayo	0	0	0	0	0.014	0.003	0.017
	Ccas. Varias de la Puna	0	0	0.02	0.08	0.01	0.02	0.12
	R. San Francisco	0	0	0	0	0.04	0.02	0.06
	R. Bermejo Superior	0	0	0	0	0.043	0.022	0.065
	Rio Juramento	0	0	0.004	0.01	0.21	0.05	0.27
	R. Salí-Dulce	0	0	0	0	0.08	0.03	0.11
	Salar de Pipanaco	0	0	0	0	0.01	0.01	0.02
	R. Abaucán y L. Verde	0.56	0	0.234	0.16	0.003	0.002	0.96
	Otros – R. Abaucán y L. Verde	0	0	0.001	0	0	0	0.001
	R. Vinchina-Bermejo	0.58	0	0.864	0.19	0.003	0.001	0.48
Ccas. Varias de Velazco	0	0	0	0.02	0.004	0.001	0.03	
R. Jáchal	0	1.44	1.32	0.53	0.21	0.03	3.54	
Andes Centrales	R. San Juan	0	3.02	5.00	0.45	2.86	0.15	11.48
	R. Mendoza	0	15.95	1.63	0.27	1.47	0.03	19.34
	R. Tunuyán	1.1	13.28	1.83	0.25	0.80	0.03	17.30
	R. Diamante	0	0.85	0.73	0.03	0.22	0.01	1.84
	R. Atuel	0	0.91	2.36	0.07	0.21	0.01	3.57
	Laguna de Llanquanelo	0	0	0.21	0.002	0.06	0.01	0.28
	R. Colorado	0	1.52	1.14	0.14	0.17	0.03	2.99
Andes del norte de la Patagonia	R. Neuquén	0.06	0.4	0.53	0.23	0.01	0.01	1.2
	Otros	0	0	0.01	0	0	0	0.01
	R. Hua-Hum	0	0	0.01	0.01	0	0	0.02
	R. Limay	0	0	0.40	0.09	0	0	0.49
	R. Manso y Puelo	0	2.19	4.16	0.19	0	0	6.54
	R. Chubut	0	0	0	0.024	0.001	0.001	0.026
	R. Futaleufú	0	0.96	3.33	0.86	0	0	5.15
	Otras	0	0	0.04	0	0	0	0.04
	R. Carrenleufú-Pico	0	0	0.22	0.07	0	0	0.29
R. Senguer y Chico	0	0	0.09	0.19	0	0	0.28	

	R. Deseado	0	0	0.01	0.01	0.004	0.001	0.03
	L. Buenos Aires-Pueyrredón	0	1.38	0.13	0.02	0.10	0.01	1.65
	R. Chico Alto	0	0.09	0.33	0.04	0.003	0.002	0.47
Andes del	R. Mayer y L. San Martín	0.008	10.78	3	0.18	0.02	0.01	14
sur de la	Otros – R. Mayer y L. San Martín	0	0	0.05	0	0	0	0.05
Patagonia	R. Santa Cruz	537.27	92.93	7.12	0.25	0.03	0.001	637.6
	Otros – R. Santa Cruz	0	8.10	25.86	0.002	0	0	33.96
	R. Viscachas	0	0	0.07	0.002	0.01	0	0.08
	R. Coig o Coyle	0	0	0	0	0.003	0	0.003
Andes de	Cuencas varias de Tierra del Fuego	0	0	0.43	0.07	0.02	0.01	0.53
Tierra del	Lago Fagnano	0	0	0.038	0.026	0.017	0.003	0.084
Fuego								

Dentro de las cuencas de la región de los Andes Desérticos, los glaciares del Monte Pissis (18 km²) representan el 20 % del volumen de hielo de toda la región; el 80 % restante del volumen está distribuido en más de 2984 glaciares más pequeños (área promedio 0.1 km²). Si analizamos por cuencas a la región, es notable que en el sector norte desde la cuenca Rio Pilcomayo hasta aproximadamente la cuenca Rio San Francisco, sólo encontramos glaciares de escombros y en algunos casos también manchones de nieve. Entonces la importancia de estas pequeñas masas de hielo como reservas de agua aumenta considerablemente para las regiones más áridas de la Puna. Haciendo foco en el extremo austral de la región, y en concordancia con el aumento de las precipitaciones níveas en latitudes medias, los glaciares son de mayor tamaño. Tal es así, que la cuenca de del Rio Jáchal, la más austral de la región, contiene el 80 % del volumen de hielo concentrado mayormente entre los glaciares de valle y montaña, lo cual les otorga el protagonismo como las reservas de agua congelada para esta cuenca.

En los Andes Centrales hay diez glaciares de valle con tamaños mayores a los 10 km² que concentran el 64 % del volumen de hielo; el resto del volumen está distribuido en el 96 % de los cuerpos de hielo que tienen una superficie inferior a 1 km². En las cuencas del norte, aproximadamente hasta los 33.5°S, existe la mayor concentración de hielo en los glaciares de escombros (75 % del total del país). Sin embargo, como se observa en la cuenca del río San Juan, que posee la mayor cantidad y superficie cubierta con glaciares de escombros (43 % del total de la región) los glaciares de escombros solo representan el 26 % del volumen de hielo de la cuenca, seguida por la cuenca del río Mendoza con el 8 %. Estas cuencas no sólo tienen la mayor cantidad (3833) a nivel regional sino también en el país (www.glaciaresargentinos.com.ar); no obstante cuando nos referimos a las reservas de agua dulce para

la zona, tenemos que mirar hacia los glaciares de valle y montaña. Estos cuerpos de hielo comienzan a ser predominantes hacia el sur, y particularmente en las cuencas ubicadas hacia el oeste en la Cordillera Principal; por ejemplo, en la subcuenca del río Tupungato en la cuenca del río Mendoza y la subcuenca del Tunuyán norte en la cuenca del río Tunuyán tienen 541 cuerpos de hielo, con un 51 % de volumen de hielo en glaciares de valle.

En los Andes del norte de la Patagonia, la distribución a nivel cuencas varía entre las categorías que poseen mayor volumen de hielo que son, en primer lugar, los glaciares montaña y de valle con el 86 %, y en segundo lugar, los manchones de nieve con el 12 % del volumen de hielo; con un tamaño promedio de 0.13 km². Las cuencas del Puelo Inferior y Futaleufú son las que tienen mayor cantidad ocupada con glaciares de montaña (384) y manchones de nieve (860), en conjunto suman el 84 % del volumen total de hielo. La subcuenca del Puelo Inferior es la que tiene el mayor porcentaje de hielo (243 glaciares de valle y de montaña) de la región con el 43 %; mientras que la del Futaleufú es la que tiene la mayor cantidad del volumen de hielo 6 % con un número de 663 manchones de nieve. Por otro lado, para la categoría de glaciares de escombros hay muy pocos y debido a su pequeño tamaño promedio de 0.2 km² representan tan solo el 0.14 % del volumen de la región ubicados mayormente en la cuenca del Río Neuquén.

En la región de los Andes de la Patagonia sur, la categoría que ocupa el mayor volumen de hielo es la de los 6 glaciares de descarga con un 78 %, que junto con los glaciares de valle y descarga en total suman el 99 % de hielo descubierto, mientras que los 1301 manchones de nieve y los 258 glaciares de escombros con un tamaño promedio de 0.04 y 0.07 km² representan menos del 0.05 % del contenido de hielo. La superficie media de los glaciares es de 1.4 km², muy superior al resto de las regiones. La cuenca del río Santa Cruz tiene el 93 % del hielo de toda la región y el 83 % del hielo de todo el país, siendo la cuenca con mayor cobertura de hielo. En ella se encuentran los glaciares más grandes de Argentina, que se desprenden del Campo de Hielo Sur. Además, la principal parte del hielo se encuentra en el Parque Nacional Los Glaciares, los glaciares de mayor tamaño de la región y del país son el Upsala (785 km²), seguido por el Viedma (977 km²). También se encuentra en esta cuenca el famoso glaciar Perito Moreno (244 km²). Por otro lado, la cuenca con menor contenido de hielo es la cuenca del Río Coig con menos de 0.003 km³ contenidos en los manchones de nieve y glaciares de escombros.

Para las cuencas de los Andes de Tierra del Fuego, los 116 glaciares de montaña con un tamaño promedio de 0.1 km² ocupan el 77 % de su volumen de hielo son la categoría que mayor porcentaje tienen, y se encuentran concentrados en los sectores más altos de la cordillera. Seguidos por los 174 manchones de nieve y los 153 glaciares de escombros con un tamaño promedio de 0.02 km². El tamaño medio de los

glaciares es de 0.05 km² y el valor máximo de 0.9 km² se alcanza en el glaciar Grande, dentro de la cuenca Rio Grande, incluida en las denominadas Cuencas Varias de Tierra del Fuego es aquí donde se aloja la mayor cantidad de hielo de la región (88 %). En la cuenca del lago Fagnano, encontramos todos los tipos de glaciares incluidos en el inventario. Sin embargo, el 87 % del volumen de hielo se encuentra al sur del mismo mayormente compuesto por glaciares de montaña. Al norte del lago sólo encontramos glaciares de escombros y algunos manchones de nieve con un volumen de 0.05 km³.

En resumen, el mayor volumen de hielo del país se encuentra alojado de norte a sur para cada cuenca del país, en la cuenca del Rio Jáchal; cuenca del Rio Mendoza; Rio Manso y Puelo; Rio Santa Cruz y Ccas. Varias de Tierra del Fuego. Los glaciares, manchones de nieve y glaciares de escombros distribuidos a lo largo de los Andes del país contribuyen al sostenimiento de la integridad de los servicios ecosistémicos de las regiones en las que se encuentran (Masiokas et al., 2020). Por lo cual, al tener consideración de la distribución de estos cuerpos de hielo por cuenca nos provee una idea más clara de su importancia a la hora de evaluar los recursos hídricos de la zona, para futuras decisiones socioambientales.

4.8.4 Importancia de los glaciares de escombros

Los glaciares de escombros constituyen un importante reservorio de agua en las regiones semiáridas de Argentina debido a su amplia distribución (Halla et al., 2021). La información sobre la delimitación y clasificación de estas interesantes pero complejas masas de hielo todavía están poco documentadas y se requieren investigaciones más detalladas. Este aspecto es particularmente importante para los Andes Centrales de Argentina, debido a la gran variedad y abundancia de glaciares de escombros en la región. Dadas las condiciones de sequía persistente en los Andes Centrales, se necesita clara y urgentemente más investigación sobre este tema ya que es de vital importancia conocer el porcentaje del volumen que ocupan en nuestro territorio.

Para alguna de las cuencas ubicadas en estos sectores solo aparecen como los únicos cuerpos de hielo referentes para la zona, y allí es donde cobra el protagonismo conocer su volumen. Gracias a esta tesis, por primera vez en Argentina se conoce el dato del volumen total que ocupan los glaciares de escombros y su distribución a lo largo de los Andes. Teniendo en cuenta que los glaciares de escombros podrían ser la reserva más importante de la región andina es necesario mejorar la estimación de los volúmenes que poseen para así entonces confirmar, proteger y evaluar estos glaciares (Schaffer et al., 2019). Para esto se requieren estimaciones mejoradas de la descarga de los glaciares de escombros, el

contenido de agua, los procesos y la hidrología para modelar su evolución futura y evaluar su contribución a los recursos hídricos (Schaffer et al., 2019).

Como indican Azocar & Brenning (2010), la importancia hidrológica de los glaciares de escombros está relacionada con el almacenamiento a largo plazo de agua congelada, así como con el almacenamiento y la liberación estacional de agua. Sin mediciones directas de la esorrentía, incluidas las mediciones detalladas del balance hídrico de la capa activa, es muy difícil, si no imposible, cuantificar las distintas contribuciones al ciclo hidrológico anual. Para destacar la importancia hidrológica de los glaciares de escombros, los autores la comparan con el equivalente de agua almacenada en los glaciares (incluyendo el hielo superficial y los manchones de nieve). Si bien estos datos de referencia son muy importantes, representan estimaciones aproximadas debido a la escasez de estudios, especialmente sobre el espesor de los glaciares de escombros y el porcentaje de contenido de hielo (Schaffer et al., 2019). Los glaciares de escombros podrían convertirse en un recurso hídrico cada vez más crítico, especialmente en algunas cuencas de los Andes Centrales (como, por ejemplo, San Juan y Mendoza); con el aumento de las temperaturas y una disminución de las precipitaciones previstas en el futuro.

4.8.5 Comparación de los cálculos de volumen por autor para las cinco regiones

En términos generales las estimaciones anteriores y VAR muestran valores similares del volumen total de las masas de hielo en los Andes de Argentina (Tabla 4.7, figura 4.8). Sin embargo, existen diferencias en la distribución del volumen según el tamaño de las diferentes masas de hielo. Las estimaciones previas, tienden a sobrestimar el espesor de los cuerpos de hielo más pequeños y subestimar el espesor de los más grandes, compensando así las diferencias; a su vez excluyen a los glaciares de escombros de sus cálculos. Es clave tener en cuenta el efecto que puede tener utilizar aproximaciones no calibradas con datos de la región para evaluar del rol en el sistema hidrológico de las diferentes masas de hielo. Por ejemplo, en una cuenca donde sólo hay pequeños glaciares o manchones de nieve su importancia sería sobreestimada y también su rol en futuras medidas de mitigación del impacto del cambio climático. En el caso de aquellas cuencas de los Andes Desérticos, donde sólo hay glaciares de escombros, la no inclusión de estas masas de hielo podría inferir una menor resiliencia en el futuro.

Tabla 4.7. Volumen de hielo para las regiones de los Andes argentinos según cada autor en km³. VAR (volumen área por región); B97 (Barh 1997); RH10 (Regin & Hock 2010); HF12 (Huss & Farrinotti 2012) Y G13 (Grinsted 2012).

	VAR	B97	RH10	HF12	G13
AD	7 ± 0.3	7.2 ± 0.4	9.4 ± 1	7.4 ± 0.5	10.3 ± 2
AC	46.6 ± 2	53.3 ± 3	71.2 ± 6	52.5 ± 4	66.8 ± 10
PN	23 ± 1	16 ± 1	21.5 ± 2	16.5 ± 1	23.6 ± 4
PS	688 ± 27	626 ± 35	651 ± 54.5	543 ± 37	494 ± 77
TF	0.6 ± 0.02	0.3 ± 0.02	0.3 ± 0.03	0.3 ± 0.02	0.5 ± 0.08
TOTAL	765 ± 230	703 ± 274	753 ± 474	620 ± 260	595 ± 553

La comparación a escala regional de los cálculos de volumen según las relaciones V-A previas (Tabla 4.7) con respecto a VAR (Figura 4.8) para los Andes de Argentina muestran un comportamiento heterogéneo en las diferentes regiones. Si bien para los Andes Desérticos y Centrales RH10 tiene diferencias considerables (30 y 53 %, respectivamente), tiene el mejor desempeño en los Andes del Sur de Patagonia (5 %). Esto es debido a que el ajuste para los grandes glaciares de descarga es muy cercano al propuesto en esta tesis compensando la diferencia del resto de las regiones, alcanzando así un volumen total para los Andes de Argentina, muy cercano al sugerido en esta tesis (Tabla 4.7). Para G13 el valor para los Andes Desérticos y Centrales también es mayor al calculado por VAR (43 y 49 %, respectivamente), en cambio en Patagonia Sur el valor calculado es sensiblemente menor (28 % menos). Debido a que las grandes masas de hielo de la región, son las que tienen el mayor peso en el cálculo, G13 es la relación que más se aleja al volumen total sugerido en esta tesis (VAR). En el caso de HF12, debido a la gran diferencia en Patagonia Sur principalmente pero también visibles para Patagonia Norte y Andes Fueguinos, el valor total es el segundo más bajo respecto a VAR. Finalmente, B97, aunque muestra el mismo patrón que HF12, debido a que en Patagonia Sur tiene un mejor ajuste (diferencia de apenas el 9 %) presenta un mejor ajuste.

Es evidente que no hay un comportamiento homogéneo en las regiones para los diferentes modelos, y que los valores varían dependiendo el tipo de glaciar al que se aplique la relación V-A; sin embargo, VAR al estar calibrada tiene el mejor ajuste y también en esta tesis se tiene en cuenta a los glaciares de escombros a diferencia del resto de los autores, alcanzando la mejor representación del volumen de los cuerpos de hielo para Argentina.

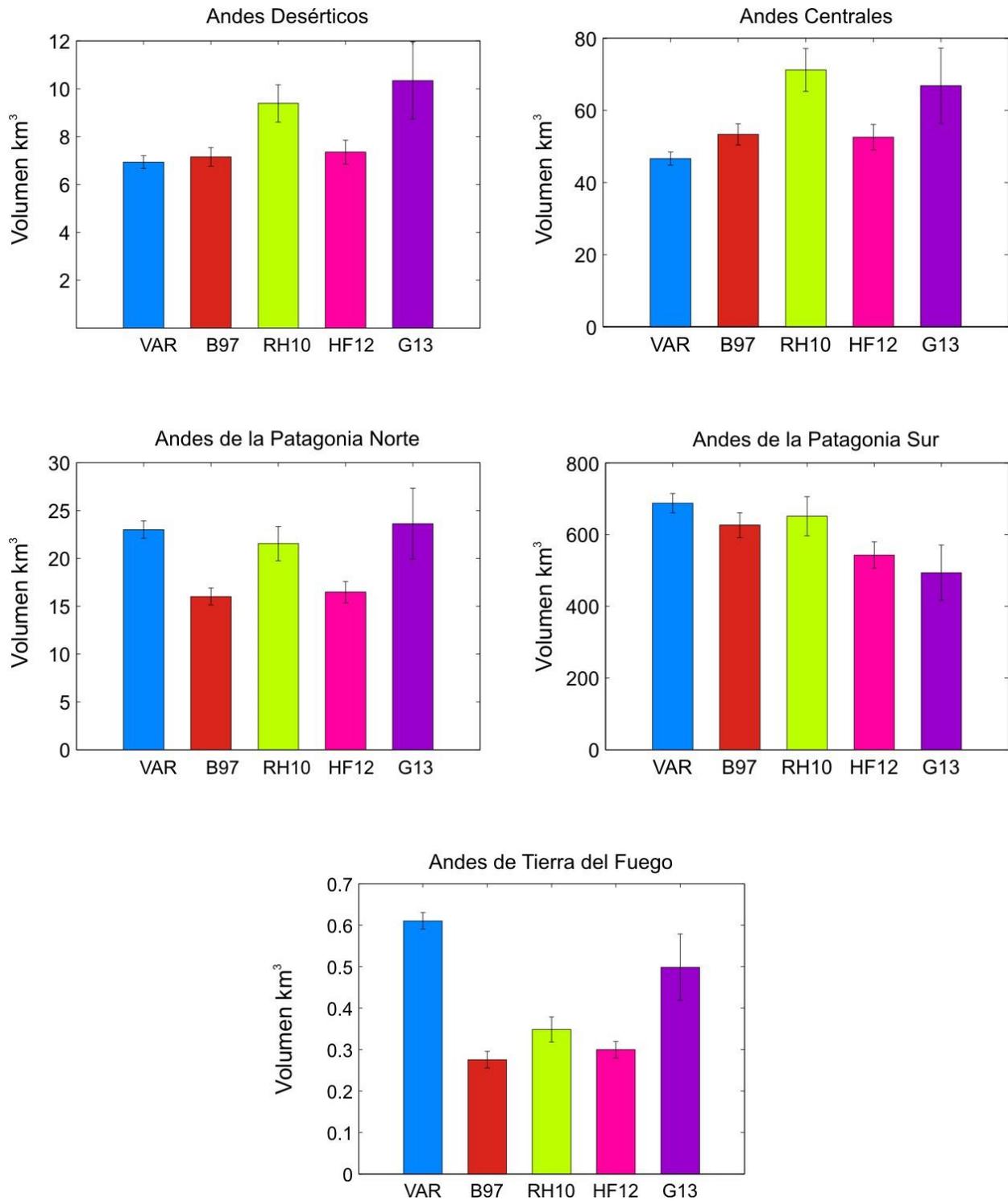


Figura 4.8. Estimación del volumen de hielo con sus respectivos errores (RMSE) usando los modelos propuestos por diferentes autores vs el experimento VAR propuesto en este trabajo para las 5 regiones de los Andes de la Argentina. VAR (volumen-área por región); B97 (Barh 1997); RH10 (Regin & Hock 2010); HF12 (Huss & Farrinotti 2012) Y G13 (Grinsted 2013).

4.9 Conclusiones

Por primera vez se obtuvo el volumen de todos los cuerpos de hielo presentes en los Andes de Argentina según el Inventario Nacional de Glaciares usando el método de escalamiento de volumen-área. Primero, con 57 glaciares medidos en los Andes de Argentina y Chile fueron utilizados para obtener una única relación V-A para todos los Andes de Argentina (VAT) con un volumen de $776 \pm 310 \text{ km}^3$. Segundo se tuvo en cuenta las diferentes regiones (VAR) y el volumen de hielo total obtenido fue levemente menor ($765 \pm 230 \text{ km}^3$). Finalmente, también se tuvo en cuenta la clasificación morfológica (VAC) y se obtuvo un volumen total levemente mayor ($781 \pm 234 \text{ km}^3$).

Se propone una relación V-A para los cuerpos de hielo de cada región de los Andes Argentinos (VAR, Tabla 4.3). Debido a la falta de datos para modelar el volumen de cada uno de los tipos diferentes de cuerpos de hielo en cada región, se proponen a la aproximación VAR como la mejor estimación del volumen de hielo. Siguiendo la clasificación morfológica de tipos de cuerpos de hielo en los Andes de Argentina, el 71 % del volumen total está en los glaciares de descarga ($539 \pm 162 \text{ km}^3$), seguido por el 20 % en los glaciares de valle ($154 \pm 46 \text{ km}^3$), el 8 % en los glaciares de montaña ($60 \pm 18 \text{ km}^3$), y por último el 1 % que corresponde a glaciares de escombros activos e inactivos ($7 \pm 2 \text{ km}^3$) y menos del 1 % pertenece a los manchones de nieve ($5 \pm 2 \text{ km}^3$). Por lo tanto, las clases más numerosas manchones de nieve y glaciares de escombros, los cuales representan el 37 % y 47 % del total de cuerpos de hielo en la Argentina, representan menos del 2 % del volumen total de hielo presente en nuestro país.

Se destaca que al comparar las diferentes estimaciones V-A con VAR las diferencias son mayormente visibles por región y no en la sumatoria total; en general modelan levemente menos espesos a los glaciares grandes de Patagonia Sur, pero se alejan bastante cuando se trata de los glaciares pequeños del resto de las regiones y se resalta que no tienen en cuenta a los glaciares de escombros. Por esta razón se recomienda cuidado al utilizar estimaciones mundiales en el análisis regional del país.

Los glaciares de escombros son muy numerosos y se distribuyen a lo largo del país. Sin embargo, se concentran en los Andes Centrales, por lo que su importancia como reserva de agua debe ser evaluada a escala local. En particular, en las cuencas de los ríos San Juan y Mendoza, está la mayor concentración de glaciares de escombros del país (63 % con un volumen de 4.5 km^3). Es crítico mejorar nuestro conocimiento sobre la distribución del contenido de hielo y el rol hídrico de los glaciares de escombros. Sobre todo, en aquellas cuencas donde son los cuerpos de hielo predominante, donde dicha Información es clave para la gestión del agua y el desarrollo de políticas de mitigación del cambio climático.

Estos cuerpos de agua contribuyen a la regulación de los caudales de las cuencas andinas, sobre todo en épocas secas, cuando otros aportes como la nieve y las precipitaciones disminuyen. La retracción de los glaciares implica que irán reduciendo sus aportes, lo que podría cambiar la estacionalidad de ciertos cursos de agua y afectar la seguridad hídrica de poblaciones cordilleranas y actividades como la agricultura o la generación de energía. Ello en un contexto de creciente demanda debido a dinámicas demográficas, patrones de consumo cambiantes y competencia entre distintos usos productivos, vuelve crucial y pone de manifiesto la importancia de encontrar mejores estimaciones del volumen de agua preservado en las distintas regiones de los Andes Argentinos. De la mano con esta idea se pone en evidencia la necesidad de realizar más observaciones de volumen, así como también llegar a estimaciones de volumen más precisas para todas las masas de hielo con el fin de reducir las incertidumbres, y en consecuencia que la toma de decisiones sea sobre datos más precisos.

Anexo

Tabla A. Glaciares analizados y utilizados en esta tesis con datos de volumen de Hielo en los Andes del Sur, fuente de adquisición, coordenadas geográficas, elevación, área, volumen medido y volumen modelado por el experimento VAR. Recuadrados en negro los glaciares atípicos que fueron removidos para realizar el cálculo de volumen.

Región	Glaciar	Clasificación	Latitud	Longitud	Elevación	Área (km ²)	Vol. Med. (hm ³)	Vol. Mod. (hm ³)	Referencia
A. Desérticos (21°46' S a 31°S)	<i>Tronquitos</i>	Glaciar de Montaña	-28.36	-69.73	5324	2.2	73.2	76.48	Huenante et al 2018
	<i>El Potro</i>	Glaciar de Montaña	-28.39	-69.61	5425	4.8	293	229.35	Cassasa y Marangunic 2014
	<i>Los Amarillos</i>	Glaciar de Montaña	-29.3	-69.99	5330	1.1	23.78	29.12	Cabrera y Leiva 2008
	<i>Amarillo</i>	Glaciar de Montaña	-29.3	-70	5220	0.3	4.04	4.49	Cabrera y Leiva 2008
	<i>Toro 2</i>	Glaciar de Montaña	-29.33	-70.03	5050	0.1	0.3	0.54	Golder Associates 2009
	<i>Esperanza</i>	Glaciar de Montaña	-29.33	-70.04	5050	0	0.5	0.27	Golder Associates 2009
	<i>Toro 1</i>	Glaciar de Montaña	-29.33	-70.02	5225	0.1	0.8	0.59	Golder Associates 2009
	<i>Guanaco</i>	Glaciar de Montaña	-29.35	-70.02	5220	1.8	101	59.80	CEAZA 2009 (nota ¹)
	<i>Brown superior</i>	Glaciar de Montaña	-29.98	-69.64	5040	0.3	5.61	3.93	Cabrera y Leiva 2009 (nota ²)
		<i>Brown inferior</i>	Glaciar de Montaña	-29.98	-69.63	4740	0.1	0.13	0.37
	<i>Conconta N</i>	Glaciar de Montaña	-29.98	-69.64	4070	0.2	1.56	3.09	Cabrera y Leiva 2009 (nota ²)
	<i>Tapado</i>	Glaciar de Montaña	-30.14	-69.93	5330	2.1	54	69.20	Cassasa y Marangunic 2014
	<i>Agua Negra</i>	Glaciar de Montaña	-30.17	-69.81	4965	1	20.63	24.35	Pitte P., comunicación personal 2017
A. Centrales (31°S a 35°S)	<i>Juncal N</i>	Glaciar de Valle	-33.03	-70.1	5890	8	459.65	387.88	Huenante et al 2018
	<i>Del Rincón</i>	Glaciar de Montaña	-33.18	-70.28	4453	0.7	20	17.94	DGA, 2012b
	<i>La Paloma</i>	Glaciar de Montaña	-33.19	-70.27	4886	1.4	40	42.09	DGA, 2012b
	<i>Esmeralda</i>	Glaciar de Valle	-33.22	-70.21	5340	5.9	250	262.50	DGA, 2012b
	<i>Co. El Plomo</i>	Glaciar de Montaña	-33.24	-70.22	5309	1.3	40	35.36	DGA, 2012b
	<i>Yeso 2</i>	Glaciar de Montaña	-33.52	-69.86	5231	1.3	40	37.58	DGA, 2012b

<i>Bello</i>	Glaciar de Montaña	-33.52	-69.95	4924	3.8	150	148.66	DGA, 2012b
<i>Yeso</i>	Glaciar de Montaña	-33.53	-69.92	5159	1.7	50	52.65	DGA, 2012b
<i>Echaurren Norte A</i>	Glaciar de Montaña	-33.58	-70.13	3860	0	0.18	0.22	Huenante et al 2018
<i>Echaurren Norte B</i>	Glaciar de Montaña	-33.58	-70.13	3860	0.1	1.93	1.66	Huenante et al 2018
<i>Mesón Alto</i>	Glaciar de Montaña	-33.69	-70.04	4349	1.4	40	40.57	DGA, 2012b
<i>San Francisco</i>	Glaciar de Montaña	-33.75	-70.08	4015	1	30	26.49	DGA, 2012b
<i>Cipreses N</i>	Glaciar de Montaña	-34.53	-70.35	3833	15	830	878.56	DGA, 2012b
<i>Universidad</i>	Glaciar de Valle	-34.65	-70.34	4460	29	1940	2074.33	DGA, 2012b
<i>Rio Blanco N</i>	Glaciar de Montaña	-33.05	-70.15	5294	7.6	298.98	366.54	Huenante et al 2018
<i>Rio Blanco S</i>	Glaciar de Montaña	-33.05	-70.15	5294	9	389.5	452.18	Huenante et al 2018
<i>Vn. Tupungatito</i>	Glaciar de Valle	-33.4	-69.82	5676	7.7	791.2	372.17	Huenante et al 2018
<i>Marmolejo</i>	Glaciar de Montaña	-33.74	-69.91	6021	10.6	378.88	565.67	Huenante et al 2018
<i>Tinguiririca 3</i>	Glaciar de Valle	-34.78	-70.31	4653	3.2	89.7	119.42	Huenante et al 2018
<i>Tinguiririca 4</i>	Glaciar de Montaña	-34.79	-70.29	4382	1.9	52	60.81	Huenante et al 2018
<i>Tinguiririca 1</i>	Glaciar de Montaña	-34.82	-70.33	4309	3.9	187.4	154.27	Huenante et al 2018

A. del N. de la Pat. (35°S a 45°S)	<i>Sa. Velluda 1</i>	<i>Glaciar de Montaña</i>	-37.47	-71.42	3469	0.6	4.6	3.97	Huenante et al 2018
	<i>Sa. Velluda 2</i>	<i>Glaciar de Montaña</i>	-37.47	-71.42	3469	2.1	49.7	40.17	Huenante et al 2018
	<i>Sa. Velluda 3</i>	<i>Glaciar de Montaña</i>	-37.47	-71.42	3469	0.9	8.02	8.66	Huenante et al 2018
	<i>Sa. Velluda 4</i>	<i>Glaciar de Montaña</i>	-37.47	-71.42	3469	0.3	0.52	1.54	Huenante et al 2018
	<i>Sa. Velluda 5</i>	<i>Glaciar de Montaña</i>	-37.47	-71.42	3469	8.1	294.3	436.13	Huenante et al 2018
	<i>Vn. Callaqui</i>	<i>Glaciar de Montaña</i>	-37.93	-71.44	3081	6.8	144.01	318.15	Huenante et al 2018
	<i>Vn. Llaima 1</i>	<i>Glaciar de Montaña</i>	-38.7	-71.73	3015	1.5	4.32	22.89	Huenante et al 2018
	<i>Vn. Llaima 2</i>	<i>Glaciar de Montaña</i>	-38.7	-71.73	3015	0.4	1.76	2.38	Huenante et al 2018
	<i>Vn. Llaima 3</i>	<i>Glaciar de Montaña</i>	-38.7	-71.73	3015	2.8	21.2	69.78	Huenante et al 2018
	<i>Vn. Llaima 4</i>	<i>Glaciar de Montaña</i>	-38.7	-71.73	3015	2.2	19.4	43.62	Huenante et al 2018
	<i>Vn. Llaima 5</i>	<i>Glaciar de Montaña</i>	-38.7	-71.73	3015	7	80.62	340.64	Huenante et al 2018
	<i>Nev. Sollipulli</i>	<i>Glaciar de Montaña</i>	-38.98	-71.52	2188	11.4	3964.6	790.47	Huenante et al 2018
	<i>Vn. Villarica</i>	<i>Glaciar de Montaña</i>	-39.43	-71.92	2770	27.8	1180	3749.79	Huenante et al 2018
	<i>Vn Mocho-Choshuenco</i>	<i>Glaciar de Montaña</i>	-39.93	-72.02	2408	16.2	724.58	1460.20	Huenante et al 2018
	<i>Vn. Osorno</i>	<i>Glaciar de Montaña</i>	-41.1	-72.5	2637	5.9	85.2	248.73	Huenante et al 2018
	<i>Vurilochoes</i>	Glaciar de Montaña	-41.17	-71.93	3076	6.5	183.05	484.01	Zorzut et al 2020

	<i>Verde</i>	Glaciar de Valle	-41.19	71.9	3428	6.9	246.74	519.90	Zorzut et al 2020
	<i>Peulla</i>	Glaciar de Montaña	-41.19	71.9	2510	2	62.72	117.97	Zorzut et al 2020
	<i>Parra</i>	Glaciar de Montaña	-41.17	-71.93	2800	2.5	44.1	154.11	Zorzut et al 2020
	<i>Norte</i>	Glaciar de Montaña	-41.13	-71.9	3475	3.1	217.39	199.40	Zorzut et al 2020
	<i>Mistral</i>	Glaciar de Montaña	-41.13	-71.9	3475	1.4	80.5	76.95	Zorzut et al 2020
	<i>Manso</i>	Glaciar de Valle	-41.18	-71.87	3238	9.3	192.56	743.33	Zorzut et al 2020
	<i>Frías</i>	Glaciar de Valle	-41.17	-71.86	2976	6.9	146.74	519.90	Zorzut et al 2020
	<i>Castaño Overa</i>	Glaciar de Valle	-41.17	-71.83	2488	3.2	212.48	207.13	Zorzut et al 2020
	<i>Casa Pangué</i>	Glaciar de Valle	-41.15	-71.89	3428	6.3	100.54	466.23	Zorzut et al 2020
	<i>Blanco</i>	Glaciar de Valle	-41.16	-71.92	3286	10.9	-10.41	899.00	Zorzut et al 2020
	<i>Alerce</i>	Glaciar de Valle	-41.17	-71.83	2260	2.4	48.09	146.76	Zorzut et al 2020
A. del S. de la Pat.	<i>Glaciar Viedma</i>	Glaciar de Descarga	-49.31	-73.20	3459	945.7	421901.40	337794.94	Zorzut (nota ³)
(45°S a 54°S)	<i>Glaciar Upsala</i>	Glaciar de Descarga	-49.73	-73.26	3177	766.5	282150.17	252495.64	Zorzut (nota ³)
	<i>GLACIAR Perito Moreno</i>	Glaciar de Descarga	-50.63	-73.21	2822	243.0	43796.74	51396.54	Zorzut (nota ³)
	<i>Glaciar Segazzinni</i>	Glaciar de Descarga	-50.24	-73.43	2450	126.9	17999.22	20899.34	Zorzut (nota ³)
	<i>Glaciar Agassiz-Bolados</i>	Glaciar de Descarga	-50.04	-73.41	2936	77.7	5790.50	10590.41	Zorzut (nota ³)
	<i>Glaciar Ameghino</i>	Glaciar de Descarga	-50.49	-73.34	2823	57.6	7782.91	6999.50	Zorzut (nota ³)
	<i>Glaciar Frias y Grande</i>	Glaciar de Descarga	-50.66	-73.14	2759	42.9	5889.99	4651.35	Zorzut (nota ³)
	<i>Glaciar Mayo</i>	Glaciar de Descarga	-50.45	-73.38	2453	39.5	3977.00	4145.58	Zorzut (nota ³)
	<i>Glaciar Onelli</i>	Glaciar de Descarga	-50.13	-73.48	2720	31.2	2340.72	2988.59	Zorzut (nota ³)
	<i>N/A</i>	Glaciar de Descarga	-49.64	-73.20	2373	23.9	2263.31	2071.59	Zorzut (nota ³)
	<i>Glaciar Cerro de Mayo N</i>	Glaciar de Descarga	-50.31	-73.35	2137	21.8	3183.28	1823.04	Zorzut (nota ³)
	<i>Glaciar Aguilera</i>	Glaciar de Descarga	-50.31	-73.47	2342	18.1	1241.51	1403.29	Zorzut (nota ³)

Nota¹: CEAZA (2009) datos obtenidos del informe "Investigaciones glaciológicas sobre el Glaciar Guanaco en las cercanías del Proyecto Pascua-Lama, Periodos 2007-2008". Informe N 2009-07, CEAZA.

Nota²: Cabrera y Leiva (2009) datos obtenidos del informe "Monitoreo de glaciares del paso Conconta", Iglesia, San Juan, Argentina. Julio 2009. Instituto de Medio Ambiente, UNCUYO.

Nota³: A partir de las grillas de espesor de hielo de Millan et al. (2019) se calculó el volumen para los 12 glaciares de descarga del Campo de Hielo Sur que fluyen hacia la cuenca del río Santa Cruz utilizando la extensión de estos glaciares según el Inventario Nacional de Glaciares de Argentina (Zalazar et al., 2020).

Capítulo 5

5 Conclusiones y consideraciones finales

En esta tesis se ha calculado el volumen para todos los cuerpos de hielo de la Argentina. Además, se han realizado estudios complementarios relacionados con el espesor de hielo en los glaciares del Monte Tronador y el análisis de los métodos comúnmente utilizados en el cálculo de volumen de hielo de los glaciares. Los métodos desarrollados y los resultados obtenidos son relevantes para la comunidad científica, para las comunidades, los tomadores de decisiones y los gestores del agua de nuestro país. Aquí se integran los principales resultados y conclusiones de los diferentes capítulos de esta tesis.

Se destaca la importancia de encontrar una relación V-A local que se adapte a las distintas regiones de la cordillera de los Andes Argentinos, y su amplio abanico de masas de hielo. Para ello es clave realizar más observaciones del espesor de hielo. La escasa información sobre los glaciares no permite llegar a estimaciones de volumen precisas para los diferentes tipos de glaciares presentes. Las pocas mediciones realizadas a lo largo de Chile y de algunos glaciares de Argentina han sido para cálculos de volumen de más de 57 glaciares. En los Andes Desérticos la mayoría de las mediciones se han realizado por empresas mineras hay estudios también hechos por CONICET. Lo importante es que este tipo de estudios se hagan de una forma más intensiva y extensiva con financiamiento público para tener acceso libre por la sociedad. Si bien las políticas nacionales son diferentes en cada país es sumamente importante gestionar líneas de financiamiento para que estos estudios puedan darse en Argentina con mayor facilidad; ya que aunque existen estudios mundiales que proporcionan una idea del volumen de los cuerpos de hielo ninguno ha utilizado información local para cotejar sus resultados, excepto en algunos estudios regionales principalmente focalizados en los Andes Chilenos.

Se aplicó un modelo de inversión basado en la pendiente y velocidad superficial para estimar la distribución del espesor del hielo (Gantayat et al, 2014) en los glaciares del Monte Tronador y analizar el efecto que tiene la pendiente superficial en la distribución de hielo. Uno de los objetivos fue analizar la sensibilidad del modelo a la pendiente superficial. La precisión de los mapas de espesor del hielo derivados utilizando diferentes escalas de suavizado fue similar (BIAS ~ 0 y RMSE ~ 31 m), la distribución espacial del espesor del hielo muestra una mayor variabilidad según el tamaño del filtro. Sin embargo, la distribución del espesor del hielo muestra una mayor variabilidad dependiendo del tamaño del filtro. Es clave

encontrar la distancia correcta para integrar o “suavisar” la pendiente superficial. Con distancias pequeñas, la distribución de hielo tiene mucho “ruido” y los glaciares tienden a ser menos espesos. Por el contrario una distancia excesiva genera glaciares más espesos. Cuando las distancias son 3 o 4 veces el espesor de hielo, (rango de distancia teórico sugerido para que la deformación este controlado por el esfuerzo de corte de cizalla) se obtienen los mejores resultados.

El volumen total de hielo para los glaciares del Monte Tronador es de $4.8 \pm 2 \text{ km}^3$, con espesores de hielo medios y máximos de 75 m y 300 m respectivamente. Comparando los resultados obtenidos con otras distribuciones de espesor de hielo publicadas (Carrivick et al., 2016; Farinotti et al., 2019) se destaca que la precisión de los inventarios de glaciares usados como datos de entrada tiene un gran impacto en la distribución de espesor de hielo. Una correcta identificación de la extensión y divisorias de los glaciares es clave para mejorar la modelización del flujo de hielo, las estimaciones del volumen total de los glaciares y la cuantificación futura de los recursos hídricos en las regiones montañosas.

A partir del estudio realizado en los glaciares del Monte Tronador, se concluyó que la aplicación de filtros espaciales de paso bajo para suavizar la topografía de los glaciares y los datos de velocidad superficial podría mejorar significativamente los modelos de inversión. Permitiendo una mejor detección de los límites de los glaciares y reconstrucciones más precisas de la distribución del espesor del hielo. El proporcionado en esta tesis aporta una mejora significativa en la alimentación de los modelos de inversión numérica cuando se trata de recuperar la distribución del espesor del hielo a partir de las mediciones de superficie o de las características de los glaciares. Se requiere el uso de diferentes enfoques de modelado y una mayor cantidad de mediciones del espesor del hielo para la calibración y validación para cuantificar mejor el almacenamiento de agua en los glaciares y estimar los impactos del cambio climático en los Andes.

Se obtuvo el volumen de todos los cuerpos de hielo presentes en los Andes de Argentina según el Inventario Nacional de Glaciares usando el método de escalamiento de volumen-área. Se concluye para todos los Andes (VAT) un volumen de $776 \pm 310 \text{ km}^3$ para todas las masas de hielo con datos de volúmenes en los Andes de Argentina y Chile en una única relación V-A. Segundo se tuvo en cuenta las diferencias latitudinales por región (VAR) y el volumen de hielo total es levemente menor ($765 \pm 230 \text{ km}^3$); y tercero se dividió a las masas de hielo por su clasificación morfológica (VAC) y el volumen total es levemente mayor ($781 \pm 234 \text{ km}^3$).

Se concluye que el mejor experimento para obtener el volumen para todos los cuerpos de hielo de los Andes argentinos es el experimento VAR, por su facilidad y rapidez a la hora de utilizarlo. Del total del volumen de hielo en Argentina un 71 % está en los glaciares de descarga ($539 \pm 162 \text{ km}^3$); un 20 % en los glaciares de valle ($154 \pm 46 \text{ km}^3$); un 8 % en los glaciares de montaña ($60 \pm 18 \text{ km}^3$); y por último se divide un 1 % en glaciares de escombros activos e inactivos ($7 \pm 2 \text{ km}^3$); y un 1 % en manchones de nieve ($5 \pm 2 \text{ km}^3$). Las clases más numerosas de manchones de nieve y glaciares de escombros, representan el 37 % y 47 % del total de cuerpos de hielo en la Argentina, sin embargo tienen menos del 2% del volumen total de hielo presente en nuestro país.

Las estimaciones previas propuestas por diversos autores para una relación entre los volúmenes y las áreas de los glaciares deberían ser aplicadas con prudencia sobre los glaciares cordilleranos argentinos. Se analizaron los enfoques de escalamiento V-A según los diferentes autores (Bahr et al., 1997; Farinotti et al., 2009; Grinsted, 2013; Radić & Hock, 2010) utilizando la base de datos para las áreas del ING mostrando una subestimación en el volumen de hasta un 20 %. También se probó un enfoque de relación volumen-área para estimar el volumen total del hielo en los glaciares del Monte Tronador y los resultados mostraron que, utilizando los coeficientes establecidos empíricamente propuestos por (Bahr et al., 1997), el volumen total podría ser subestimado por lo menos en un 31 %. Por lo tanto, se sugiere cautela cuando se utiliza un enfoque simple, no calibrado para calcular el volumen de los glaciares en zonas sin mediciones del espesor del hielo.

Sin llegar a tener un volumen relevante, los glaciares de escombros son muy numerosos y aunque concentrados principalmente en los Andes Centrales de San Juan se distribuyen a lo largo del país. Es clave que su importancia como reserva de agua sea evaluada a escala local. En particular, en las cuencas del río San Juan y del río Mendoza, está la mayor concentración de glaciares de escombros del país (63 % con un volumen de 4.5 km^3). Sin embargo, en otras cuencas, con menor cobertura de glaciares o donde solo existen glaciares de escombros; la extensa distribución de los glaciares de escombros, indica que es crítico mejorar nuestro conocimiento sobre la distribución del contenido de hielo y su rol hídrico para la gestión del agua y el desarrollo de políticas de mitigación del cambio climático.

Los cuerpos de hielo contribuyen a la regulación de los caudales de las cuencas andinas, sobre todo en épocas secas, cuando otros aportes como la nieve y las precipitaciones disminuyen. La retracción de los glaciares implica que irán reduciendo sus aportes, lo que podría cambiar la estacionalidad de ciertos cursos de agua y afectar la seguridad hídrica de poblaciones cordilleranas y actividades como la agricultura o la generación de energía. Ello en un contexto de creciente demanda debido a dinámicas demográficas,

patrones de consumo cambiantes y competencia entre distintos usos productivos, los posiciona dentro de la agenda del siglo XXI. Aún existe mucho trabajo en adelante que permitan desarrollar modelos que se ajusten a las particularidades de cada glaciar y reproduzcan algunos procesos que aún son pobremente entendidos, tales como el espesor de hielo; la velocidad basal; el contenido de hielo en los glaciares de escombros; para ser usados como variables de entrada en los diferentes modelos.

También, es mi deseo que esta tesis incentive a las futuras generaciones de científicos en la toma de conciencia sobre la importancia de obtener datos de campo que permitirán la calibración en los modelos, ya que de nada sirve que el avance sea solo computacional sino es acompañado de datos para validar y ajustar los cálculos.

6 Bibliografía

- Arendt, A., Bolch, T., Cogley, J. G., Gardner, A., Hagen, J. O., Hock, R., Kaser, G., Pfeffer, W. T., Moholdt, G., & Paul, F. (2012). Randolph Glacier Inventory [v2. 0]: A Dataset of Global Glacier Outlines, Global Land Ice Measurements from Space, Boulder Colorado, USA. Digital Media.
- Arenson, L. U., & Jakob, M. (2010). The significance of rock glaciers in the dry Andes – A discussion of Azócar and Brenning (2010) and Brenning and Azócar (2010). *Permafrost and Periglacial Processes*, 21(3), 282-285. <https://doi.org/10.1002/ppp.693>
- Ayala, Á., Pellicciotti, F., Peleg, N., & Burlando, P. (2017). Melt and surface sublimation across a glacier in a dry environment: Distributed energy-balance modelling of Juncal Norte Glacier, Chile. *Journal of Glaciology*, 63(241), 803-822. <https://doi.org/10.1017/jog.2017.46>
- Ayala, Á., Farías-Barahona, D., Huss, M., Pellicciotti, F., McPhee, J., & Farinotti, D. (2020). Glacier runoff variations since 1955 in the Maipo River basin, in the semiarid Andes of central Chile. *The Cryosphere*, 14(6), 2005-2027. <https://doi.org/10.5194/tc-14-2005-2020>
- Azócar, G. F., & Brenning, A. (2010). Hydrological and geomorphological significance of rock glaciers in the dry Andes, Chile (27°-33°S). *Permafrost and Periglacial Processes*, 21(1), 42-53. <https://doi.org/10.1002/ppp.669>
- Bahr, D. B., Meier, M. F., & Peckham, S. D. (1997). The physical basis of glacier volume-area scaling. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 102(B9), 20355-20362. <https://doi.org/10.1029/97JB01696>
- Bahr, D. B., Pfeffer, W. T., & Kaser, G. (2014). Glacier volume estimation as an ill-posed inversion. *Journal of Glaciology*, 60(223). <https://doi.org/10.3189/2014JoG14J062>
- Bahr, D. B., Pfeffer, W. T., & Kaser, G. (2015). A review of volume-area scaling of glaciers: Volume-Area Scaling. *Reviews of Geophysics*, 53(1), 95-140. <https://doi.org/10.1002/2014RG000470>

- Barcaza, G., Nussbaumer, S., Tapia, G., Valdés, J., García, J., Videla, Y., Albornoz, A., & Arias, V. (2017). Glacier inventory and recent glacier variations in the Andes of Chile, South America. *Annals of Glaciology*, 58, 1-15. <https://doi.org/10.1017/aog.2017.28>
- Barsch, D. (1978). Active rock glaciers as indicators for discontinuous alpine permafrost. An example from the Swiss Alps. *Proceeding Third International Conference on Permafrost*, 1, 349-352.
- Bellisario, A., Ferrando, F., & Janke, J. (2013). Recursos hídricos en Chile: La relación crítica entre los glaciares y la minería para el manejo sustentable del agua. *Investigaciones Geográficas*, 46, Pág-3-24.
- Berthier, E., Vincent, C., Magnússon, E., Gunnlaugsson, A., Pitte, P., Le Meur, E., Masiokas, M., Ruiz, L., Pálsson, F., Belart, J. M. C., & Wagnon, P. (2014). Glacier topography and elevation changes derived from Pléiades sub-meter stereo images. *The Cryosphere*, 8(6), 2275-2291. <https://doi.org/10.5194/tc-8-2275-2014>
- Bodin, X., Rojas, F., & Brenning, A. (2010). Status and evolution of the cryosphere in the Andes of Santiago (Chile, 33.5°S). *Geomorphology*, 118, 453-464.
- Bonelli, S., Vicuña, S., Meza, F. J., Gironás, J., & Barton, J. (2014). Incorporating climate change adaptation strategies in urban water supply planning: The case of central Chile. *Journal of Water and Climate Change*, 5(3), 357. <https://doi.org/10.2166/wcc.2014.037>
- Braun, M. H., Malz, P., Sommer, C., Farías-Barahona, D., Sauter, T., Casassa, G., Soruco, A., Skvarca, P., & Seehaus, T. C. (2019). Constraining glacier elevation and mass changes in South America. *Nature Climate Change*, 9(2), 130-136.
- Bravo, C., Bozkurt, D., Gonzalez-Reyes, Á., Quincey, D. J., Ross, A. N., Farías-Barahona, D., & Rojas, M. (2019). Assessing Snow Accumulation Patterns and Changes on the Patagonian Icefields. *Frontiers in Environmental Science*, 7, 30. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2019.00030>

- Brenning, A. (2005a). Climatic and geomorphological controls of rock glaciers in the Andes of Central Chile [PhD Thesis, Humboldt-Universität zu Berlin, Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fakultät II].
<http://dx.doi.org/10.18452/15332>
- Brenning, A. (2005b). Geomorphological, hydrological and climatic significance of rock glaciers in the Andes of Central Chile (33-35°S). *Permafrost and Periglacial Processes*, 16(3), 231-240.
<https://doi.org/10.1002/ppp.528>
- Brugger, J., Dunbar, K. W., Jurt, C., & Orlove, B. (2013). Climates of anxiety: Comparing experience of glacier retreat across three mountain regions. *Emotion, Space and Society*, 6, 4-13.
<https://doi.org/10.1016/j.emospa.2012.05.001>
- Carrivick, J. L., Davies, B. J., James, W. H. M., Quincey, D. J., & Glasser, N. F. (2016). Distributed ice thickness and glacier volume in southern South America. *Global and Planetary Change*, 146, 122-132.
<https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2016.09.010>
- Casassa, G. (1992). Radio-echo sounding of Tyndall Glacier, southern Patagonia. *Bulletin of Glacier Research*, 10: 69-74.
- Casassa, G., y Rivera, A. (1998). Digital radio-echo sounding at Tyndall glacier, Patagonia. *Anales del Instituto de la Patagonia, Serie Ciencias Naturales*, 26: 129-135.
- Chen, J., & Ohmura, A. (1990). Estimation of Alpine Glacier Water Resources and their Change Since the 1870s. *IAHS Publ.*, 193.
- Cogley, J. G. (2009). A more complete version of the World Glacier Inventory. *Annals of Glaciology*, 50(53), 32-38. <https://doi.org/10.3189/172756410790595859>
- RGI Consortium (2017). Randolph Glacier Inventory 6.0. Technical report, RGI Consortium. doi: 10.7265/N5-RGI-60
- Corte, A. E. (1976). Rock glaciers. *Biuletyn Peryglacjalny* 26: 175-197.

Cuffey, K. M., & Paterson, W. S. B. (2010). *The physics of glaciers*, 4th Edn. Amsterdam: Butterworth-Heinemann/Elsevier.

Davies, B. J., & Glasser, N. F. (2012). Accelerating shrinkage of Patagonian glaciers from the Little Ice Age (~AD 1870) to 2011. *Journal of Glaciology*, 58(212), 1063-1084.
<https://doi.org/10.3189/2012JoG12J026>

DGA. (2009). *Estrategia Nacional de Glaciares*. Realizado por Centro de Estudios Científicos (CECS) y Dirección General de Aguas (DGA), Ministerio de Obras Públicas, Santiago de Chile. S.I.T. N° 205.

DGA (2011). *Estimación de volúmenes de hielo en glaciares de Chile central*. Realizado por Centro de Estudios Científicos (CECS) y Dirección General de Aguas (DGA), Ministerio de Obras Públicas, Santiago de Chile, S.I.T. N° 264.

DGA. (2012a). *Variaciones recientes de glaciares en respuesta al cambio climático: Características glaciológicas de los glaciares San Rafael, Nef y Colonia, Campo de Hielo Norte*. Realizado por Centro de Estudios Científicos (CECS) y Dirección General de Aguas (DGA), Ministerio de Obras Públicas, Santiago de Chile, S.I.T. N° 302.

DGA. (2012b). *Estimación de volúmenes de hielo mediante radio eco sondaje en Chile Central*. Realizado por Centro de Estudios Científicos (CECS) y Dirección General de Aguas (DGA), Ministerio de Obras Públicas, Santiago de Chile, S.I.T. N° 288.

DGA. (2014). *Estimación de volúmenes de hielo mediante sondajes de radar en zonas Norte, Central y Sur*. Realizado por Geoestudios Ltda. y Dirección General de Aguas (DGA), Ministerio de Obras Públicas, Santiago de Chile, S.I.T. N° 338.

DGA (2016). *Línea de base glaciológica del sector norte de Campo de Hielo Sur: Glaciares Jorge Montt, Témpano y O'Higgins*. Realizado por Centro de Estudios Científicos (CECS) y Dirección General de Aguas (DGA), Ministerio de Obras Públicas, Chile. S.I.T. N° 404.

Erasov, N. V. (1968). Method to determine the volume of mountain glaciers. *Mater. Glyatsiol. Issled*, 14, 307-308.

- Farinotti, D., Brinkerhoff, D. J., Clarke, G. K. C., Fürst, J. J., Frey, H., Gantayat, P., Gillet-Chaulet, F., Girard, C., Huss, M., Leclercq, P. W., Linsbauer, A., Machguth, H., Martin, C., Maussion, F., Morlighem, M., Mosbeux, C., Pandit, A., Portmann, A., Rabatel, A., Andreassen, L. M. (2017). How accurate are estimates of glacier ice thickness? Results from ITMIX, the Ice Thickness Models Intercomparison experiment. *The Cryosphere*, 11(2), 949-970. <https://doi.org/10.5194/tc-11-949-2017>
- Farinotti, D., Huss, M., Bauder, A., Funk, M., & Truffer, M. (2009). A method to estimate the ice volume and ice-thickness distribution of alpine glaciers. *Journal of Glaciology*, 55(191), 422-430. <https://doi.org/10.3189/002214309788816759>
- Farinotti, D., Huss, M., Fürst, J. J., Landmann, J., Machguth, H., Maussion, F., & Pandit, A. (2019). A consensus estimate for the ice thickness distribution of all glaciers on Earth. *Nature Geoscience*, 12, 168-173. <https://doi.org/10.1038/s41561-019-0300-3>
- Frey, H., Machguth, H., Huss, M., Huggel, C., Bajracharya, S., Bolch, T., Kulkarni, A., Linsbauer, A., Salzmann, N., & Stoffel, M. (2014). Estimating the volume of glaciers in the Himalayan–Karakoram region using different methods. *The Cryosphere*, 8(6), 2313-2333. <https://doi.org/10.5194/tc-8-2313-2014>
- Fuenzalida, H. A., Sánchez, R., & Garreaud, R. D. (2005). A climatology of cutoff lows in the Southern Hemisphere. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 110(D18). <https://doi.org/10.1029/2005JD005934>
- Gantayat, P., Kulkarni, A. V., & Srinivasan, J. (2014). Estimation of ice thickness using surface velocities and slope: Case study at Gangotri Glacier, India. *Journal of Glaciology*, 60(220), 277-282. <https://doi.org/10.3189/2014JoG13J078>
- Gardelle, J., Berthier, E., & Arnaud, Y. (2012). Impact of resolution and radar penetration on glacier elevation changes computed from DEM differencing. *Journal of Glaciology*, 58(208), 419-422. <https://doi.org/10.3189/2012JoG11J175>

- Gärtner-Roer, I., World Glacier Monitoring Service (WGMS), & Zemp, M. (2016). Glacier Thickness Database 2.0 (World Glacier Monitoring Service, 2016) [Csv-files, zipped]. World Glacier Monitoring Service (WGMS). <https://doi.org/10.5904/WGMS-GLATHIDA-2016-07>
- Gilbert, J. S., Stasiuk, M. V., Lane, S. J., Adam, C. R., Murphy, M. D., Sparks, R. S. J., & Naranjo, J. A. (1996). Non-explosive, constructional evolution of the ice-filled caldera at Volcán Sollipulli, Chile. *Bulletin of Volcanology*, 58(1), 67-83.
- GlaThiDa Consortium. (2019). Glacier Thickness Database (GlaThiDa) Global Terrestrial Network for Glaciers. World Glacier Monitoring Service. <https://doi.org/10.5904/wgms-glathida-2019-03>
- Gourlet, P., E. Rignot, A. Rivera & G. Casassa (2015): "Ice thickness of the northern half of the Patagonia Icefields of South America from high-resolution airborne gravity surveys". *Geophysical Research Letters*, 43-1, doi: 10.1002/2015GL066728
- Grinsted, A. (2013). An estimate of global glacier volume. *The Cryosphere*, 7(1), 141-151. <https://doi.org/10.5194/tc-7-141-2013>
- Huenante, J. (2018). Procesamiento y análisis de radio eco-sondaje (RES) sobre glaciares chilenos: Relación entre volumen de hielo y área superficial. <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/151259>
- Haeberli, W. (1985). Creep of mountain permafrost: Internal structure and flow of alpine rock glaciers. *Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie an der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich*, 77.
- Haeberli, W., & Hoelzle, M. (1995). Application of inventory data for estimating characteristics of and regional climate-change effects on mountain glaciers: A pilot study with the European Alps. *Annals of Glaciology*, 21, 206-212. <https://doi.org/10.1017/S0260305500015834>
- Halla, C., Blöthe, J. H., Tapia Baldis, C., Trombotto Liaudat, D., Hilbich, C., Hauck, C., & Schrott, L. (2021). Ice content and interannual water storage changes of an active rock glacier in the dry Andes of Argentina. *The Cryosphere*, 15(2), 1187-1213. <https://doi.org/10.5194/tc-15-1187-2021>

- Huss, M., & Farinotti, D. (2012). Distributed ice thickness and volume of all glaciers around the globe. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 117(F4), F04010. <https://doi.org/10.1029/2012JF002523>
- Huss, M., & Hock, R. (2018). Global-scale hydrological response to future glacier mass loss. *Nature Climate Change*, 8. <https://doi.org/10.1038/s41558-017-0049-x>
- IANIGLA. (2010). Inventario Nacional de Glaciares y Ambiente Periglacial: Fundamentos cronograma de ejecución. Technical report, Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, Instituto Argentino de Nivología, Glaciología y Ciencias Ambientales.
- IANIGLA-ING. (2014). Manual para la realización del Inventario Nacional de Glaciares. Castro, M., Delgado, S., Ferri H., L. y Zalazar, L. Mendoza, Argentina, ING, IANIGLA-CONICET.
- Ikeda, A., Matsuoka, N., and Sueyoshi, T. 2004. Permafrost survey in the source region of the Yellow River: A preliminary report. *Seppyo* 66: 235-239. (J).
- IPCC (Ed.). (2001). *Climate change 2001: Impacts, adaptation, and vulnerability: contribution of Working Group II to the third assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (by J. McCarthy, O. Canziani, N. Leary, D. Dokken, and K. White). Cambridge University Press.
- Janke, J. R., Ng, S., & Bellisario, A. (2017). An inventory and estimate of water stored in firn fields, glaciers, debris-covered glaciers, and rock glaciers in the Aconcagua River Basin, Chile. *Geomorphology*, 296, 142-152. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2017.09.002>
- Johansen, K. S., Alfthan, B., Baker, E., Hesping, M., Schoolmeester, T., & Verbist, K. (2018). *The Andean glacier and water atlas: The impact of glacier retreat on water resources*. UNESCO Publishing.
- Jones, D. B., Harrison, S., Anderson, K., & Betts, R. A. (2018). Mountain rock glaciers contain globally significant water stores. *Scientific Reports*, 8(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-018-21244-w>
- Jones, Harrison, S., Anderson, K., & Whalley, B. (2019). Rock glaciers and mountain hydrology: A review. *Earth-Science Reviews*, 193, 66-90. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.04.001>

- Kamb, B., & Echelmeyer, K. A. (1986). Stress-Gradient Coupling in Glacier Flow: I. Longitudinal Averaging of the Influence of Ice Thickness and Surface Slope. *Journal of Glaciology*, 32(111), 267-284. <https://doi.org/10.3189/S0022143000015604>
- Kargel, J. S., Leonard, G. J., Bishop, M. P., Kääb, A., & Raup, B. H. (Eds.). (2014). *Global Land Ice Measurements from Space*. Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-79818-7>
- Kienholz, C., Hock, R., & Arendt, A. A. (2013). A new semi-automatic approach for dividing glacier complexes into individual glaciers. *Journal of Glaciology*, 59(217), 925-937. <https://doi.org/10.3189/2013JoG12J138>
- Linsbauer, A., Paul, F., & Haeberli, W. (2012). Modeling glacier thickness distribution and bed topography over entire mountain ranges with GlabTop: Application of a fast and robust approach: REGIONAL-SCALE MODELING OF GLACIER BEDS. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 117(F3), n/a-n/a. <https://doi.org/10.1029/2011JF002313>
- Lliboutry, L., Williams, R., & Ferrigno, J. (1998). *Glaciers of Chile and Argentina*. Geological survey professional paper, 1386(1998), 1103.
- Macheret, Y. Y., & Zhuravlev, A. B. (1982). Radio Echo-Sounding of Svalbard Glaciers. *Journal of Glaciology*, 28(99), 295-314. <https://doi.org/10.3189/S0022143000011643>
- Masiokas, M. H., Rabatel, A., Rivera, A., Ruiz, L., Pitte, P., Ceballos, J. L., Barcaza, G., Soruco, A., Bown, F., Berthier, E., Dussaillant, I., & MacDonell, S. (2020). A Review of the Current State and Recent Changes of the Andean Cryosphere. *Frontiers in Earth Science*, 8, 99. <https://doi.org/10.3389/feart.2020.00099>
- Maussion, F., Butenko, A., Champollion, N., Dusch, M., Eis, J., Fourteau, K., Gregor, P., Jarosch, A. H., Landmann, J., Oesterle, F., Recinos, B., Rothenpieler, T., Vlug, A., Wild, C. T., & Marzeion, B. (2019).

- The Open Global Glacier Model (OGGM) v1.1. *Geoscientific Model Development*, 12(3), 909-931.
<https://doi.org/10.5194/gmd-12-909-2019>
- Meier, M., & Bahr, D. (1996). Counting Glaciers: Use of Scaling Methods to Estimate the Number and Size Distribution of the Glaciers of the World. *Glaciers, Ice Sheets and Volcanoes: A Tribute to Mark F. Meier*, 96–27.
- Meza, F. J., Wilks, D. S., Gurovich, L., & Bambach, N. (2012). Impacts of Climate Change on Irrigated Agriculture in the Maipo Basin, Chile: Reliability of Water Rights and Changes in the Demand for Irrigation. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 138(5), 421-430.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0000216](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000216)
- Millan, R., Rignot, E., Rivera, A., Martineau, V., Mougnot, J., Zamora, R., Uribe, J., Lenzano, G., Fleurian, B. D., Li, X., Gim, Y., & Kirchner, D. (2019). Ice Thickness and Bed Elevation of the Northern and Southern Patagonian Icefields. *Geophysical Research Letters*, 46(12), 6626-6635.
<https://doi.org/10.1029/2019GL082485>
- Monitoreo de glaciares Amarillo y Los Amarillos Pascua-Lama, Chile-Argentina. (s. f.). Recuperado 10 de noviembre de 2021, de <http://serviciosmineria.sanjuan.gob.ar/pascualama/glaciarguanaco/Informes/CeazaGuanaco2008.pdf>
- Monnier, S., & Kinnard, C. (2013). Internal structure and composition of a rock glacier in the Andes (upper Choapa valley, Chile) using borehole information and ground-penetrating radar. *Annals of Glaciology*, 54, 61-72. <https://doi.org/10.3189/2013AoG64A107>
- Morlighem, M., Rignot, E., Seroussi, H., Larour, E., Ben Dhia, H., & Aubry, D. (2011). A mass conservation approach for mapping glacier ice thickness: BALANCE THICKNESS. *Geophysical Research Letters*, 38(19), n/a-n/a. <https://doi.org/10.1029/2011GL048659>

- Oberreuter A, J., Uribe P, J., Zamora M, R., Gacitúa C, G., & Rivera I, A. (2014). Mediciones de espesor de hielo en Chile usando radio eco sondaje: Ice thickness measurements in Chile using radio echo sounding. *Geoacta*, 39(1), 108-122.
- Oerlemans, J. (2001). *Glaciers & Climate Change* (1.^a ed.). CRC Press.
- Oyarzún, J., & Oyarzún, R. (2011). Sustainable development threats, inter-sector conflicts and environmental policy requirements in the arid, mining rich, northern Chile territory. *Sustainable Development*, 19(4), 263-274. <https://doi.org/10.1002/sd.441>
- Perucca, L., & Esper Angillieri, M. Y. (2011). Glaciers and rock glaciers' distribution at 28° SL, Dry Andes of Argentina, and some considerations about their hydrological significance. *Environmental Earth Sciences*, 64(8), 2079-2089. <https://doi.org/10.1007/s12665-011-1030-z>
- Pitte, P., Masiokas, M., Gargantini, H., Ruiz, L., Berthier, E., Ferri Hidalgo, L., Zalazar, L., Dussailant, I., Viale, M., Zorzut, V., & al, et. (2022). Recent mass-balance changes of Agua Negra glacier (30°S) in the Desert Andes of Argentina. *Journal of Glaciology*, 68(272), 1197-1209. <https://doi.org/10.1017/jog.2022.22>
- Radić, V., & Hock, R. (2006). Modeling future glacier mass balance and volume changes using ERA-40 reanalysis and climate models: A sensitivity study at Storglaciären, Sweden. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 111(F3). <https://doi.org/10.1029/2005JF000440>
- Radić, V., Hock, R., & Oerlemans, J. (2007). Volume–area scaling vs flowline modelling in glacier volume projections. *Annals of Glaciology*, 46(1), 234-240. <https://doi.org/10.3189/172756407782871288>
- Radić, V., & Hock, R. (2010). Regional and global volumes of glaciers derived from statistical upscaling of glacier inventory data. *Journal of Geophysical Research*, 115(F1). <https://doi.org/10.1029/2009JF001373>

- Radić, V., Bliss, A., Beedlow, A. C., Hock, R., Miles, E., & Cogley, J. G. (2013). Regional and global projections of twenty-first century glacier mass changes in response to climate scenarios from global climate models. *Climate Dynamics*, 42(1-2), 37-58. <https://doi.org/10.1007/s00382-013-1719-7>
- RGI Consortium. (2017). Randolph Glacier Inventory 6.0. NSIDC. <https://doi.org/10.7265/N5-RGI-60>
- Rivera, A., Casassa, G., Acuña, C. & H. Lange (2000): "Variaciones recientes de glaciares en Chile". *Revista Investigaciones geográficas*, 34: 25-52.
- Rivera, A., Casassa, G., & Acuña, C. (2001). Mediciones de espesor en glaciares de Chile centro-sur. *Investigaciones Geográficas*, 35, 67-100. <https://doi.org/10.5354/0719-5370.2001.27738>
- Rivera, A., & Casassa, G. (2002). Detection of ice thickness using radio-echo sounding on the Southern Patagonia Icefield. *The Patagonian icefields: a unique natural laboratory for environmental and climate change studies*. New York, Kluwer Academic/Plenum Publishers, 101-115.
- Rivera, A., Bown, F., Mella, R., Wendt, J., Casassa, G., Acuña, C., Rignot, E., Clavero, J., & Brock, B. (2006). Ice volumetric changes on active volcanoes in southern Chile. *Annals of Glaciology*, 43, 111-122.
- Rivera, A., Aravena, J. C., Urra, A., & Reid, B. (2021): En Castilla, J. C., Armesto, J. J., y Martínez-Harms, M. J. (Eds.). *Conservación en la Patagonia chilena: evaluación del conocimiento, oportunidades y desafíos*. Santiago, Chile: Ediciones Universidad Católica, Santiago de Chile, Capítulo 15, pp 473-491.
- Ruiz, L., Berthier, E., Masiokas, M., Pitte, P., & Villalba, R. (2015). First surface velocity maps for glaciers of Monte Tronador, North Patagonian Andes, derived from sequential Pléiades satellite images. *Journal of Glaciology*, 61(229), 908-922. <https://doi.org/10.3189/2015JoG14J134>
- Ruiz, L., Berthier, E., Viale, M., Pitte, P., & Masiokas, M. H. (2017). Recent geodetic mass balance of Monte Tronador glaciers, northern Patagonian Andes. *The Cryosphere*, 11(1), 619-634. <https://doi.org/10.5194/tc-11-619-2017>

- Ruiz, L., Pitte, P., Rivera, A., Schaefer, M., Masiokas, M. (2022). "Current State and Recent Changes of Glaciers in the Patagonian Andes (37 °S to 55 °S)". In: Mataloni, G., Quintana, R.D. (Eds.). *Freshwaters and Wetlands of Patagonia. Natural and Social Sciences of Patagonia*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-10027-7_4
- Schaffer, N., MacDonell, S., Réveillet, M., Yáñez, E., & Valois, R. (2019). Rock glaciers as a water resource in a changing climate in the semiarid Chilean Andes. *Regional Environmental Change*, 19(5), 1263-1279. <https://doi.org/10.1007/s10113-018-01459-3>
- Schoolmeester, T., Alfthan, B., Baker, E., Johansen, K., Hesping, M., Johansen, K. S., & Verbist, K. (2018). *The Andean Glacier and Water Atlas: The Impact of Glacier Retreat on Water Resources*.
- Sheriff, R. E., & Geldart, L. P. (2006). *Exploration seismology* (2.^a ed.). Cambridge Univ. Press.
- Singh, S., Rathore, B., Bahuguna, I., Al, R., & Prof, A. (2012). Estimation of Glacier Ice Thickness using Ground Penetrating Radar in the Himalayan region. *Current science*, 103, 68-73.
- Souvignet, M., Oyarzún, R., Verbist, K. M. J., Gaese, H., & Heinrich, J. (2012). Hydro-meteorological trends in semi-arid north-central Chile (29–32°S): Water resources implications for a fragile Andean region. *Hydrological Sciences Journal*, 57(3), 479-495. <https://doi.org/10.1080/02626667.2012.665607>
- Stuefer, M. (1999). Investigations on mass balance and dynamics of Moreno Glacier based on field measurements and satellite imagery. na.
- Stuefer, M., Rott, H., & Skvarca, P. (2007). Glaciar Perito Moreno, Patagonia: Climate sensitivities and glacier characteristics preceding the 2003/04 and 2005/06 damming events. *Journal of Glaciology*, 53(180), 3-16. <https://doi.org/10.3189/172756507781833848>
- Trombotto, D. (2002). Inventory of fossil cryogenic forms and structures in Patagonia and the mountains of Argentina beyond the Andes. *South African Journal of Science*, 98, 171-180.

- Trombotto, D., Buk, E., & Hernández, J. (1999). Rock glaciers in the Southern Central Andes (app. 33°—34 ° S), Cordillera Frontal, Mendoza, Argentina. *Bamberger Geographische Schriften*, 19, 145-173.
- Valdés-Pineda, R., Pizarro, R., García-Chevesich, P., Valdés, J. B., Olivares, C., Vera, M., Balocchi, F., Pérez, F., Vallejos, C., Fuentes, R., Abarza, A., & Helwig, B. (2014). Water governance in Chile: Availability, management and climate change. *Journal of Hydrology*, 519, 2538-2567. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.04.016>
- Vieli, A., Funk, M., & Blatter, H. (2000). Tidewater glaciers: Frontal flow acceleration and basal sliding. *Annals of Glaciology*, 31(1), 217-221. <https://doi.org/10.3189/172756400781820417>
- Viale, M., & Nuñez, M. N. (2011). Climatology of Winter Orographic Precipitation over the Subtropical Central Andes and Associated Synoptic and Regional Characteristics. *Journal of Hydrometeorology*, 12(4), 481-507. <https://doi.org/10.1175/2010JHM1284.1>
- Viale, M., Bianchi, E., Cara, L., Ruiz, L. E., Villalba, R., Pitte, P., Masiokas, M., Rivera, J., & Zalazar, L. (2019). Contrasting Climates at Both Sides of the Andes in Argentina and Chile. *Frontiers in Environmental Science*, 7, 69. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2019.00069>
- Vuille, M., Franquist, E., Garreaud, R., Lavado Casimiro, W. S., & Cáceres, B. (2015). Impact of the global warming hiatus on Andean temperature: GLOBAL WARMING HIATUS IN THE ANDES. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 120(9), 3745-3757. <https://doi.org/10.1002/2015JD023126>
- Vuille, M., Carey, M., Huggel, C., Buytaert, W., Rabatel, A., Jacobsen, D., Soruco, A., Villacis, M., Yarleque, C., Timm, O. E., Condom, T., Salzmann, N., & Sicart, J.-E. (2018). Rapid decline of snow and ice in the tropical Andes – Impacts, uncertainties and challenges ahead. *Earth-Science Reviews*, 176, 195-213. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.09.019>
- Wilson, R., Glasser, N. F., Reynolds, J. M., Harrison, S., Anaconda, P. I., Schaefer, M., & Shannon, S. (2018). Glacial lakes of the Central and Patagonian Andes. *Global and Planetary Change*, 162, 275-291. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2018.01.004>

- World Glacier Monitoring Service (WGMS). (1989). World glacier inventory: Status 1988. Edited by W. Haeberli et al., IAHS(ICSU)/UNEP/UNESCO, World Glacier Monit. Serv., Zürich.
- Zalazar, L., Ferri Hidalgo, L., Castro, M., Gargantini, H., Gimenez, M., Pitte, P., Ruiz, L., Masiokas, M., & Villalba, R. (2017). Glaciares de Argentina: Resultados Preliminares del Inventario Nacional de Glaciares. *Glaciers of Argentina: Preliminary Results of the National Inventory of Glaciers*. *Revista de Glaciares y Ecosistemas de Montañas*, 2, 13-22. <https://doi.org/10.36580/rgem.i2.13-22>
- Zalazar, L., Ferri, L., Castro, M., Gargantini, H., Gimenez, M., Pitte, P., Ruiz, L., Masiokas, M., Costa, G., Villalba, R., & al, et. (2020). Spatial distribution and characteristics of Andean ice masses in Argentina: Results from the first National Glacier Inventory. *Journal of Glaciology*, 1-12. <https://doi.org/10.1017/jog.2020.55>
- Zamora, R., Ulloa, D., Garcia, G., Mella, R., Uribe, J., Wendt, J., Rivera, A., Gacitúa, G., & Casassa, G. (2009). Airborne radar sounder for temperate ice: Initial results from Patagonia. *Journal of Glaciology*, 55(191), 507-512.
- Zevenbergen, L. W., & Thorne, C. R. (1987). Quantitative analysis of land surface topography. *Earth Surface Processes and Landforms*, 12(1), 47-56. <https://doi.org/10.1002/esp.3290120107>
- Zorzut, V., Ruiz, L., Rivera, A., Pitte, P., Villalba, R., & Medrzycka, D. (2020). Slope estimation influences on ice thickness inversion models: A case study for Monte Tronador glaciers, North Patagonian Andes. *Journal of Glaciology*, 1-10. <https://doi.org/10.1017/jog.2020.64>