



UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA

METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN DE GLACIARES COMO PATRIMONIO  
GEOLÓGICO, CON APLICACIÓN EN LA CORDILLERA MAULINA, REGIÓN DEL  
MAULE, CHILE.

TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGÍSTER EN CIENCIAS, MENCIÓN GEOLOGÍA

EMIL STEFANI SIGNORIO

PROFESOR GUÍA:  
FRANCISCO HERVÉ ALLAMAND

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:  
ANDRÉS RIVERA IBÁÑEZ  
CAMILO RADA GIACAMAN  
JAMES MCPHEE TORRES  
REYNALDO CHARRIER GONZÁLEZ

Este trabajo ha sido financiado por la Fundación Geoparque Pillanmapu.

SANTIAGO DE CHILE

2022

**RESUMEN DE LA TESIS PARA OPTAR AL  
GRADO DE MAGÍSTER EN CIENCIAS,  
MENCION GEOLOGÍA**

**POR:** Emil Stefani Signorio

**FECHA:** 2022

**PROFESOR GUÍA:** Francisco Hervé Allamand

**METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN DE GLACIARES COMO PATRIMONIO  
GEOLÓGICO, CON APLICACIÓN EN LA CORDILLERA MAULINA, REGIÓN DEL  
MAULE, CHILE.**

En las últimas tres décadas, el interés de geocientistas por estudiar el patrimonio geológico ha crecido sostenidamente. Prueba de ello son los centenares de metodologías que se han propuesto para evaluarlo. Muchas de estas han sido específicamente diseñadas para evaluar elementos particulares de la geodiversidad, como el patrimonio paleontológico o geomorfológico. A pesar de que los glaciares poseen una serie de rasgos que los diferencian de otros elementos de la geodiversidad, a la fecha no existe ninguna metodología que sea exclusiva para la evaluación de glaciares. Este trabajo propone, entonces, la primera metodología para evaluar glaciares como patrimonio geológico.

La metodología desarrollada consiste en 6 pasos que permiten, en última instancia, la propuesta de estrategias de gestión para glaciares. Uno de los pasos, quizás el más importante, es la evaluación cuantitativa, la cual valúa de 0 a 100 puntos al glaciar en cuestión bajo cuatro indicadores distintos: Valor Científico (VC), Peligrosidad Asociada (PA), Riesgo de Degradación (RD) y Valor de Uso (VU).

La metodología fue aplicada en los glaciares presentes dentro del territorio del proyecto Geoparque Pillanmapu, es decir, en prácticamente la totalidad de la cordillera de la región del Maule, Chile. Dicho territorio cuenta con 131 glaciares, de los cuales 76 corresponden a glaciaretos, 32 a glaciares rocosos y 23 a glaciares de montaña. Estos suman una superficie y volumen total de 19,61 km<sup>2</sup> y 0,43 km<sup>3</sup> respectivamente. Adicionalmente, se encontró un espesor promedio de 21,3 m en glaciares de montaña, 13,3 m en glaciares de roca y 7,9 m en glaciaretos. Por otro lado, los glaciares de la cordillera maulina han retrocedido sostenidamente, al menos desde 1950, a una tasa de pérdida de superficie englaciada y de volumen de -1,1 km<sup>2</sup> anuales y -0,02 km<sup>3</sup> anuales respectivamente.

Se aplicó la evaluación cuantitativa a los glaciares Volcán Planchón Peteroa Sur (VPPS) y Norte (VPPN), ubicados en la ladera poniente del Vn. Peteroa. En particular, en el glaciar VPPS se realizó un balance de masa geodésico, encontrándose una ablación anual promedio de  $-1,6 \pm 0,2$  m w.e. entre el 2000 y el 2022. En base a este y otros resultados se encontró que el glaciar VPPS posee un VC de 24,5, una PA de 22,1, un RD de 86,8 y un VU de 60,8 puntos. El glaciar VPPN un VC de 44,8, una PA de 28,4, un RD de 74,8 y un VU de 57,0 puntos. Un análisis cualitativo de dichos resultados permitió la generación de propuestas de estrategias de gestión para ambos glaciares. De manera generalizada, estas consisten en la sugerencia de estudios de aportes hídricos y peligro geológico, en la sensibilización de las comunidades que habitan aguas abajo de estos glaciares respecto a estas materias, algunos lineamientos generales sobre los usos que se les puede dar y, finalmente, en la proposición del VPPN como geositio oficial del proyecto Geoparque Pillanmapu y de la Sociedad Geológica de Chile.

A Matías Díaz, arriero local que  
será recordado por su  
profesionalismo, integridad  
y compromiso.

## AGRADECIMIENTOS

Las personas que menciono a continuación destacan por ser increíbles profesionales. Me llevo una gran sorpresa al ver el nivel de prolijidad y excelencia con la que desempeñan sus labores como científicos. A su vez, todos aceptaron ayudar en un proyecto que no les traería grandes beneficios personales y, sin embargo, lo han hecho con el mismo nivel de compromiso que si se tratase de uno propio.

---

A la Fundación Geoparque Pillanmapu, por apoyar el desarrollo de esta tesis.

A los integrantes de la comisión, que decidieron guiar y apoyar el desarrollo de un trabajo de investigación poco ortodoxo. A Francisco Hervé, por el apoyo incondicional, sabiduría y calidad humana. A Andrés Rivera y Camilo Rada, por las numerosas horas que pasaron atendiendo mis dudas glaciológicas, desde las más básicas a las más complejas. Los tres son verdadera fuente de inspiración para seguir desarrollándome como geocientista.

A Catalina Medina, con quién diseñamos las cámaras autosuficientes que registraron un año de retroceso glacial en la cordillera maulina.

A Rodrigo Pérez, quién cubrió mis espaldas durante incontables horas de trabajo para que yo pudiera desarrollar mis investigaciones.

A Felipe Ugalde, por las decenas de veces que lo llamé con alguna duda y supo responderlas siempre con paciencia y tino.

A Cristian Peralta, por toda la ayuda en los levantamientos de terreno y procesamiento de datos, pero sobre todo por su buenísima disposición.

A David Cossio, por la realización del documental y la pasión que entrega a cada minuto de edición.

A todas las personas que nos acompañaron en las campañas de terreno. Los arrieros, Marcos Corvalán, Rafael Corvalán y Matías Díaz. Los porteadores de equipo, Vicente Fuenzalida y Allan Guiloff. Al montañista y geólogo, David Valenzuela.

A mi tío, Ernesto Pérez, por mostrarme la magia de la geología.

Finalmente, a mi madre y a mi padre, a quienes debo todo.

## TABLA DE CONTENIDO

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Formulación del estudio propuesto .....	1
1.2 Objetivos.....	2
1.2.1 Objetivo general .....	2
1.2.2    Objetivos específicos.....	3
1.3 Hipótesis de trabajo .....	3
1.4 Ubicación y accesos .....	3
CAPÍTULO 2. MARCO GEOLÓGICO .....	5
2.1 Marco de evolución geotectónica regional.....	5
2.1.1 Generalidades .....	5
2.1.2 Evolución geotectónica del relieve andino de Chile Central.....	6
2.2 Marco geológico regional.....	8
2.2.1 Unidades estratificadas .....	8
2.2.2 Unidades intrusivas .....	15
2.2.3 Depósitos cuaternarios.....	16
2.2.4 Volcanismo cuaternario y principales centros eruptivos.....	16
2.2.5 Avances y sistemas glaciales.....	20
CAPÍTULO 3. MARCO TEÓRICO .....	22
3.1 Glaciares y glaciología .....	22
3.1.1 Definición y clasificación de glaciares.....	22
3.1.2 Balances de masa.....	27
3.1.3 Hipsometría en glaciares .....	29
3.1.4 Tiempo de respuesta .....	30
3.2 Productos satelitales aplicados a la glaciología.....	31
3.2.1 Conceptos básicos de las imágenes satelitales .....	31
3.2.2 Imágenes satelitales para la identificación y monitoreo de glaciares.....	32
3.2.3 Correcciones, combinaciones de bandas e índices espectrales.....	33
3.3 Patrimonio geológico y Geoparques .....	33
3.3.1 Definición de patrimonio geológico y algunos conceptos básicos.....	33
3.3.2 Estado del arte del patrimonio geológico en Chile.....	34
3.3.3 Geoparques y su estado del arte en Chile.....	36
3.4 Metodologías para la evaluación del geopatrimonio.....	37
3.4.1 Generalidades .....	37
3.4.2 Estructura de las metodologías para la evaluación del geopatrimonio.....	38

3.5 Legislación glaciaria chilena, proyecto de ley “Ley de protección y preservación de glaciares” .....	39
CAPÍTULO 4. METODOLOGÍA .....	39
4.1 Metodología para el O.E.1: Diseñar una metodología para la evaluación de glaciares .....	39
4.1.1 Selección de metodologías para la evaluación del patrimonio geológico .....	40
4.1.2 Análisis de las metodologías para la evaluación del patrimonio geológico seleccionadas .....	40
4.1.3 Diseño de la estructura metodológica.....	41
4.1.4 Diseño de la evaluación cuantitativa .....	41
4.2 Metodología para el O.E.2: Levantar la línea base glaciológica en el territorio del proyecto Geoparque Pillanmapu .....	45
4.2.1 confección del inventario propio .....	45
4.2.2 Revisión de otros inventarios y análisis multitemporales .....	49
4.3 Metodología para el O.E.3: Aplicar la metodología en el territorio del Geoparque Pillanmapu.....	50
4.3.1 Campañas de campo .....	52
4.3.2 Procesamiento de datos del glaciar VPPS .....	55
4.3.3 Procesamiento de datos del glaciar VPPN .....	58
CAPÍTULO 5. RESULTADOS .....	60
5.1 Resultados del O.E.1: Diseñar una metodología para la evaluación de glaciares.....	60
5.1.1 Análisis bibliográfico de metodologías para la evaluación del patrimonio geológico.....	60
5.1.2 Resultados de la encuesta para la definición de indicadores.....	71
5.1.3 Resultados de la encuesta para la definición de la ponderación de los parámetros.....	74
5.1.4 Metodología para la evaluación de glaciares.....	75
5.2 Resultados del O.E.2: Levantar la línea base glaciológica en el territorio del proyecto Geoparque Pillanmapu, ubicado en la cordillera de los Andes de la región del Maule .....	85
5.2.1 Inventario propio .....	85
5.2.2 Otros inventarios o trabajos.....	90
5.2.3 Síntesis de la línea base glaciológica y tendencias generales.....	99
5.3 Resultados del O.E.3: Aplicar la metodología en el territorio del proyecto Geoparque Pillanmapu.....	100
5.3.1 Glaciar VPPS: cálculos y estimaciones de variables necesarias para la aplicación de la evaluación cuantitativa .....	100
5.3.2 Evaluación cuantitativa del glaciar VPPS .....	106
5.3.3 Glaciar VPPN: cálculos y estimaciones de variables necesarias para la aplicación de la evaluación cuantitativa .....	109
5.3.4 Evaluación cuantitativa del glaciar VPPN.....	112
5.3.6 Propuestas de estrategias de gestión.....	115

6. DISCUSIONES .....	117
6.1 Discusiones del O.E.1: Diseñar una metodología para la evaluación de glaciares .....	117
6.1.1 Encuestas .....	117
6.1.2 Definición de indicadores.....	117
6.1.3 Subjetividad de la metodología .....	118
6.1.4 Representatividad de la Evaluación Cuantitativa .....	119
6.2 Discusiones del O.E.2: Levantar la línea base glaciológica en el territorio del proyecto Geoparque Pillanmapu .....	120
6.2.1 Inventario de glaciares de la Dirección General de Aguas 2022.....	120
6.2.2 Tendencias generales en los glaciares del territorio del proyecto Geoparque Pillanmapu .....	121
6.3 Discusiones del O.E.3: Aplicar la metodología en el territorio del proyecto Geoparque Pillanmapu .....	122
6.3.1 Respecto a la subjetividad al aplicar la metodología.....	122
6.3.2 Cálculos de volumen .....	122
6.3.3 Relevancia del análisis del especialista .....	123
7. CONCLUSIONES.....	124
BIBLIOGRAFÍA .....	126
ANEXOS .....	136

## INDICE DE TABLAS

Tabla 1: Tiempos de respuesta en distintas regiones del mundo, separados según área.....	31
Tabla 2: Encuesta para la definición de indicadores y otros puntos de interés. ....	43
Tabla 3: Encuesta para la definición de ponderadores para cada parámetro.....	44
Tabla 4: Formato de la ficha para el inventario de glaciares.....	45
Tabla 5: Resultado de la jerarquización de indicadores de la primera encuesta mediante escala de Likert. ....	72
Tabla 6: Respuestas de los encuestados respecto al tamaño mínimo de un glaciar para la generación de inventarios. ....	74
Tabla 7: Respuestas de la encuesta para la definición de la ponderación o peso asociado a cada parámetro.....	75
Tabla 8: Parámetros, ponderaciones, criterios y puntajes para calcular el VU. ....	78
Tabla 9: Parámetros, ponderaciones, criterios y puntajes para calcular el VC. ....	80
Tabla 10: Parámetros, ponderaciones, criterios y puntajes para calcular el RD. ....	82
Tabla 11: Parámetros, ponderaciones, criterios y puntajes para calcular la PA.....	83
Tabla 12: Espesor promedio, alturas mínimas, máximas y promedio según los distintos tipos de glaciares separados por su clasificación primaria.....	88
Tabla 13: Superficies englaciadas por sector según Osorio (2013) y según el inventario realizado en el presente trabajo. ....	92
Tabla 14: Cantidad de glaciares y superficies englaciadas por sector según Reinthaler et al. (2019) y según el inventario realizado en el presente trabajo.. ....	98
Tabla 15: Diferencias de altura mínima, máxima y promedio obtenidas a partir de la diferencia entre los distintos DEM. ....	103
Tabla 16: Resultados del DEM <sub>2022-2000</sub> . ....	104
Tabla 17: Resultados extrapolados. ....	104
Tabla 18: Selección de criterios para el cálculo del indicador “Valor de Uso”. ....	107
Tabla 19: Selección de criterios para el cálculo del indicador “Valor Científico”.....	107
Tabla 20: Selección de criterios para el cálculo del indicador “Riesgo de Degradación”. ....	108



Tabla 21: Selección de criterios para el cálculo del indicador “Peligrosidad Asociada”.....	108
Tabla 22: Puntajes finales del glaciar VPPS para cada indicador. ....	109
Tabla 23: Espesor y volumen del glaciar VPPS. ....	110
Tabla 24: Selección de criterios para el cálculo del indicador “Valor de Uso”. ....	113
Tabla 25: Selección de criterios para el cálculo del indicador “Valor Científico”.....	113
Tabla 26: Selección de criterios para el cálculo del indicador “Riesgo de Degradación”. ....	114
Tabla 27: Selección de criterios para el cálculo del indicador “Peligrosidad Asociada”.....	114
Tabla 28: Puntajes finales del glaciar VPPN para cada indicador. ....	115
Tabla 29: publicaciones a partir de las cuales se seleccionaron y/o diseñaron los distintos parámetros. ....	119
Tabla 30: Puntajes para los glaciares VPPS y VPPN y sus diferencias porcentuales para cada indicador y promedio.....	120

## INDICE DE FIGURAS

Figura 1: Modelo digital de elevación (ALOS-PALSAR) de la región del Maule. ....	4
Figura 2: Accesos a los glaciares del CVPPA. ....	5
Figura 3: A) Evolución de la configuración tectónica de Sudamérica, desde el cretácico hasta el cenozoico tardío. B) Compilación de las tasas de convergencia y oblicuidad promedio entre las placas de Nazca y Sudamericana. ....	7
Figura 4: Síntesis de la distribución latitudinal y relaciones de contacto de las unidades estratificadas presentes dentro de la zona de estudio. ....	15
Figura 5: Principales centros eruptivos del CVPPA. ....	17
Figura 6: Foto aérea de la cabecera de uno de los glaciares estudiados en el presente trabajo, ubicado en la ladera poniente del volcán Peteroa. ....	18
Figura 7: Principales centros eruptivos que componen al CVDGQA. ....	19
Figura 8: Principales centros eruptivos del CVTSP. ....	20
Figura 9: Límites inferidos para avances glaciares pleistocénicos, LGM y neoglaciales. ....	21
Figura 10: Zonificación teórica de un glaciar. ....	25
Figura 11: Progresión anual del balance de masa en distintas zonas de un glaciar tipo. ....	28
Figura 12: Curvas hipsométricas glaciares. ....	30
Figura 13: Transmisión atmosférica y bandas espectrales para distintos sensores. ....	32
Figura 14: Contextos geológicos nacionales. ....	36
Figura 15: Esquema ilustrativo del cálculo de un determinado indicador en base a sus respectivos parámetros. ....	38
Figura 16: Proceso de identificación de cuerpos de hielo mediante el uso del NDSI y NDWI. ...	47
Figura 17: Comparación entre la delimitación automática de glaciares con NDSI enmascarado y el reajuste manual de los polígonos de glaciares de montaña y glaciaretas. ....	48
Figura 18: Espesores glaciares al año 2000 en el sector del Cerro Toro según Farinotti et al. (2019). ..	50
Figura 19: Glaciares visitados durante las campañas de campo. ....	51
Figura 20: Vista aérea de los glaciares VPPS y VPPN en abril del 2022. ....	52

Figura 21: GCP sobre la superficie del VPPS.....	53
Figura 22: Receptor base (con trípode) y receptor móvil (con jalón). .....	54
Figura 23: Ortomosaicos del glaciar VPPS.....	55
Figura 24: Delimitación del glaciar VPPS para los años 2000, 2021 y 2022.....	56
Figura 25: Delimitación del glaciar VPPN para los años 2000, 2021 y 2022.....	59
Figura 26: Estructura metodológica según Pereira et al. (2007). .....	61
Figura 27: Estructuras metodológicas de las dos metodologías propuestas por Bruschi et al. (2011). .....	61
Figura 28: Estructura metodológica propuesta por García-Cortés et al. (2014) para el Inventario Español de Lugares de Interés Geológico (IELIG). .....	62
Figura 29: Estructura metodológica propuesta por Brilha, (2016). .....	63
Figura 30: Estructura metodológica propuesta por Reynard, et al. (2016).....	64
Figura 31: Estructura metodológica propuesta por Santos, et al. (2020). .....	65
Figura 32: Proceso para la inclusión de un geosítio al inventario nacional de geosítios de la SGCh. ....	66
Figura 33: Número de apariciones de los distintos indicadores. ....	67
Figura 34: Número de apariciones de los distintos parámetros utilizados para calcular el Vci. ...	68
Figura 35: Número de apariciones de los distintos parámetros utilizados para calcular el Vedu. 68	
Figura 36: Número de apariciones de los distintos parámetros utilizados para calcular el Vtur. .	69
Figura 37: Número de apariciones de los distintos parámetros utilizados para calcular el Vuso. 70	
Figura 38: Número de apariciones de los distintos parámetros utilizados para calcular el Vprot. 71	
Figura 39: Jerarquización de potenciales indicadores para la evaluación de glaciares según la opinión de expertos en glaciología y geopatrimonio.....	73
Figura 40: Preferencia de los encuestados respecto a separar el riesgo de degradación de un glaciar en vulnerabilidad (riesgo de degradación por causas antrópicas) y fragilidad (riesgo de degradación por causas naturales). .....	73
Figura 41: Estructura metodológica para la evaluación de glaciares. ....	77

Figura 42: Inventario de glaciares en el territorio del proyecto Geoparque Pillanmapu.....	87
Figura 43: A) Cantidad de glaciares según su clasificación primaria. B) Superficie glacial según su clasificación primaria. C) Volumen según su clasificación primaria. ....	87
Figura 44: Número de glaciares y superficie englaciada total por comuna.....	88
Figura 45: A) Número de glaciares en cada comuna separados por su clasificación primaria. B) Superficie englaciada en cada comuna separada por su clasificación primaria. ....	89
Figura 46: A) Número de glaciares en cada complejo volcánico separados por su clasificación primaria. B) Superficie englaciada en cada complejo volcánico separada por su clasificación primaria.....	89
Figura 47: Zona de estudio para el inventariado de los glaciares de la cuenca del Mataquito.....	90
Figura 48: Glaciares identificados por Noveroy (1987) y glaciares identificados en el presente trabajo de la cuenca del río Mataquito.....	91
Figura 49: Glaciares identificados por Osorio (2013) y glaciares identificados en el presente trabajo en el sector de los volcanes Descabezado Grande y Cerro Azul.....	93
Figura 50: Diferencias entre el inventario de la DGA del 2014 y el propio.....	94
Figura 51: Glaciares identificados en el RGI y glaciares identificados en el presente trabajo. ....	95
Figura 52: Archivos tipo ráster extraídos de Dussailant et al. (2019).....	96
Figura 53: Espesores glaciares según Farinotti et al. (2019).....	97
Figura 54: Glaciares identificados en el inventario de Reinthaler et al. (2019) para los años 1986 y 2018 y glaciares identificados en el presente trabajo. ....	98
Figura 55: Diferencias entre el inventario de la DGA del 2022 y el propio.....	99
Figura 56: Variación de la superficie englaciada y volumen de hielo a partir de distintos inventarios. ....	100
Figura 57: Fotografías del VPPS mostrando su nula cobertura por nieve o neviza. ....	101
Figura 58: DEM's utilizados para los cálculos de balances de masa y diferencias entre los distintos DEM's.....	102
Figura 59: Cálculo del error entre el DEM SRTM y el DEM 2022. ....	103
Figura 60: Cálculo de espesores del VPPS al año 2022. ....	105

Figura 61: Mapa de pendientes del glaciar VPPS y las laderas que lo rodean.....	106
Figura 62: Fotografías del VPPN mostrando su nula cobertura por nieve o neviza. ....	109
Figura 63: Mapa de pendientes del glaciar VPPN y las laderas que lo rodean. ....	111
Figura 64: Vista aérea de la parte alta del glaciar VPPN. ....	112
Figura 65: Diferencias de clasificación entre el inventario de la DGA año 2022 y el propio.....	121
Figura 66: A) Espesor en el año 2000 según Farinotti et al. (2019). B) Cambio de elevación anual para el periodo 2000 – 2011/2014 según Braun et al. (2019). C) Cambio de elevación anual para el periodo 2000 – 2018 según Dussaillant et al. (2019). ....	123

# CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1 Formulación del estudio propuesto

Debido a diversas características, los glaciares son de suma importancia para los territorios donde se emplazan, tanto a nivel local como regional (Sun et al., 2020). Estas características pueden ser resumidas en: a) son buenos indicadores del cambio climático y de variaciones en la temperatura atmosférica (Qin et al., 2014), b) regulan los aportes hídricos a las cuencas, en especial en épocas de sequía o cuando las precipitaciones son escasas (Cuffey & Paterson, 2010), c) juegan un rol importante en la regulación del clima (Sun et al., 2020), d) representan elementos de peligro geológico a través de procesos como lahares, deslizamientos o inundaciones por desbordes violentos de lagos glaciares (Kääb et al., 2005), y e) son un atractivo natural que permite el desarrollo de actividades culturales, turísticas y/o educativas (Palomo, 2017). Así, los glaciares proveen servicios ecosistémicos tan variados como la generación hidroeléctrica, la producción de alimentos, la regulación de contaminantes aguas abajo, el desarrollo de actividades religiosas, entre muchos otros (Milner et al., 2017).

A su vez, los glaciares poseen una serie de características que los diferencian de otros elementos de la geodiversidad, como su marcado dinamismo o su elevado riesgo de degradación producto del cambio climático. Respecto a esto último, constituyen uno de los elementos naturales abióticos más susceptibles a deteriorarse. A grandes rasgos, se ha registrado una disminución en el volumen de los glaciares desde fines del Último Máximo Glacial (LGM por sus siglas en inglés), evento ocurrido hace ~20 ka y que está estrechamente vinculado a un aumento de la temperatura producto de mayores concentraciones de CO<sub>2</sub> atmosférico (Shakun et al., 2015). Este proceso se ha visto, además, acelerado por las emisiones adicionales de CO<sub>2</sub> de origen antrópico que han ido en aumento desde inicios de la revolución industrial, a mediados del siglo XVIII (Ring et al., 2012). Así, desde la Pequeña Edad de Hielo (LIA por sus siglas en inglés), que concluyó durante la segunda mitad del siglo XIX, los glaciares han retrocedido prácticamente de manera sostenida, con la excepción de algunos avances menores (Espizua & Pitte, 2009). Los modelos climáticos predicen que la tendencia al alza de la temperatura atmosférica se mantendrá, alcanzando un incremento total de 1,5 °C en las próximas dos décadas con respecto a la temperatura en tiempos preindustriales (IPCC, 2022). Por lo tanto, es esperable que muchos glaciares desaparezcan en el corto a mediano plazo o que sus volúmenes se vean importantemente reducidos, afectando directamente su capacidad para regular caudales y el clima, así como también su potencial como destino turístico (Purdie, 2013). Se ha evidenciado que el retroceso de los hielos también provoca un aumento en el número de desastres naturales propios de los ambientes glaciales. Un ejemplo de ello se da en la Cordillera Blanca, Perú, donde han muerto más de 30.000 personas desde 1941 producto de 30 desastres gatillados por el retroceso glacial (Carey, 2005).

En base a lo mencionado, los glaciares son sumamente relevantes para la planificación y el ordenamiento territorial de los territorios donde se emplazan, por lo cual es necesario contar con estrategias para su gestión. Debido a que los glaciares forman parte de la geodiversidad, las metodologías para la evaluación del patrimonio geológico, que tienen por fin último justamente la gestión de esta, son una posible herramienta para el desarrollo de dichas estrategias. Sin embargo, y a pesar de que en las últimas décadas se han desarrollado cientos de metodologías para la evaluación del patrimonio geológico (Mucivuna et al., 2019), muchas de las cuales se especializan en algún elemento de la geodiversidad en particular, como puede ser el patrimonio

paleontológico o geomorfológico, a la fecha de publicación de este trabajo no existe ninguna metodología especializada para la evaluación de glaciares como patrimonio geológico.

Este trabajo propone una metodología para la evaluación de glaciares y su aplicación en estrategias de geoconservación, aprovechamiento sostenible y planificación territorial. Esta nueva metodología está diseñada, a priori, para ser ejecutada por gobernanzas, autoridades o proyectos de Gestión Territorial Sostenible (SLM por sus siglas en inglés), que busquen incorporar a los glaciares presentes dentro de sus territorios en la toma de decisiones.

La metodología será aplicada y puesta a prueba en el territorio del proyecto Geoparque Pillanmapu, un proyecto de gestión territorial que busca consagrarse como Geoparque Mundial de la UNESCO y, como tal, trabaja en la caracterización y puesta en valor del patrimonio geológico. Ubicado en la cordillera de la región del Maule, dicho territorio cuenta con una rica geodiversidad, profundamente marcada por los procesos tectónicos que dieron forma a la cordillera de los Andes en estas latitudes, así como también por un importante volcanismo cuaternario activo que corona a las formaciones subyacentes (González & Vergara, 1964; Astaburuaga, 2014). A pesar de que el Maule no destaca por su cantidad o volumen de glaciares, es una región que sufre los estragos de la crisis hídrica y, por lo tanto, que depende en gran medida de los deshielos para abastecer sus cuencas en verano. Adicionalmente, la gran mayoría de sus glaciares se encuentran emplazados en los principales complejos volcánicos de la zona, lo que ha provocado grandes eventos de peligro como lahares o avalanchas de detritos altamente móviles producto del agua aportada por los hielos (Tormey, 2010). Finalmente, dentro del territorio del proyecto, los glaciares se encuentran en franca retirada (Osorio, 2013; Braun et al., 2019; Dussaillant et al., 2019; Reinthaler et al., 2019), lo que puede afectar directamente en la regulación de los caudales, en la peligrosidad asociada y en el potencial turístico del cual están dotados los glaciares (Milner et al., 2017). Lamentablemente, el conocimiento que se tiene de ellos es sumamente escaso y, por lo mismo, el proyecto Geoparque Pillanmapu busca, a través del presente trabajo, incorporar los glaciares dentro de la caracterización y evaluación del patrimonio geológico.

Se espera generar una metodología que entregue las herramientas y la información necesaria para proyectos de gestión territorial o gobernanzas locales, tal que les permita integrar información glaciológica en la toma de decisiones, planificación territorial y diseño de actividades venideras. Considerando la alta diversidad que caracteriza a los glaciares en general, también se espera que la metodología pueda ser aplicada en distintos contextos glaciológicos. Finalmente, se espera aplicar la metodología con éxito en el territorio del proyecto Geoparque Pillanmapu, entregándole un conocimiento acabado de sus glaciares que le sea útil para la gestión territorial de la cordillera maulina y para su venidera postulación a la Red Global de Geoparques de la UNESCO.

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo general**

Generar una metodología que facilite la toma de decisiones informada y objetiva para la planificación territorial y gestión de los glaciares, tal que sea aplicable por proyectos o instituciones de distinta naturaleza que trabajen en la gestión de territorios con presencia de glaciares.

## **1.2.2 Objetivos específicos**

**O.E.1** Diseñar una metodología que permita el diseño de estrategias de gestión para glaciares, evaluándolos en base a criterios objetivos y representativos.

**O.E.2** Levantar la línea base glaciológica en el territorio del proyecto Geoparque Pillanmapu, ubicado en la cordillera de los Andes de la región del Maule.

**O.E.3** Aplicar la metodología en el territorio del proyecto Geoparque Pillanmapu, permitiendo la generación de estrategias de gestión.

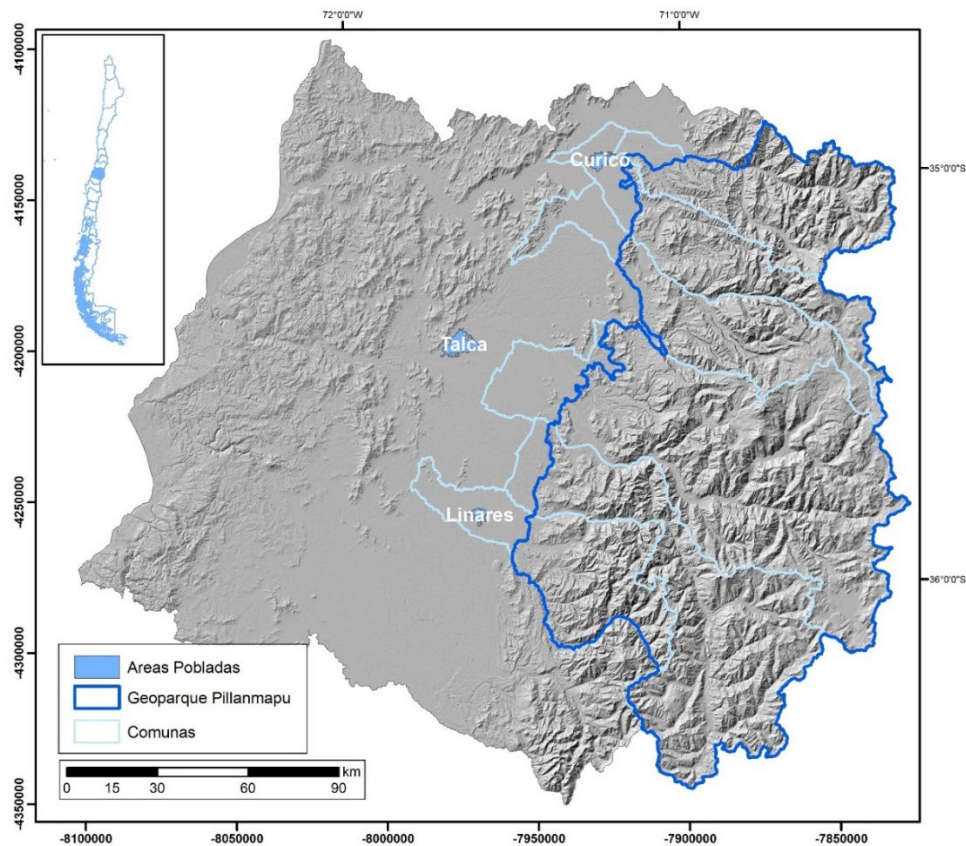
## **1.3 Hipótesis de trabajo**

Una metodología para la evaluación del patrimonio geológico diseñada específicamente para la evaluación de glaciares constituye una herramienta que permite la gestión y planificación territorial de los glaciares de un determinado territorio.

## **1.4 Ubicación y accesos**

El área de estudio comprende el área del proyecto Geoparque Pillanmapu, es decir, la precordillera y cordillera de las comunas de Romeral, Curicó, Molina, San Clemente, Colbún y Linares, región del Maule, Chile. Esta zona va desde los 34°53'S hasta los 36°30'S aproximadamente, abarcando casi la totalidad de la cordillera maulina (Figura 1).

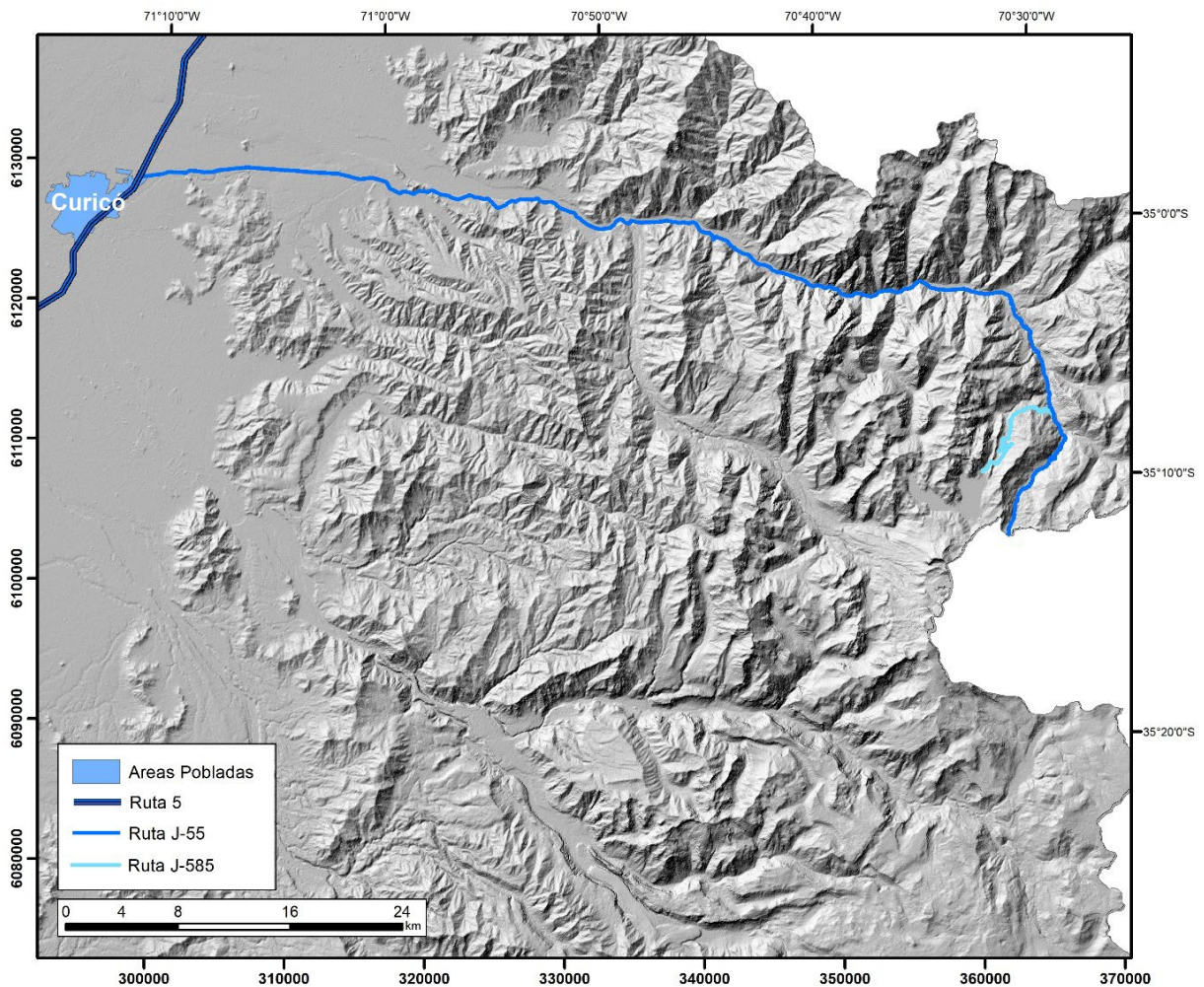




**Figura 1:** Modelo digital de elevación (ALOS-PALSAR) de la región del Maule. La zona de estudio corresponde a los límites del Geoparque Pillanmapu, es decir, las zonas precordilleranas y cordilleranas de las comunas de Romeral, Curicó, Molina, San Clemente, Colbún y Linares (polígono azul).

Es posible acceder a la zona de estudio a través de múltiples rutas, sin embargo, destacan tres que permiten adentrarse al interior de la cordillera con relativa facilidad. De norte a sur son: a) la ruta internacional J-55, que termina en el paso fronterizo Vergara, b) la ruta internacional CH-115 que termina en el paso fronterizo Pehuenche, y c) la ruta L-45, que se interna por el valle del río Achibueno.

Para acceder a los glaciares del Complejo Volcánico Planchón-Peteroa-Azufre (CVPPA), que es donde se realizaron los estudios de terreno en este trabajo, se debe tomar la ruta J-55 y, aproximadamente 3 km antes de llegar a la aduana, hay que tomar la ruta J-585, un camino de tierra, generalmente en mal estado, que asciende por la ladera del cerro en dirección oeste. Esta ruta llega hasta la ribera norte de la laguna Teno oriental. Desde ahí se debe caminar aproximadamente 15 kilómetros, rodeando el edificio del volcán Planchón por el oeste, para luego ascender a los glaciares que se encuentran en la ladera poniente del volcán Peteroa (Figura 2).



**Figura 2:** Accesos a los glaciares del CVPPA a través de la ruta J-55 y luego por la ruta J-585, camino de tierra usualmente en mal estado e inaccesible en invierno, que termina en la ribera norte de las Lagunas del Teno. Desde ahí se deben caminar ~15 km, bordeando el edificio del volcán Planchón por el oeste.

## CAPÍTULO 2. MARCO GEOLÓGICO

### 2.1 Marco de evolución geotectónica regional

#### 2.1.1 Generalidades

La conformación actual del margen occidental de la placa sudamericana es explicada por la acreción sucesiva de distintos terrenos, así como por la destrucción del margen producto de la erosión. Es posible relacionar estos eventos a los episodios de la evolución de los supercontinentes, es decir, al post-desmembramiento de Rodinia, a la amalgamación de Gondwana y al desmembramiento de Gondwana (Ramos, 1994; Rapalini, 2005).

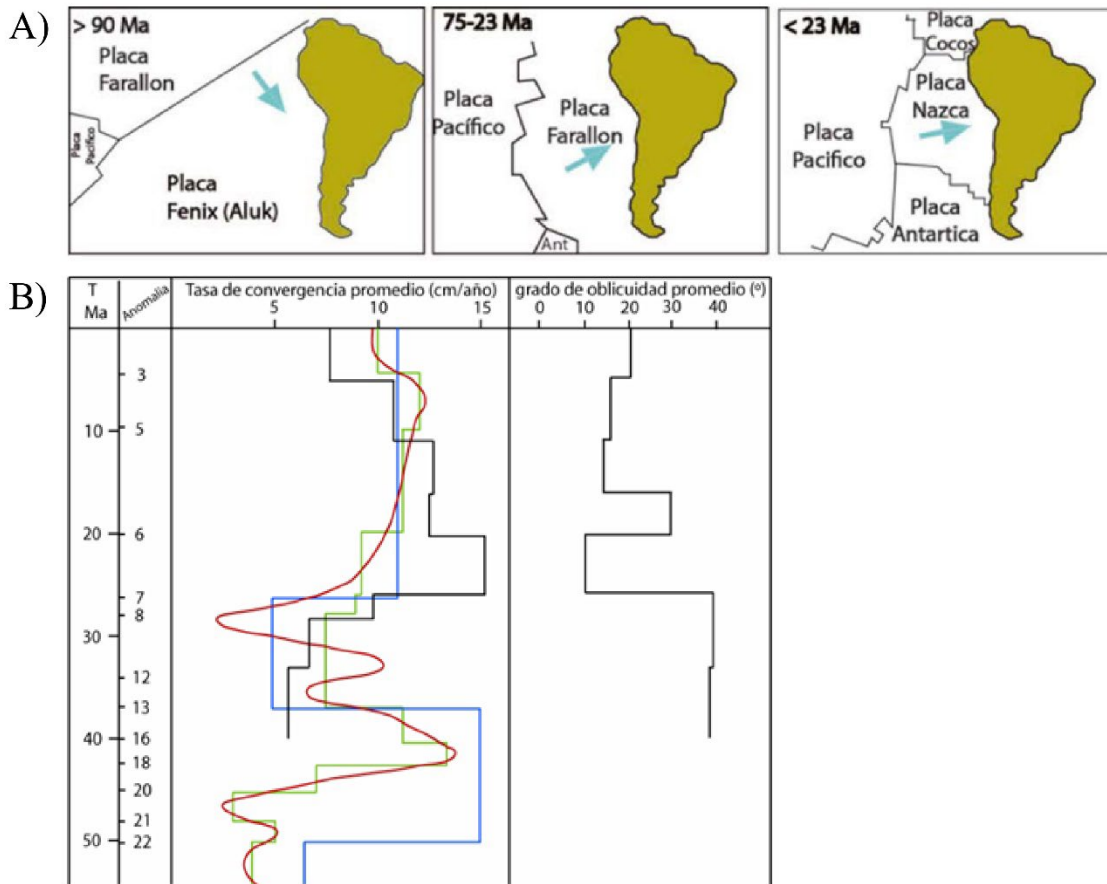
A grandes rasgos, la evolución desde el Proterozoico tardío hasta el Paleozoico tardío estuvo marcada por la acreción de terrenos alóctonos, con un progresivo corrimiento hacia el oeste del arco magmático. Esta etapa puede ser descrita como una evolución colisional o constructiva

(Rapalini, 2005). Posteriormente, durante el Pérmico tardío hasta los inicios del Jurásico, se habría instalado un periodo sin, o de muy lenta, subducción (Mpodozis & Mahlburg, 1990). La historia post - Jurásica, si bien también contó con la acreción de algunos terrenos alóctonos, se caracterizó por ser una “historia erosional”, con una subducción continua hasta el presente, un retroceso del margen continental y un progresivo corrimiento del arco hacia el este hasta alcanzar su posición actual (Charrier et al., 2009).

Estas etapas corresponden a lo que se ha denominado “ciclos tectónicos”, los cuales se separan unos de otros por discordancias de escala regional o por importantes cambios paleogeográficos. En la evolución del margen occidental de la actual placa Sudamericana se reconocen 5 de estos ciclos; el Ciclo Pampeano (Precámbrico tardío – Cámbrico Medio), el Ciclo Famatiniano (Cámbrico Medio – Silúrico), el Ciclo Gondwánico (Devónico – Pérmico Superior temprano), el Ciclo Pre – Andino (Pérmico Superior tardío – Jurásico inferior temprano) y el Ciclo Andino (Jurásico Inferior tardío – reciente).

### **2.1.2 Evolución geotectónica del relieve andino de Chile Central**

La zona de estudio posee una historia geológica que se remonta al Jurásico Medio, representada por las rocas de la Formación Nacientes del Teno (González & Vergara, 1964; SERNAGEOMIN, 2003). En dicha época se desarrollaba el Ciclo Andino, caracterizado por el reinicio de una subducción activa producto del desmembramiento de Gondwana y, en particular, por la apertura del océano Pacífico. Desde aquel entonces, la subducción se ha mantenido hasta la actualidad. No obstante, esta subducción, si bien continúa, ha sufrido diversos cambios (Figura 3), que han incidido en la conformación del relieve andino, afectando elementos como la ubicación del arco magmático con respecto a la fosa, el desarrollo de cuencas, la inversión de cuencas, procesos orogénicos, entre otros. Así, el Ciclo Andino puede ser descompuesto en tres etapas, conocidas como Ciclo Andino I, Ciclo Andino II y Ciclo Andino III.



**Figura 3:** A) Evolución de la configuración tectónica de Sudamérica, desde el cretácico hasta el cenozoico tardío. Modificado de Zonenshayn et al. (1984) en Quiroga (2013). B) Compilación de las tasas de convergencia y oblicuidad promedio entre las placas de Nazca y Sudamericana. En Verde, Pilger (1983). En azul, Pardo – Casas & Molnar (1987). En rojo, la interpolación realizada por Soler & Bonhomme (1990). En negro, Somoza (1998). Tomado de (Fock, 2005).

El Ciclo Andino I (Jurásico Inferior – Cretácico Inferior tardío) se caracterizó por ser el periodo en el cual se retomó la subducción que había sido nula o muy escasa durante todo el periodo del Ciclo Pre – Andino. Durante este ciclo se desarrollaron condiciones extensionales producto de un alto ángulo de subducción que permitieron el desarrollo de cuencas marinas en el trasarco (Charrier et al., 2007). En estas cuencas marinas se reconocen ciclos de transgresión – regresión que depositaron los sedimentos de las Formaciones Nacientes del Teno, Río Damas y Baños del Flaco. El Ciclo Andino I concluye con el evento generalizado de deformación conocido como Fase Peruana (Cretácico Inferior tardío) que cerró las cuencas de trasarco.

El Ciclo Andino II (Cretácico Inferior tardío – Eoceno medio) representa un momento de importantes cambios en la dinámica de las placas litosféricas, probablemente provocado por una muy rápida generación de corteza oceánica en el proto – Pacífico (Larson, 1991) y una sostenida polaridad normal del campo magnético durante el Cretácico Superior. Esto podría haber provocado una disminución del ángulo de subducción, pasando de una subducción de tipo Mariana a una subducción de tipo chilena, provocando un mayor acoplamiento entre las placas y, por lo tanto, una regresión y emersión de las cuencas de trasarco formadas durante el Ciclo Andino I, el alzamiento, deformación y erosión de las mismas producto de la Fase Peruana y un engrosamiento cortical (Charrier et al., 2007). A su vez, esto se tradujo en importantes cambios paleogeográficos, como el corrimiento del arco hacia el este, la formación de una cuenca de antepaís de retroarco continental y un dominio de antearco más extenso que el existente durante

el ciclo precedente. Durante el desarrollo de este ciclo se depositó la Formación Colimapu, la Unidad Clástica Café Rojiza (BRCU por sus siglas en inglés) y la Formación Plan de los Yeuques. El Ciclo Andino II finaliza con el evento de deformación generalizado conocido como Fase Incaica (Eoceno Medio) que produjo el cierre de las cuencas y el alzamiento de la Cordillera Incaica.

El Ciclo Andino III (Eoceno Medio – reciente) se reconoce como el periodo en el cual se produjo el alzamiento andino y se configuró el relieve actual. A comienzos de este ciclo y al sur de los 27°S, se formó una amplia cuenca de intra-arco donde se depositó la Formación Abanico (Charrier et al., 2002), orientada NNE, con ~70 km de ancho, ~1000 km de longitud (desde los 28°S hasta los 39°S) y ~3000 m de espesor, siendo así uno de los elementos geológicos más importante de Chile Central. El evento extensional fue sucedido por una inversión tectónica de la cuenca producto de la Fase Pehuenche. Esta última se habría desarrollado entre el Oligoceno Tardío al Mioceno Temprano y habría estado provocada por el incremento de la velocidad de convergencia de placas detectado por Pardo-Casas & Molnar (1987) y Somoza (1998) a fines del Oligoceno (Figura 3). Durante el Mioceno, y posterior a este episodio de deformación, se habrían depositados las Formaciones Farellones, Campanario y Corona del Fraile. Entre el Mioceno Tardío y el Plioceno Tardío, se habría iniciado la configuración del relieve actual. El magmatismo comenzó a ubicarse en la posición actual del arco y se tuvo un corrimiento de la deformación hacia el este, ubicándose en el flanco occidental de la Cordillera Principal. Durante este periodo se habría depositado la Unidad el Burro. A fines de este periodo y a comienzos del que le sucede, es decir entre el Plioceno y el Pleistoceno se habría depositado la Formación Cola de Zorro. Finalmente, posterior al Plioceno Tardío, es decir entre los ~4 Ma y el presente, la actividad tectónica compresiva continuó, permitiendo el mayor alzamiento de la cordillera. También, durante este último periodo, el arco volcánico se habría emplazado en su posición actual (Ramos et al., 1996) permitiendo el desarrollo de los distintos Complejos Volcánicos que sobreyacen a las formaciones de la cordillera maulina, la mayoría de los cuales están activos actualmente.

## **2.2 Marco geológico regional**

En la zona de estudio, la geología de la Cordillera de los Andes se conforma por afloramientos Mesozoicos y Cenozoicos distribuidos en franjas con orientación aproximada N – S (Astaburuaga, 2014; González & Vergara, 1962; Hildreth et al., 2009; SERNAGEOMIN, 2003). Estas rocas se encuentran intruidas por rocas intrusivas principalmente del cenozoico y se encuentran parcialmente cubiertas por depósitos volcánicos y sedimentarios del Cuaternario (Astaburuaga, 2014; Hildreth et al., 2009; Tapia, 2010).

### **2.2.1 Unidades estratificadas**

#### **2.2.1.1 Nacientes del Teno (Aaleniano – Oxfordiano)**

La Formación Nacientes del Teno aflora en el centro del anticlinal del Teno (Klohn, 1960), ubicado en el extremo superior oriental de la zona de estudio, i.e. en la cabecera de la cuenca del río Teno y en la porción central de la cordillera maulina, en la cuenca del río Maule (Arellano, 2019; González & Vergara, 1962). En un principio se estimaron potencias de ~1600 m (Klohn, 1960) y de 500 – 750 m (Davidson & Vicente, 1973), pero estudios recientes han propuesto una potencia de ~1000 m en la zona de estudio (Junkin & Gans, 2019). Esta formación subyace a la

Formación Río Damas, con un contacto que según Charrier et al. (1996) es de tipo concordante en el valle del río Tinguiririca, pero que en la localidad del río Teno aún no es clara su naturaleza, pudiéndose observar variaciones en distintos sectores de la zona de estudio (Junkin & Gans, 2019).

Klohn (1960) dividió la formación en tres unidades, pero Junkin & Gans (2019), proponen dividirla en 5 unidades diferentes. Estas son, en orden estratigráfico, a) una unidad basal compuesta por areniscas marinas de grano fino a grueso con intercalaciones de lutita, b) flujos de lava máficos a intermedios, c) rocas riolíticas púrpuras, grises y verde pálido, d) niveles marinos compuestos por areniscas, limolitas, conglomerados, pizarras y rocas carbonáticas, y e) un nivel de yeso calcáreo que conforma el techo de la formación.

Mediante dataciones radiométricas de U-Pb en circones detríticos, los autores Junkin & Gans (2019) asignaron edades que van desde los 172 Ma hasta los 161 Ma, indicando que la Formación Nacientes del Teno se habría depositado entre el Jurásico Medio y el Jurásico Superior, en particular entre el Aaleniano y el Oxfordiano. El análisis de fauna fósil (ammonites) realizado por los mismos autores indica edades Bathonianas a Oxfordianas.

### **2.2.1.2 Río Damas (Titoniano)**

Las rocas pertenecientes a la Formación Río Damas afloran a lo largo de toda la zona de estudio, predominantemente en el extremo oriental de esta, con algunas manifestaciones hacia el oeste, principalmente en el valle del río Maule (González & Vergara, 1962). Klohn (1960) indica una potencia de ~2000 m en su localidad tipo (valle de Tinguiririca), la cual se condice con los espesores estimados por González y Vergara (1962) dentro de la zona de estudio. Sobreyace a la Formación Nacientes del Teno con un contacto que no queda bien definido (Junkin & Gans, 2019) y subyace concordantemente a la Formación Baños del Flaco (Tapia, 2010).

Corresponde a una secuencia continental rojiza compuesta principalmente por brechas y conglomerados con intercalaciones de areniscas y limolitas. Se han identificado estructuras sedimentarias que indicarían ambientes subaéreos, tales como impresiones por gotas de lluvias, grietas de desecación y costras carbonáticas (González & Vergara, 1962).

Producto de sus relaciones estratigráficas, en un comienzo se le asignó una edad Kimmeridgiana a la Formación Río Damas (Klohn, 1960). Sin embargo, estudios recientes encontraron, mediante dataciones radiométricas U-Pb en cristales de circones detríticos, edades máximas de depositación de ~151 Ma (Junkin & Gans, 2019), indicando una edad Titoniana.

### **2.2.1.3 Baños del Flaco (Titoniano – Berriasiano)**

Se han registrado afloramientos de esta formación en los valles del río Teno, Claro y Maule, siendo este último su registro más austral (Arellano, 2019; Astaburuaga, 2014; González & Vergara, 1962; Tapia, 2010). En el valle del río Maule se ha estimado una potencia de ~400 m (González & Vergara, 1962), mientras que en el valle del río Claro se estima una potencia de ~300 m (Tapia, 2010). Sobreyace de manera concordante a la Formación Río Damas y subyace, de igual manera, a la Unidad BRCU (Charrier et al., 1996). Al sur del río Teno, la BRCU desaparece (Arellano, 2019; Astaburuaga, 2014; Charrier et al., 1996), por lo que en el resto de la

zona de estudio la Formación Baños del Flaco subyace concordantemente a la Formación Colimapu (Charrier et al., 2002; González & Vergara, 1962).

Corresponde a secuencias de rocas marinas fosilíferas compuestas principalmente por calcarenitas y calcilutitas con intercalaciones detríticas finas (Charrier et al., 1996). Arcos (1987) subdivide la formación en 6 miembros que incluyen, de base a techo, secuencias de areniscas verdosas, calizas, areniscas calcáreas, margas e intercalaciones detríticas finas (Arellano, 2019). Estos miembros representan ciclos de transgresión – regresión con un progresivo cambio de facies, pasando de facies de plataforma a facies de plataforma continental profunda y nuevamente a facies de plataforma.

A partir de fauna fósil, principalmente especies de amonites, y de huellas de dinosaurios encontradas en la base de la formación, se le ha asignado una edad Titoniana (Charrier et al., 1996). Sin embargo, hallazgos recientes de amonites permitieron expandir la edad de la formación hasta el Berriasiano (Salazar & Stinnesbeck, 2016).

#### **2.2.1.4 Formación Colimapu (Barremiano – Campaniano)**

Dentro de la zona de estudio, la Formación Colimapu aflora predominantemente al oeste del Complejo Volcánico Planchón – Peteroa – Azufre (Arellano, 2019; González & Vergara, 1962), pero también lo hace en el valle del río Maule, al oeste de la Laguna del Maule (Astaburuaga, 2014). Con una potencia máxima aproximada de 2000 m (Thiele, 1980), se dispone de manera concordante sobre la Formación Baños del Flaco (Charrier et al., 2002) y de manera discordante bajo la Formación Abanico (Charrier et al., 1996).

Litológicamente, la Formación Colimapu está compuesta de rocas continentales, en particular areniscas rojas, lutitas, conglomerados con intercalaciones de rocas piroclásticas, lavas andesíticas e intercalaciones de caliza (Astaburuaga, 2014).

Basado en restos fósiles, en particular de carófitas, se estimó una edad mínima Albiana (Martínez & Osorio, 1963). Por otro lado, de acuerdo con su posición estratigráfica (sobreyacente a la Formación Lo Valdés en la localidad tipo), se le asigna una edad máxima Barremiana. Posteriormente, mediante dataciones radiométricas U-Pb realizadas en el sector del Valle del río Volcán (fuera de la zona de estudio), se encontraron rangos de edades entre los 120 a los 80 Ma, sugiriendo una edad más joven que lo actualmente aceptado, con una edad mínima Campaniana (Aguirre et al., 2009).

#### **2.2.1.5 Brownish – Red Clastic Unit (BRCU, Cenomaniano – Campaniano Temprano)**

Unidad que aflora al noreste de la zona de estudio, llegando a aflorar por el sur hasta las Lagunas del Teno (Arellano, 2019; Astaburuaga, 2014; Charrier et al., 1996). Se le asignó una potencia máxima de ~230 m (Muñoz et al., 2018). Se dispone de manera discordante sobre la Formación Baños del Flaco (Charrier et al., 1996) y subyace la Formación Abanico mediante un contacto discordante.

La unidad BRCU corresponde a rocas continentales clásticas. Charrier et al. (1996) divide la unidad en dos miembros, uno basal de ~40 m de potencia compuesto por brechas matriz soportadas carentes de estratificación, pero con una marcada laminación, y uno superior de al

menos 200 m compuesto por conglomerados y areniscas conglomerádicas con intercalaciones de areniscas finas y lutitas. Las brechas basales representarían un depósito de abanico aluvial, mientras que el miembro superior correspondería a depósitos de planicie aluvial.

Debido a su ubicación estratigráfica, dispuesta de manera discordante sobre la Formación Baños del Flaco, y gracias al hallazgo de un reptil fósil, se acota la edad de la unidad al Cretácico (Charrier et al., 1996). Mediante dataciones radiométricas U-Pb en circones detríticos, se encontraron edades entre los ~95 Ma y los ~80 Ma, indicando que la BRCU se habría depositado entre el Cenomaniano y el Campaniano Temprano (Muñoz et al., 2018).

#### **2.2.1.6 Unidad Guanaco – Formación Plan de los Yeuques (Campaniano - Daniano)**

La Unidad Guanaco, parte de La Formación Plan de los Yeuques, aflora predominantemente en el extremo nororiente de la zona de estudio, al norte de las lagunas del Teno, con algunas expresiones menores al oeste del complejo volcánico Planchón – Peteroa – Azufre (Arellano, 2019). En el valle del río Teno se han estimado potencias de hasta 2700 m (González & Vergara, 1962), que no distan mucho de los 2200 m estimados justo al norte de la zona de estudio, en la cabecera del valle del río Tinguiririca (Muñoz et al., 2018). En el sector del valle del río Tinguiririca y según (Tapia, 2015), el techo de esta formación se dispone de manera discordante bajo la Formación Abanico, mientras que su base no se encuentra expuesta. Por otro lado, Muñoz et al. (2018) indica que, en el valle del río Teno, su base se encuentra expuesta como un contacto pseudo – concordante sobre la BRCU. Finalmente, González & Vergara (1962) indican que sobreyace de manera concordante a la Formación Colimapu y subyace de manera concordante a la Formación Abanico en el sector del valle del río Maule.

Corresponde principalmente a secuencias volcánicas y volcanoclásticas, efusivas y piroclásticas. Se compone de flujos de lava andesíticos, tobas y brechas volcánicas con intercalaciones de sedimentos continentales (González & Vergara, 1962; Muñoz et al., 2018; Tapia, 2015). Por su similitud, esta formación fue previamente definida como un miembro basal de la Formación Abanico (Charrier et al., 1996). Sin embargo, mediante dataciones radiométricas U-Pb, Tapia (2015) correlaciona esta formación a la Formación Lo Valle, mientras que Muñoz et al. (2018) lo hace a la Formación Plan de los Yeuques.

Se han realizado numerosas dataciones a las rocas de la Unidad Guanaco. Tanto Tapia (2015) como Muñoz et al. (2018) realizaron dataciones radiométricas U-Pb, encontrando edades de ~75 y ~76 Ma, ~71 y ~69 Ma respectivamente. Mosolf et al. (2011), mediante dataciones Ar-Ar, encontró una edad de ~63 Ma. En base a estas dataciones, se la asigna una edad Campaniana – Daniana a la Unidad Guanaco.

#### **2.2.1.7 Formación Abanico (Eoceno superior – Mioceno inferior)**

Los depósitos de la Formación Abanico y sus equivalentes, Formación Coya-Machalí (Klohn, 1960) y Formación Colbún, afloran en la Cordillera Principal y cerros isla de la Depresión Central entre los 33° S y los 36° S (Charrier et al., 2009). En la región del Maule, González y Vergara (1962) estimaron de norte a sur una potencia de 2700 m en el río Teno, 1900 m en el río Maule y 600 m en el río Longaví. Al sur de los 35° S, la Formación Abanico aflora en la mitad occidental del área de estudio, yaciendo de manera discordante bajo la Formación Cola de Zorro (González y Vergara, 1962).



Litológicamente, la Formación Abanico corresponde a una sucesión continental fuertemente plegada y predominantemente volcánica (Charrier et al., 2002). Se constituye por lavas basálticas a intermedias, tobas ácidas y depósitos piroclásticos, con intercalaciones sedimentarias fluviales, lacustres y aluviales de espesor variable, las cuales se componen de limonitas, areniscas y conglomerados finos a gruesos de color verdoso (Nyström et al., 2003; Astaburuaga, 2014).

Estudios radiométricos realizados mediante  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  y K-Ar en lavas andesíticas basálticas y basálticas han entregado edades que fluctúan entre los  $26,6\pm 1,2$  Ma y  $19,4\pm 1,4$  Ma, pero a partir de una edad  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  en plagioclasa de  $34,3\pm 2,2$  Ma, registrada en base a un dique que intruye la base de la Formación Abanico, se le ha interpretado una edad Eoceno superior - Mioceno inferior (Gana & Wall, 1997). Esta edad presenta una buena correlación con el registro fósil de mamíferos que habitaron en el límite Eoceno - Oligoceno (Wyss et al., 1994) y el registro fósil de hojas y troncos que indican una edad Oligocena superior – Miocena inferior (Sellés & Hinojosa, 1997). Esta información permite asignarle a la Formación Abanico una edad Eoceno superior – Mioceno inferior, con un ambiente depositacional de cuenca continental extensional de intraarco, con transiciones lacustres-fluviales a volcánico subaéreo (Wyss et al., 1994; Sellés e Hinojosa, 1997; Gana y Wall, 1997; Charrier et al., 2002, 2007).

#### **2.2.1.8 Formación Campanario (Mioceno)**

La Formación Campanario abarca una porción importante de la zona de estudio, ubicada al norte de la Laguna del Maule y al noroeste del cerro Campanario (Astaburuaga, 2014; Drake, 1976), lugar donde también fue definida (Drake, 1976). Su potencia no es clara, pero una profunda incisión provocada por el río Maule expone aproximadamente  $\sim 1000$  m de espesor. Esta formación se encuentra en discordancia angular sobre la Formación Abanico y subyace de manera discordante a la Formación Cola de Zorro (Astaburuaga, 2014).

Litológicamente, se compone de tobas andesíticas y dacíticas, tobas brechosas, ignimbritas y, en menor medida, de flujos andesíticos. La porción oeste de la formación está plegada, formando un amplio sinclinal, el cual queda expuesto gracias a la incisión mencionada en el párrafo anterior (Drake, 1976).

Mediante dataciones radiométricas K-Ar, se han estimado edades que van desde los  $\sim 15$  hasta los  $\sim 6$  Ma (Drake, 1976). Sin embargo, estas dataciones son puestas en duda por el propio autor, indicando podrían haber sido afectadas por el estado de las muestras, las cuales presentaban alteración. Gracias a una datación realizada en el plutón La Invernada, el cual intruye a la Formación Campanario, es posible obtener una edad mínima a 7,0 Ma, acotando la formación al Mioceno.

#### **2.2.1.9 Unidad Corona del Fraile (Mioceno)**

Ubicada en el extremo norte de la zona de estudio, principalmente entre los ríos Teno y Claro, posee una potencia aproximada de 900 metros (González & Vergara, 1962). Se dispone discordante sobre la Formación Abanico, mediante un contacto tectónico a través de la Falla el Venado y también mediante un contacto por discordancia angular (Hevia, 2014). El techo de la unidad corresponde a la actual superficie de erosión. En base a dataciones y litología, Hevia

(2014) propone correlacionar esta unidad con la unidad basal de la Formación Farellones y, por lo tanto, ampliar hacia el sur la extensión de esta última.

Corresponde a rocas volcánicas, compuestas principalmente por depósitos piroclásticos con intercalaciones menores de lavas andesíticas. Hevia (2014) divide la unidad en dos miembros, uno basal, donde predominan tobas cristalinas, tobas vítreas y toba líticas, y otro superior, compuesto principalmente tobas líticas y brechas volcánicas. Estas rocas se habrían depositado posterior a la inversión de la cuenca de Abanico (Hevia, 2014).

Mediante dataciones radiométricas U-Pb, Hevia (2014) asigna una edad aproximada de 16,6 Ma a la unidad Corona del Fraile, resultando, por tanto, Miocena.

#### **2.2.1.10 Unidad el Burro (Mioceno superior – Plioceno inferior)**

En el área de estudio, la Unidad El Burro aflora exclusivamente en la quebrada homónima, a 2300 m.s.n.m. en la zona central del área de estudio, yaciendo discordante sobre la Formación Abanico (Astaburuaga, 2014). En base a su disposición estratigráfica y litología, esta autora correlacionó la unidad con los Conglomerados del Campo Colorado, definida por González (2008) como una sucesión de conglomerados y areniscas verdes que afloran en los valles de los ríos Teno y Tinguiririca. A su vez, fue correlacionada con la Unidad Estratos del Colorado, definida por Tapia (2010) como conglomerados intercalados con areniscas rojas, las cuales afloran en el Estero Debía, en la comuna de Curicó.

Litológicamente son descritas como una sucesión sedimentaria continental de 200 m de espesor, compuesta de conglomerados clasto soportados poco consolidados de coloración gris verdosa, intercalados por niveles de areniscas rojas (Astaburuaga, 2014). Aflora como una unidad no deformada que yace discordantemente sobre la Formación Abanico, y es parcialmente cubierta por depósitos volcánicos pleistocénicos.

En base a su posición estratigráfica, la escasa deformación que la acota a una edad posterior a la deformación de la Formación Abanico, y la correlación con las unidades descritas por González (2008) y Tapia (2010), se le asocia una edad Mioceno superior – Plioceno inferior. Durante esta época, las unidades sedimentarias se habrían depositados en un ambiente fluvial posterior a periodos erosivos, considerándose como depósitos sinorogénicos (Astaburuaga, 2014).

#### **2.2.1.11 Formación Cola de Zorro (Plioceno inferior – Pleistoceno inferior)**

La Formación Cola de Zorro aflora a lo largo de toda la zona de estudio de norte a sur, en la mitad occidental, presentándose como estratos subhorizontales con un espesor aproximado de 300 m, los que yacen de manera discordante sobre las rocas deformadas de la Formación Abanico (Astaburuaga, 2014). Los estratos de esta formación presentan bordes abruptos debido a la profunda erosión glacial y fluvial, encontrándose parcialmente cubierta por morrenas y coladas de lavas del Pleistoceno superior - Holoceno.

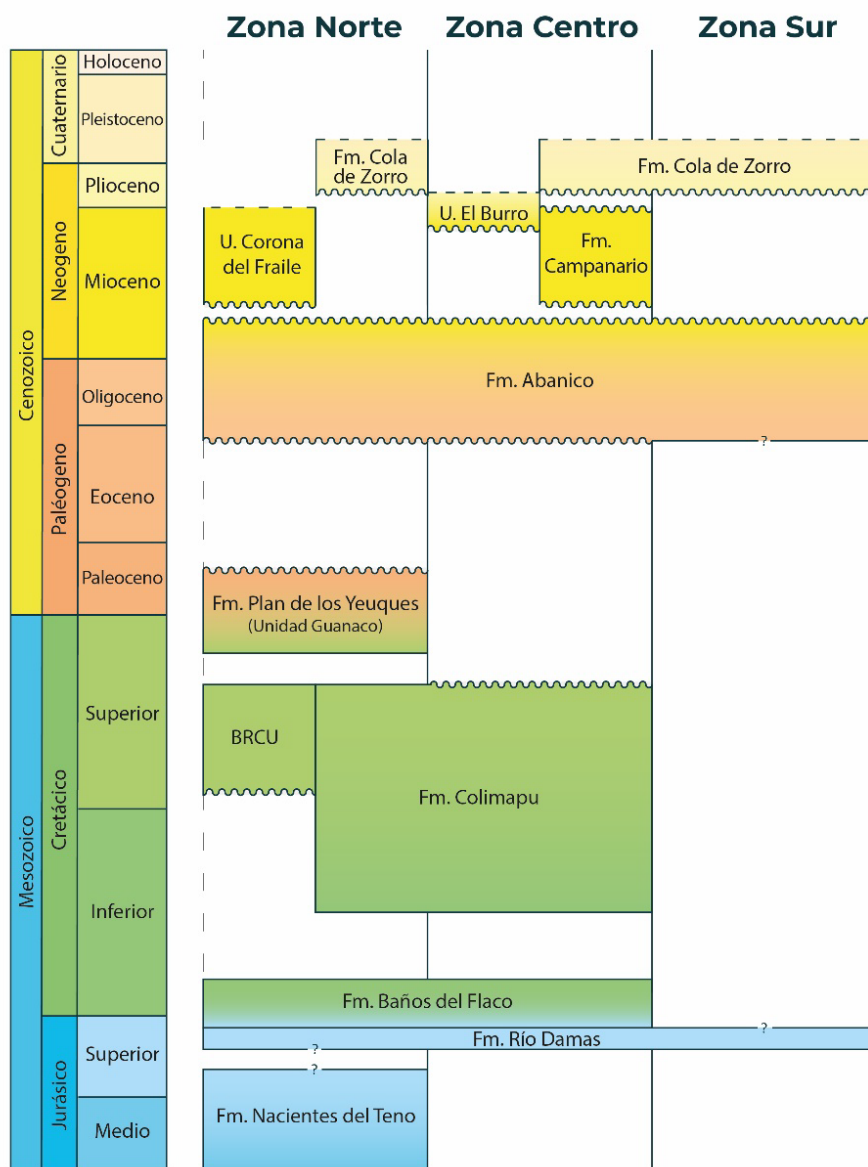
Se compone predominantemente de una secuencia volcánica continental de composición basáltica y andesítico-basáltica de olivino (Astaburuaga, 2014). Posee un miembro inferior constituido de rocas clásticas y volcanoclásticas, las que gradan hacia un miembro superior

conformado por flujos de lavas intercalados con ignimbritas riolíticas (Vergara & Muñoz, 1982; Astaburuaga, 2014).

Al disponerse como estratos subhorizontales sobre las rocas deformadas de la Formación Abanico y mediante correlaciones estratigráficas, se le asigna una edad Plioceno inferior – Pleistoceno inferior (Tapia, 2010; Astaburuaga, 2014). Esta edad es consistente con las edades radiométricas en K-Ar Pliocenas obtenidas por Vergara y Munizaga (1974) y Drake (1976).

#### **2.2.1.12 Síntesis de unidades estratificadas**

Debido a la extensión de la zona de estudio, no todas las formaciones están presentes a lo largo de la totalidad del territorio. Producto de lo mismo, las relaciones de contacto varían de norte a sur. Esto, sumado a la inexistencia de un mapa que abarque la totalidad de la zona, complica la interpretación geológica. Para facilitar dicha interpretación, a continuación se muestran todas las formaciones presentes en la zona de estudio junto con sus relaciones de contacto (Figura 4), separado en tres zonas: norte, centro y sur. Estas corresponden aproximadamente al valle del río Teno y alrededores, al valle del río Maule y alrededores y a los valles de los ríos Achibueno y Melado respectivamente.



**Figura 4:** Síntesis de la distribución latitudinal y relaciones de contacto de las unidades estratificadas presentes dentro de la zona de estudio. Las líneas rectas indican contactos concordantes. Las líneas onduladas indican discordancias. Los signos de interrogación indican que no se tiene información o que la relación de contacto no es clara. La zona norte corresponde al valle del río Teno y alrededores. La zona centro corresponde al valle del río Maule y alrededores. La zona sur corresponde a los valles de los ríos Achibueno y Melado.

## 2.2.2 Unidades intrusivas

En un comienzo, las rocas intrusivas de la cordillera maulina fueron agrupadas en un único e indiferenciado cuerpo llamado Batolito Andino, nombre utilizado para designar a las rocas plutónicas emplazadas en la cordillera de Chile central y cuyas composiciones varían entre tonalitas y granodioritas (González & Vergara, 1962). Hoy, se reconocen en la zona de estudio distintos cuerpos intrusivos, que suelen presentar una elongación norte – sur y que se hacen progresivamente más jóvenes hacia el este, indicando la migración del arco con el tiempo (Arellano, 2019; Astaburuaga, 2014). Estos cuerpos intrusivos han sido considerados como la continuación hacia el sur de los intrusivos Oligo – Miocénicos encontrados en la Cordillera Principal, entre los 33° y los 34°30’S (Arellano, 2019). En la zona de estudio, estos estarían representados por el batolito El Melado, el plutón La Invernada, el plutón Cerro Risco Bayo y el

plutón El Huemul, todos de edades oligocénicas a miocénicas. Adicionalmente, se reconocen también en la zona de estudio rocas intrusivas cretácicas tardías, las cuales constituyen el plutón El Indio (Astaburuaga, 2014) y posiblemente algunas porciones del batolito El Melado (Charrier, comunicación personal, 2022).

### **2.2.3 Depósitos cuaternarios**

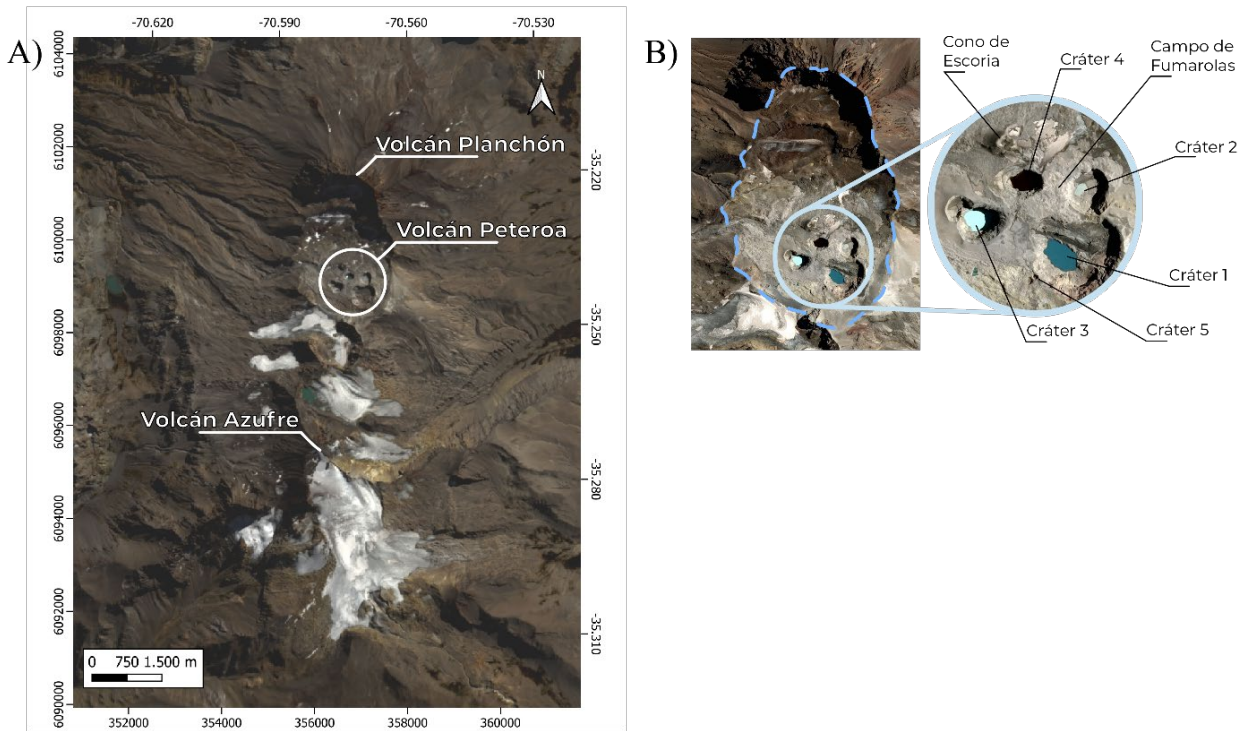
La cordillera de los Andes maulina se caracteriza por presentar mayores precipitaciones que las encontradas al norte de esta. Como consecuencia, se tienen mayores tasas de erosión que modelan el relieve a través de profundos valles fluviales y cuencas hidrográficas. Estos son rellenados por terrazas fluviales, depósitos de remociones, abanicos aluviales, entre otros (Astaburuaga, 2014). Gran parte de los valles de la cordillera maulina poseen rasgos morfológicos que dan cuenta de un intenso pasado glacial, tales como circos, morrenas laterales, morrenas frontales, rocas aborregadas y artesas glaciales (Henry, 2019; Puratich, 2010). La mayoría de dichos depósitos se habrían formado en la última glaciación o Glaciación de Würm y durante el Holoceno, pero existen relictos que datan del Mioceno tardío – Plioceno (7 – 5 Ma) en el valle del río Lontué (Puratich, 2010). En la actualidad, los valles son continuamente rellenados por el fuerte volcanismo que se desarrolla de manera continua desde la última glaciación (Hildreth et al., 2009). Así, es posible encontrar numerosos depósitos de caída y coladas de lava de edades cuaternarias que cubren algunos de los depósitos de origen glacial y las formaciones subyacentes (Astaburuaga, 2014).

### **2.2.4 Volcanismo cuaternario y principales centros eruptivos**

La región del Maule se caracteriza por un intenso volcanismo, reciente y actualmente activo, que corona las formaciones subyacentes. Dentro del área de estudio, es posible encontrar 4 complejos volcánicos, que de norte a sur son: el Complejo Volcánico Planchón – Peteroa – Azufre (CVPPA), el Complejo Volcánico Descabezado Grande – Quizapu – Cerro Azul (CVDGQA), el Complejo Volcánico Tatara – San Pedro (CVTSP) y el Complejo Volcánico Laguna del Maule (CVLdM). Debido a que estos complejos constituyen las partes más elevadas de la cordillera maulina, es en ellos donde se encuentra la gran mayoría de los glaciares de la zona de estudio, exceptuando el cerro El Toro (Osorio, 2013). Producto de lo anterior y sumado al hecho de que los glaciares ubicados en volcanes activos no solo sufren cambios por fluctuaciones climáticas, sino también por la actividad volcánica (Reinthal et al., 2019), es que los complejos volcánicos cobran especial relevancia para efectos del presente trabajo. A continuación, se describen solo los complejos volcánicos presentes en el área de estudio que alojan glaciares en su interior o inmediaciones, es decir, el CVPPA, CVDGQA y CVTSP, dejando de lado el CVLdM.

#### **2.2.4.1 Complejo Volcánico Planchón – Peteroa – Azufre.**

El CVPPA, ubicado en el extremo nororiente de la zona de estudio, es un complejo volcánico compuesto por tres estratovolcanes alineados norte – sur. La toponimia del sector no es clara, pero para efectos de este trabajo se hablará del volcán Planchón para referirse al edificio volcánico de 3977 m de altura ubicado en el extremo norte del complejo, volcán Azufre para referirse al edificio de 4113 m ubicado en el extremo sur y volcán Peteroa para referirse al conjunto de cráteres, conos y campos de fumarolas que habitan la caldera ubicada entre el Planchón y el Azufre (Figura 5).



**Figura 5:** A) Imagen satelital del CVPPA. B) Caldera volcánica (línea segmentada azul) donde se alojan numerosos elementos volcánicos que en su conjunto son conocidos como volcán Peteroa. La enumeración de cráteres corresponde al orden cronológico (Aguilera et al., 2016). Imagen base: Landsat OLI con fecha 11 de abril del 2021.

La historia eruptiva del complejo se remonta a 550 ka, época en la que habría comenzado a construirse el edificio del volcán Azufre. Este último, compuesto principalmente de lavas basáltico – andesíticas y flujos piroclásticos, es el más grande del complejo, con un volumen aproximado de  $69 \text{ km}^3$  (Aguilera et al., 2016). Posteriormente, entre los 14 y 11 ka y 6 km al norte del Azufre, se habría formado el volcán Planchón, de  $\sim 43 \text{ km}^3$ , en una fase conocida como Planchón I. Este edificio, de composición basáltica a basáltico – andesítica, se habría alzado rápidamente, lo cual lo habría convertido en una estructura inestable. Producto de lo mismo, hace aproximadamente 11 ka, gran parte del edificio habría colapsado, dando origen al famoso Lahar del Teno, recientemente llamado Avalancha de Detritos del Teno (Tormey, 2010). Gracias al alto contenido de agua producto de la existencia de glaciares, este flujo pudo recorrer  $\sim 95 \text{ km}$  de distancia, alcanzando la depresión central, más allá de la ciudad de Curicó. Posterior a este evento, vino una segunda fase conocida como Planchón II que habría terminado hace 7 ka, iniciando la fase del Peteroa, un pequeño volcán compuesto por diversos conductos volcánicos con un rango composicional más ácido que los mencionados anteriormente, desde andesitas a riodacitas (Aguilera et al., 2016).

En la actualidad, el volcán Peteroa muestra importantes signos de actividad volcánica, habiéndose registrado las últimas erupciones durante los años 2018 – 2019. Estas erupciones, originadas del cráter 2 (Figura 5), estuvieron fuertemente influenciadas por la presencia de aguas provenientes de la pequeña laguna que se aloja dentro del cráter (Romero et al., 2020). Producto de lo mismo, los glaciares ubicados en la vecindad del complejo se encuentran parcialmente cubiertos de material volcánico lo cual, probablemente, afecta su capacidad reflectiva o su aislamiento térmico (Trombotto et al., 2014, Figura 6). Posterior a la erupción, y de manera intermitente, se ha observado una fumarola que emana del mismo cráter (observaciones directas).



**Figura 6:** Foto aérea de la cabecera de uno de los glaciares estudiados en el presente trabajo, ubicado en la ladera poniente del volcán Peteroa. Se observa cobertura por tefra (principalmente ceniza) y azufre nativo. Fotografía de Felipe Ugalde.

#### 2.2.4.2 Complejo Volcánico Descabezado Grande – Quizapu – Cerro Azul

El CVDGQA es un complejo volcánico que se compone principalmente de dos estratovolcanes alineados norte – sur, los volcanes Descabezado Grande (3953 m) y Cerro Azul (3788 m), y un conducto volcánico ubicado en la ladera norte del volcán Cerro Azul conocido como Quizapu (Figura 7). Ambos volcanes fueron construidos en el Pleistoceno Tardío y el Holoceno, mientras que el cráter del Quizapu fue generado en las erupciones de 1846 – 47 y 1932 principalmente (Hildreth & Drake, 1992).

El edificio del Descabezado Grande posee un volumen aproximado de 30 km<sup>3</sup> y su composición química varía desde andesitas a riodacitas. Posee, además, un cráter de 1,4 km de diámetro que se encuentra actualmente relleno por hielo. Por otro lado, el volcán Cerro Azul posee un volumen menor, de ~11 km<sup>3</sup>, y posee un amplio rango composicional, de 51 a 69% SiO<sub>2</sub>, que es prácticamente idéntico al rango registrado en la erupción de 1932 del cráter Quizapu. Este último, ha sido el responsable de las dos erupciones más voluminosas de Sudamérica en tiempos históricos. La primera de ellas, ocurrida en 1846 – 47, fue de carácter efusivo, mientras que la segunda, ocurrida en 1932, fue de carácter explosivo y sería la última erupción registrada en este complejo volcánico (Hildreth & Drake, 1992).

Sumado a los dos estratovolcanes y al cráter Quizapu, el CVDGQA incluye numerosos elementos volcánicos que, según Hildreth & Drake (1992), pueden ser agrupados en las siguientes categorías: a) 5 conos monogenéticos máficos, ubicados en el límite suroeste del complejo y de edad holocena, b) 7 flujos de lava riodacíticos del Pleistoceno Tardío al Holoceno, ubicados en el flanco norte del volcán Descabezado Grande, y c) un grupo de conos máficos del Pleistoceno Tardío ubicados en el extremo noreste del complejo. Este incluye al volcán Colorado y se interdigita con otro cluster volcánico, ubicado al noreste y compuesto por el volcán Descabezado Chico y volcán Cerro del Medio.



**Figura 7:** Principales centros eruptivos que componen al CVDGQA. Imagen base: Landsat OLI con fecha 11 de abril del 2021.

### 2.2.4.3 Complejo Volcánico Tatara – San Pedro

El CVTSP se compone principalmente de dos estratovolcanes, el volcán San Pedro (3621 m), ubicado en el extremo occidental del complejo, y el volcán Pellado (3016 m), ubicado en el extremo oriental del complejo (Figura 8). Estos volcanes habrían estado activos entre 188 a 83 ka y 90 a 19 ka respectivamente, pero la actividad del complejo se remonta a ~930 ka (Singer et al., 1997). Si bien el complejo se compone principalmente por andesitas basálticas, su rango composicional es sumamente amplio, abarcando desde basaltos primitivos a riolitas con alto contenido de SiO<sub>2</sub> (Dungan et al., 2001).

A través de grandes periodos erosivos, el crecimiento cíclico glacial habría interrumpido numerosas veces el crecimiento del complejo. A través de la datación de lavas ubicadas sobre lagunas glaciales, los autores Singer et al. (1997) pudieron estimar edades de deglaciación de 830, 790, 610, 400, 330, 230, 110 y 17 ka en el sector del CVTSP. Estas edades se condicen, a grandes rasgos, con las edades estimadas por otros autores a nivel global.





**Figura 8:** Principales centros eruptivos del CVTSP. Imagen base: Sentinel 2 con fecha 13 de abril del 2021.

### 2.2.5 Avances y sistemas glaciales

Del lado chileno, en particular en los valles del río Colorado, Lontué y afluentes aledaños (ubicados entre el CVPPA y el CVDGQA), se han reconocido 6 sistemas o *drifts* glaciales. Estos sistemas corresponden a un avance o sucesivos avances glaciales los cuales son identificables gracias a las geoformas que han dejado, principalmente circos, valles glaciales, y valles colgados, excavados en secuencias volcánicas de Plioceno – Holoceno, pero también morrenas o rocas aborregadas (Puratic, 2010). Si bien el autor no realizó dataciones, pudo acotar las edades de los sistemas utilizando las edades de las secuencias volcánicas. Así, los seis sistemas quedan restringidos a las siguientes edades:

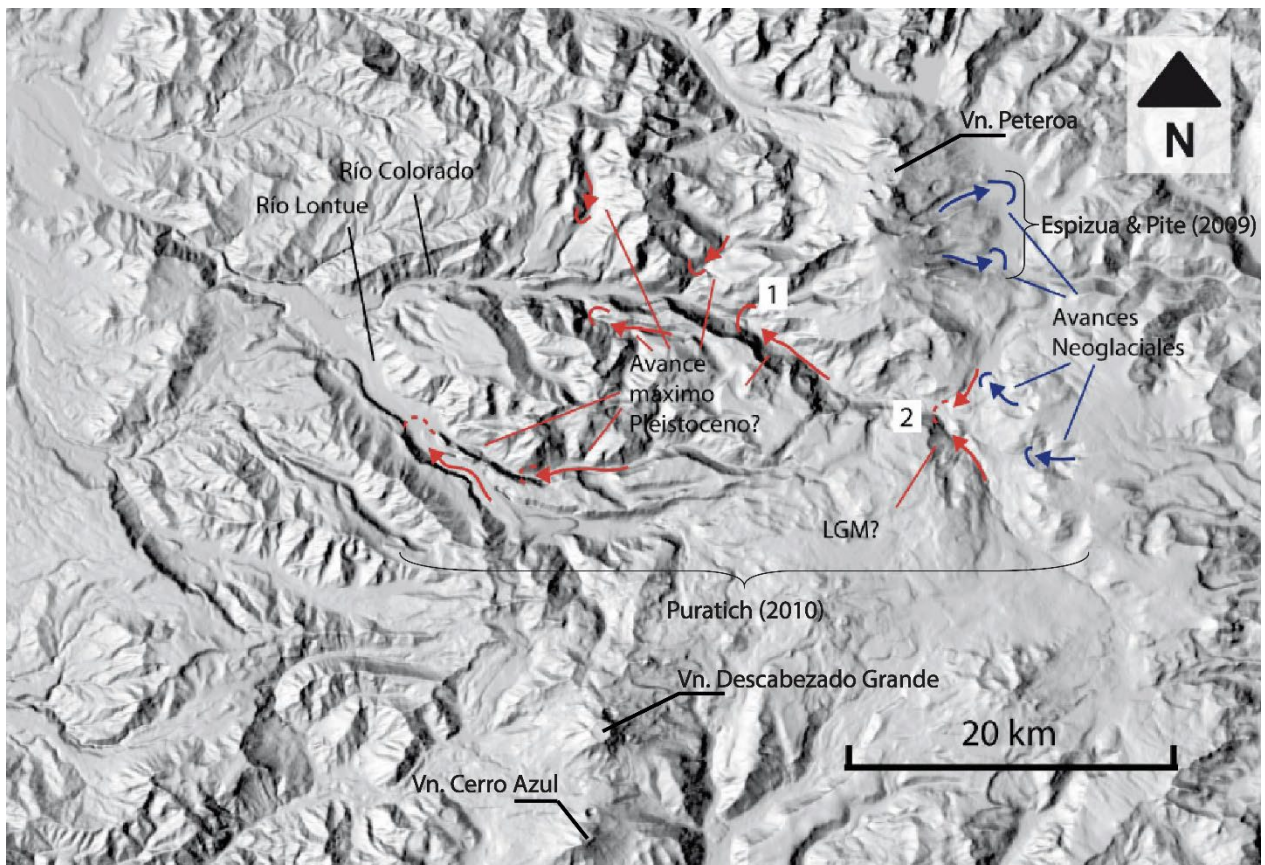
- Sistema 6: 5,7 – 0,15 Ka (avances neoglaciales, incluye la LIA).
- Sistema 5: 150 – 7 Ka (última glaciación, incluye el LGM).
- Sistema 4: 0,3 – 0,15 Ma.
- Sistema 3: 0,8 – 0,3 Ma.
- Sistema 2: 2 – 1,2 Ma.
- Sistema 1: >5 Ma.

Cabe destacar que el periodo atribuido a dichos sistemas es tan amplio que suelen abarcar numerosas glaciaciones y, por lo tanto, no deben ser confundidos con estas últimas. Los sistemas 1 y 2 abarcan múltiples glaciaciones del ciclo de 40 ka, mientras que los sistemas 3, 4 y 5 abarcan tres, una y dos glaciaciones del ciclo de 100 ka respectivamente. En particular, el sistema 5 incluye la última glaciación y el Último Máximo Glacial (LGM por sus siglas en inglés). El

sistema o *drift* 6 abarcaría los avances neoglaciales, incluyendo la Pequeña Edad de Hielo (LIA por sus siglas en inglés).

Respecto a la extensión de estos sistemas, el sistema 1 habría sido el de mayor alcance, llegando hasta la zona precordillerana. Los límites de los sistemas 2, 3 y 4 no están bien definidos. El punto 1 de la Figura 9 marca la ubicación de la morrena terminal Barroso, la cual constituye la evidencia más importante de avance, al menos para los valles mencionados. Por otro lado, un posible límite para el LGM correspondería a una gran acumulación de sedimentos fluvio – glaciales ubicados en el sector del Cerro El Pellejo (Figura 9, punto 2).

Finalmente, durante la LIA y del lado argentino, los glaciares del CVPPA habrían alcanzado un máximo entre 1550 y 1720 DC y otro máximo en 1830 DC, con su frente ubicado ~2 km aguas abajo, i.e. hacia el este, de la posición actual (Figura 9, líneas azules septentrionales). Desde entonces y de manera general, los glaciares han retrocedido (Espizua & Pitte, 2009). Según Puratich (2010) dichos avances se correlacionan del lado chileno con morrenas ubicadas en el Valle Grande y Valle Debía (Figura 9, líneas azules meridionales). Sin embargo, dicha correlación debe ser tomada con cautela ya que se estimó exclusivamente a partir de la altura de las morrenas y no mediante dataciones. Espizua & Pitte (2009) encontraron paleo ELAs de ~3150 msnm mientras que Puratich (2010) encontró paleo ELAs ~2690 msnm. Esta diferencia se explicaría, al menos según el último autor, por los métodos utilizados para su estimación.



**Figura 9:** Límites inferidos para avances glaciales pleistocénicos, LGM y neoglaciales (incluyendo la LIA). El punto 1 indica la ubicación de la morrena terminal Barroso, la cual constituye la evidencia más importante de avances glaciales. El punto 2 corresponde a una gran acumulación de sedimentos fluvio – glaciales que podrían marcar el avance del LGM. Modificado de Puratich (2010).

## **CAPÍTULO 3. MARCO TEÓRICO**

### **3.1 Glaciares y glaciología**

La glaciología es el estudio de todas las formas con que el hielo se presenta en el mundo natural. Estas son muchas e incluyen glaciares, nieves, suelos congelados, hielo atmosférico, hielo continental, hielo marino, hielo en lagos, entre otros. A su vez, se preocupa de la relación del hielo con los elementos que lo rodean y su interacción con ellos, como rocas, suelos, agua o aire (Marangunic et al., 2008).

Debido a su diversidad, la glaciología suele concebirse como una disciplina multidisciplinaria. En ella convergen muchas ramas del conocimiento como la geología, la geofísica, la geografía, la meteorología, la hidrología, entre otras. Por lo mismo, la criósfera puede ser estudiada desde distintos puntos de vista como, por ejemplo, el estudio de las propiedades físicas del hielo y su estructura, el estudio de la interacción del hielo con la corteza terrestre o de la interacción con la atmósfera y la hidrósfera.

El presente trabajo tiene por intención diseñar una metodología que permita la evaluación de los glaciares. Por lo tanto, a continuación, se presentan algunas definiciones que dejan de lado otros elementos de la criósfera, como suelos congelados (permafrost) o hielo atmosférico.

#### **3.1.1 Definición y clasificación de glaciares**

Existen numerosas definiciones de glaciar. Algunas de ellas buscan definirlos a través de una mirada puramente científica. Otras definiciones se atienen a cuestiones prácticas. Este es el caso cuando, por lo general, se persigue una aplicabilidad, como lo son aquellas definiciones realizadas especialmente para la confección de un inventario de glaciares.

Del mismo modo, existen distintos puntos de vista bajo los cuales es posible clasificar los tipos de glaciares. Al igual que con otras clasificaciones que buscan encasillar elementos del mundo natural, ninguna clasificación de glaciares es perfecta y siempre es posible encontrar casos de glaciares que pertenecen a más de una categoría.

##### **3.1.1.1 Definición de glaciar**

Según el Manual de Glaciología (Marangunic et al., 2008), un glaciar se define como “grandes masas de hielo, con o sin agua intersticial, de límites bien establecidos, originados sobre la tierra por metamorfismo a hielo de acumulaciones de nieve (un proceso denominado sinterización de la nieve), y que fluyen lentamente”. Esta definición incluye el flujo como condición. Un glaciar puede fluir, a grandes rasgos, por dos motivos. El primero es por el efecto de la gravedad, que deforma al cuerpo de hielo. El segundo es producto del deslizamiento basal que se produce cuando el hielo está lubricado en su lecho producto del agua proveniente del derretimiento (Cuffey & Patterson, 2010). Sin embargo, algunos cuerpos de hielo, como aquellos de menor tamaño o aquellos con una topografía que impide el avance del hielo, no fluyen (Rivera et al., 2017). Más aún, determinar si un glaciar fluye o no es una tarea que complejiza la realización de un inventario de manera telemática.

Los autores Singh et al. (2011), en la *Encyclopedia of Snow, Ice and Glaciers*, definen a los glaciares como una “masa de hielo terrestre dura y compacta que se forma por la recristalización de la nieve y se mueve hacia adelante producto de su propio peso. (...). Un glaciar es un cuerpo de hielo frágil y dinámico que se mueve siempre hacia adelante, caracterizado por poseer tres componentes básicos que son una zona de acumulación, una zona de ablación y un frente glacial”. Aquí se incluyen las distintas zonas de un glaciar como parte integral de su definición. Esto puede generar la exclusión de ciertos cuerpos de hielo que no necesariamente poseen las tres zonas de manera simultánea.

El Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC, 2001, como se citó en Rivera et al., 2017) establece que un glaciar es una “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”. Esta definición abarca gran parte de los cuerpos de hielo. Sin embargo, y al igual que las dos definiciones anteriores, incluye al flujo como un requisito.

El proyecto *Global Land Ice Measurements from Space* (GLIMS), define a un glaciar como “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" (Kargel et al., 2014, como se citó en Rivera et al. (2017)). Debido a que esta definición se diseñó para ser aplicada en conjunto con sensores remotos, y a diferencia de las definiciones propuestas más arriba, no considera el flujo.

Considerando que en el presente trabajo se busca diseñar una metodología que sea relativamente sencilla de aplicar, es de interés utilizar una definición que sea útil para ser aplicada mediante sensores remotos, pero que no por ello omita cuerpos de hielo relevantes. En el manual Balance de Masa Glaciar y en la Estrategia Nacional de Glaciares (Rivera et al., 2009, 2017), los autores se enfrentaron a un desafío similar, ya que buscaban una definición “operativa, práctica y fácil de aplicar mediante el uso de sensores remotos satelitales”. Por lo tanto, la definición que se utilizará de ahora en adelante es la misma provista por dichos autores. Esta define a un glaciar como “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 km<sup>2</sup> (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”. Esta definición implica un área mínima para que un cuerpo de hielo sea considerado como glaciar. Evidentemente, esto deja fuera algunos cuerpos de hielo menores. A pesar de ello, estas omisiones son poco representativas en superficie y, como se verá en el capítulo de Resultados, una hectárea es exactamente el tamaño mínimo propuesto por la mayoría de los especialistas que respondieron una encuesta diseñada para el desarrollo de este trabajo, además de ser el mismo tamaño mínimo utilizado por la Dirección General de Aguas (DGA).

### 3.1.1.2 Zonificación general de glaciares

Los glaciares poseen una zona de acumulación y una zona de ablación, separadas por una línea de equilibrio (Cuffey & Paterson, 2010; Marangunic et al., 2008; Rivera et al., 2009). En la zona de acumulación el glaciar gana masa al cabo de un año hidrológico (Rivera et al., 2017). La ganancia de masa puede ser provista, principalmente, por la precipitación nival o de avalanchas. Estas últimas pueden portar detritos que también pasan a formar parte constitutiva del glaciar. Por el contrario, la zona de ablación corresponde a aquella porción del glaciar que pierde masa. Esto ocurre por los distintos fenómenos de ablación que se pueden dar en un glaciar, tales como fusión, sublimación, erosión eólica (deflación), avalanchas, calving, entre otros. Cuando las ganancias de la zona de acumulación son iguales a las pérdidas de la zona de ablación, el frente del glaciar es estable. Si el balance de masa no es igual a 0, entonces el glaciar puede avanzar o retroceder según sea el caso (Marangunic et al., 2008).

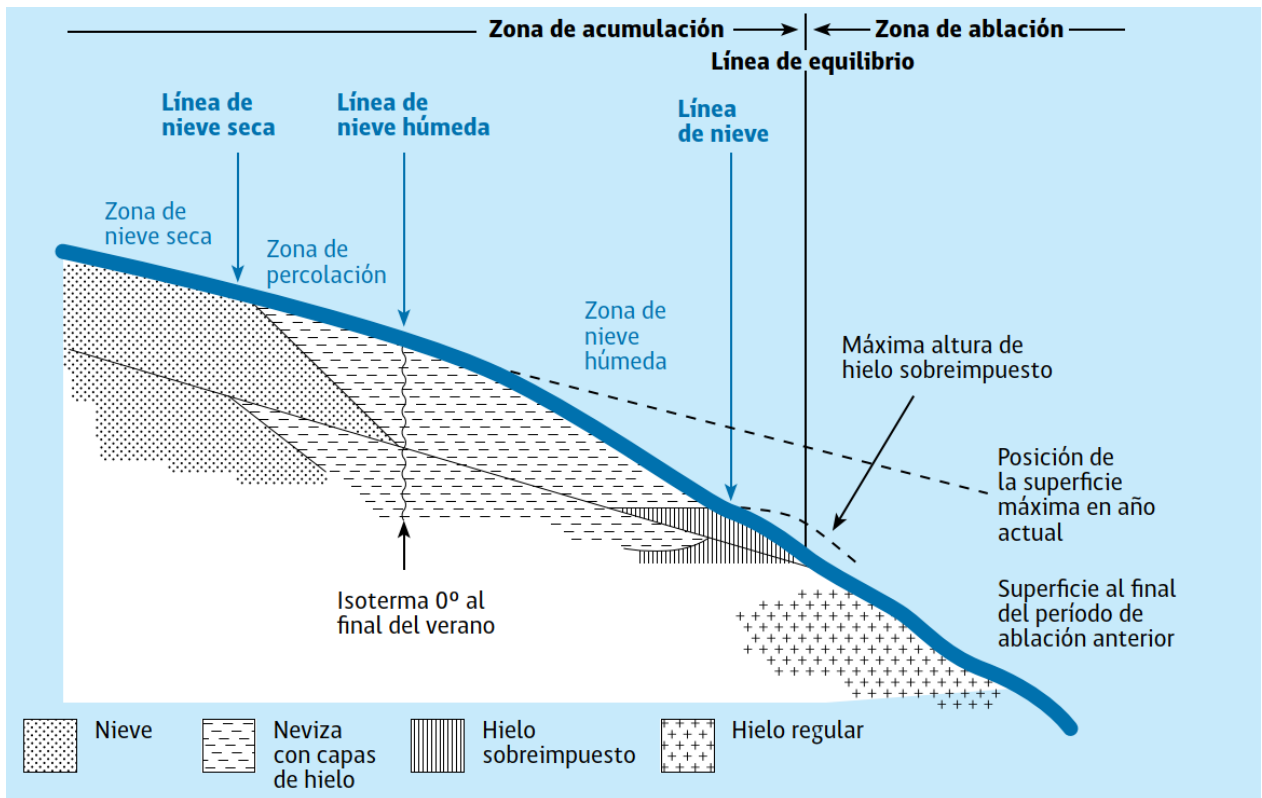
Separando la zona de ablación de la de acumulación, se encuentra una línea imaginaria llamada línea de equilibrio (Figura 10). La línea de equilibrio es un elemento importante en el estudio de balances de masa y de dinámica glacial, ya que variaciones en su altura entrega conocimiento respecto a la evolución de los glaciares (Cuffey & Paterson, 2010). Desde esta hacia las nacientes se haya la zona de acumulación y desde esta hacia el frente del glaciar se haya la zona de ablación (Rivera et al., 2017). Otro límite importante es la línea de nieve, que separa la parte del glaciar cubierta por nieve de la parte del glaciar cubierta por hielo. Dejando de lado la zona de hielo superimpuesto definida más abajo, la línea de nieve puede ser considerada como un *proxy* de la línea de equilibrio (Bamber & Rivera, 2007). Esto es importante, ya que es relativamente sencillo identificar la línea de nieve a través de sensores remotos y, por ende, la ubicación aproximada de la línea de equilibrio, también llamada la cota de la línea de equilibrio (ELA por sus siglas en inglés).

### 3.1.1.3 Subzonificación de glaciares

Es posible separar las zonas de un glaciar en subzonas (Figura 10). Estas son, en orden desde las nacientes hasta el frente, la zona de nieve seca, la zona de percolación, la zona de nieve húmeda, la zona de hielo superimpuesto y la zona de ablación. Es importante destacar que rara vez un glaciar posee la secuencia completa de zonas (Cuffey & Paterson, 2010).

- a) Zona de nieve seca: zona donde la temperatura es tal que la nieve precipitada en invierno no se derrite, ni siquiera durante el verano.
- b) Zona de percolación: aquí si ocurre algo de fusión y, como su nombre lo indica, el agua puede percolar una cierta distancia antes de volver a congelarse.
- c) Zona de nieve húmeda: en esta zona, toda la nieve depositada desde fines del verano anterior alcanza los 0°C para fines del verano actual. Al igual que ocurre en la zona de percolación, el agua proveniente de la fusión de la nieve percola y puede volver a congelarse. El límite inferior de esta zona corresponde a la línea de nieve.
- d) Zona de hielo superimpuesto: tanto en la zona de percolación como en la de nieve húmeda, el agua proveniente de la fusión de la nieve puede volver a congelarse y formar lentes o capas de hielo, pero que están separados por nieve o neviza. En la zona de hielo superimpuesto, la acumulación de agua proveniente de la fusión es tal que el hielo formado por recongelamiento forma una masa continua que queda expuesta en superficie. El límite inferior de esta zona corresponde a la línea de equilibrio.

- e) Zona de ablación: a la descripción provista más arriba se le agrega el hecho de que la superficie de esta zona está compuesta por hielo en años “normales”. Sin embargo, en años donde el derretimiento fue mayor que la media, la línea de equilibrio puede ganar altura, dejando la superficie de la zona de ablación cubierta de neviza.



**Figura 10:** Zonificación teórica de un glaciar. En la parte superior del diagrama se observa la zonificación básica, es decir, aquella compuesta por una zona de acumulación y una de ablación. Bajo ella, se encuentra la subzonificación del glaciar que incluye una zona de nieve seca, una zona de percolación, una zona de nieve húmeda, una zona de hielo superimpuesto y una zona de ablación. Es importante destacar que rara vez un glaciar muestra la secuencia completa. Tomado de Rivera et al. (2017), a su vez modificado de Menzies (1995).

### 3.1.1.3 Clasificación de glaciares

Existen diversos puntos de vista según los cuales se pueden clasificar glaciares. Así, es posible clasificarlos según su dinámica de movimiento, su temperatura, su morfología, su tipo de frente y su tipo de zona de acumulación. A pesar de ello, la clasificación principal es la morfológica (Rivera et al., 2017), también conocida como clasificación primaria, y es la que será utilizada en el presente trabajo. Por lo tanto, a continuación, se la describe en detalle.

La clasificación morfológica primaria se basa en aspectos físicos del glaciar como su tamaño, naturaleza y características. En ella, podemos encontrar los siguientes tipos de glaciares (Marangunic et al., 2008; Rivera et al., 2017):

**Casquetes o sábana de hielo continental (*Ice sheets*):** cubierta de hielo de tamaño continental (mayor a 1.000.000 km<sup>2</sup>) como las encontradas en la Antártica y Groenlandia. Se caracterizan por ser más activos en los márgenes y en las corrientes de hielo (*Ice Streams*), mientras que las partes centrales poseen un limitado flujo de hielo. Estos casquetes pueden alcanzar varios kilómetros de profundidad.

**Corrientes de hielo (*Ice Streams*):** encontradas dentro de los casquetes continentales, corresponden a sectores donde el hielo posee tasas de flujo elevadas que se diferencian del hielo circundante, en su mayoría inactivo. El margen de una corriente de hielo puede ser bien definida o gradual. En el primer caso, son visibles por una serie de grietas laterales que marca el límite de la corriente. Estas corrientes son lo que alimenta las plataformas de hielo flotantes.

**Plataformas de hielo flotantes (*Ice Shelves*):** corresponde a la porción flotante de un glaciar que desemboca en el mar. Están conectadas al glaciar, de lo contrario pasan a ser *icebergs* o témpanos. La línea que separa el hielo apoyado sobre roca del hielo flotante es conocida como *grounding line* y puede ser identificada en superficie por la acumulación de grietas que se produce en este punto. Esta deformación es producto del movimiento de flexión que sufre el hielo flotante con el subir y bajar de las mareas.

**Glaciares de Piedemonte (*Piedmont glaciers*):** glaciares que poseen su zona de alimentación en altura, pero donde la alimentación es lo suficientemente abundante como para permitir que el hielo recorra una distancia tal que le permite derramarse fuera de la zona de altura o de alta pendiente. Al llegar a las zonas bajas donde la pendiente disminuye, el hielo se extiende en forma de abanico, similar a como lo hacen los abanicos aluviales. Este abanico es el elemento característico de estos glaciares, conocido como lóbulo.

**Glaciares de valle (*Valley glaciers*):** glaciares emplazados en un valle de montaña. Pueden cubrir total o parcialmente el valle y alimentarse de una o más cuencas. A diferencia de los glaciares de piedemonte, no poseen lóbulo ya que su frente queda circunscrito al valle.

**Glaciares en calota (*Ice Caps*):** glaciares que se emplazan en un relieve cónico, ya sea una montaña o volcán y, por lo tanto, poseen forma de domo. El hielo fluye de manera radial, naciendo desde el centro del domo hacia los contornos, lugar donde se produce la ablación.

**Campos de hielo (*Ice Fields*):** grandes superficies de hielo que poseen una zona de acumulación subhorizontal tipo *plateau* en altura. Suelen estar rodeados por topografía escarpada, más allá de la cual el campo de hielo aprovecha los valles glaciales para desaguar aguas abajo en forma de lenguas, formando glaciares de valle o, incluso, de piedemonte.

**Glaciares de cráter (*Crater Glaciers*):** como su nombre lo indica, son glaciares que se emplazan en depresiones topográficas circulares. Por lo mismo, suelen estar ubicados en cráteres volcánicos. Esta topografía impide el desagüe del hielo, quedándole como única alternativa fluir hacia el centro de la depresión. Pierden masa exclusivamente por ablación superficial y/o por el calor geotermal proveniente de la actividad volcánica, sí la hay.

**Glaciares de montaña (*Mountain Glaciers*):** glaciares de forma variada que a veces pueden asemejarse a glaciares de valle. Sin embargo, suelen diferenciarse de estos últimos por ser más anchos que largos. Como su nombre indica, se ubican en las partes altas de los cordones montañosos. Su zona de acumulación es bien definida y su zona de ablación suele darse en forma de una pequeña lengua.

**Glaciares de circo (*Cirque Glaciers*):** similares a los glaciares de cráter por ubicarse en depresiones, sin embargo, se diferencian de estos por tener uno de sus flancos abiertos. La topografía que da origen a estos glaciares fue modelada por ellos mismos. Por lo mismo, las paredes del circo suelen ser escarpadas y terminar en *horns* o *arêtes*. El flanco abierto del circo corresponde al lugar por donde desaguaba el antiguo glaciar, que bien podía ser un glaciar de montaña o de valle.

**Glaciaretas (*Niche, wall-sided, Glaciarets, Ice Aprons o Cliff Glaciers*):** corresponde a los glaciares más pequeños. Se dan en lugares que suelen estar protegidos del sol y/o que son trampas de nieve, ya sea transportada por gravedad (avalanchas) o por viento. Pueden poseer cualquier forma y pueden no evidenciar flujo. En años muy secos tienden a desaparecer, cubrirse

de detritos o reducirse significativamente. Pueden incluso estar constituidos por nieve, siempre y cuando esta perdure dos veranos consecutivos.

**Glaciares rocosos (*Rock Glaciers*):** masa de hielo con alto contenido de detritos rocosos y totalmente cubierta por fragmentos de roca. Debido al alto contenido de material rocoso, estos glaciares evidencian tasas de flujo muy inferiores a las observadas en glaciares descubiertos. A su vez, estos glaciares pueden tener un origen glaciogénico o un origen periglacial. El primero se refiere a aquellos cuerpos de hielo que pasaron de ser glaciares descubiertos a glaciares de roca. Esto suele ocurrir producto de la combinación de diferentes factores, como el aumento del aporte de material detrítico y la disminución de la alimentación nivosa. El segundo se refiere a aquellos glaciares de roca que en su origen fueron suelo congelado o *permafrost* y que, producto de un aumento en la tasa de flujo, pueden llegar a formar una morfología ondulante indicativa de la presencia de flujo bajo la cubierta de detritos.

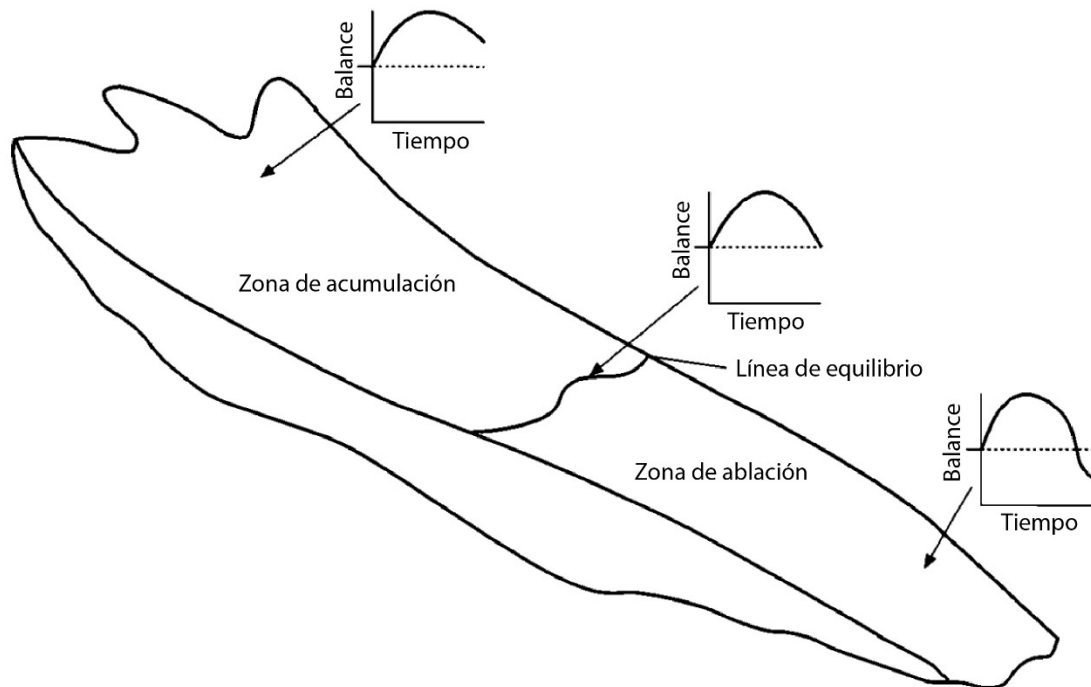
**Glaciares en conos volcánicos (*Active Volcano Glaciers*):** glaciares ubicados sobre volcanes activos. Esto produce una interacción glacio-volcánica que es recíproca. Por un lado, las distintas manifestaciones de actividad volcánica, como puede ser el calor geotermal o erupciones, implican una mayor tasa de derretimiento del hielo y la posible generación de lahares o flujos de detritos con alto contenido en agua. Por otro lado, el aporte de agua propiciado por el glaciar puede influir en el tipo de erupción volcánica, generando erupciones de tipo freato-magmáticas.

### 3.1.2 Balances de masa

Si bien existen distintas definiciones de lo que es un balance de masa, todas se refieren, a grandes rasgos, a la evaluación de la masa de nieve y hielo ganada en un periodo de tiempo (el cual suele ser el año hidrológico) en la zona de acumulación de un glaciar y su comparación con la masa perdida durante el mismo periodo en la zona de ablación (Marangunic et al., 2008). El glaciar puede, por tanto, ser concebido como un flujo de caja, donde las entradas corresponden a lo acumulado y se representan con signo positivo, mientras que las salidas corresponden a la ablación y se representan con signo negativo (Rivera et al., 2017).

Se dice que un glaciar está en equilibrio cuando su balance de masa es aproximadamente igual a 0 a mediano o largo plazo. Esto último cobra relevancia considerando que, para periodos cortos, el balance de masa suele ser distinto de 0 debido a la variabilidad anual inherente al clima. En términos prácticos, un glaciar en equilibrio posee un frente que no avanza ni retrocede y una superficie que mantiene la cota y forma (Marangunic et al., 2008). Esto último debe ser tomado con precaución, ya que cambios del frente del glaciar no necesariamente reflejan cambios en el balance de masa de las porciones más elevadas del glaciar, en particular de la zona de acumulación (Bamber & Rivera, 2007).





**Figura 11:** Progresión anual del balance de masa en distintas zonas de un glaciar tipo. El balance de masa total del glaciar se concibe como lo ganado en la zona de acumulación menos lo perdido en la zona de ablación. En realidad, producto de la alta variabilidad en cortos periodos de tiempo, las curvas debiesen ser muy accidentadas. En la figura han sido suavizadas e idealizadas para una mejor comprensión. Modificado de Cuffey & Paterson (2010).

### 3.1.2.1 Métodos para la medición de balances de masa

Existen diferentes métodos para estimar el balance de masa de un glaciar, tales como el método glaciológico, geodésico, hidrológico o combinado (Rivera et al., 2017). Entre ellos destaca el método glaciológico por entregar un conocimiento detallado de la dinámica de acumulación y ablación del glaciar a través de mediciones in situ de estacas instaladas en distintos puntos del glaciar (Rivera et al., 2009) y por haber sido el más utilizado antes del desarrollo de los sensores remotos como satélites, LiDAR o incluso InSAR. Sin embargo, este método requiere de una compleja logística de terreno, lo cual muchas veces dificulta su ejecución (Rossini et al., 2018).

Para efectos de este trabajo destaca el método geodésico, que se refiere a estimaciones del balance de masa a partir de cambios en la topografía del glaciar y mediciones de densidad. Puede ser aplicado mediante el uso de Modelos Digitales de Elevación (DEM por sus siglas en inglés), mapas topográficos, entre otros (Rivera et al., 2017). Si bien los productos satelitales pueden ser utilizados para estos fines y cuentan con la ventaja de cubrir grandes áreas por escena, suelen estar limitados por sus resoluciones espaciales y temporales (Gao & Liu, 2001). En la última década, la generación de DEM mediante Vehículo Aéreos No Tripulados (UAV por sus siglas en inglés) proveen una alternativa que soluciona gran parte de los problemas mencionados con los productos satelitales. Permiten un fácil acceso a zonas que de otra forma no son accesibles, una toma de datos con resoluciones centimétricas, bajos costos y la flexibilidad para ejecutar monitoreos de manera repetida (Rossini et al., 2018). Esto implica que la generación de DEM mediante UAV tiene el potencial para convertirse en una herramienta estandar en la investigación de cambios en el espesor de glaciares, dejando los DEM u otros productos satelitales para investigaciones de carácter regional (Fugazza et al., 2017).

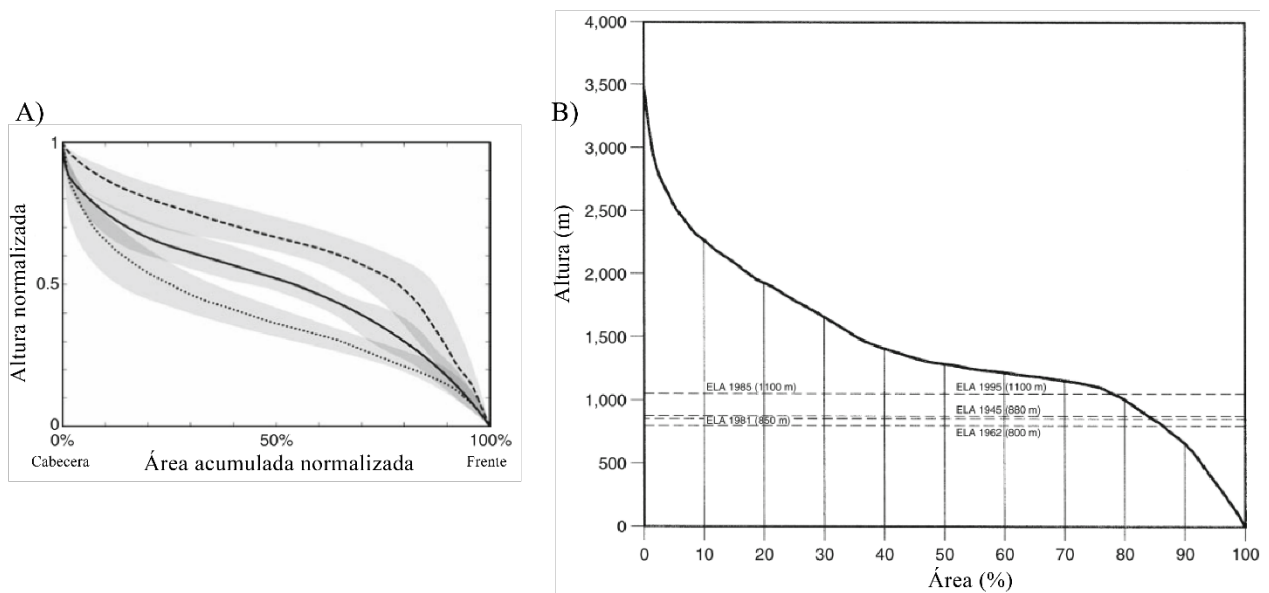
La generación de DEM mediante UAV se realiza a través de la fotogrametría. Para ello, se programa un vuelo de manera tal que el UAV recorra la totalidad del glaciar o la porción de este que se desea estudiar. En la medida en que el dron ejecuta el recorrido, se realiza la toma de fotografías cenitales (i.e. perpendiculares al suelo). Entre dos fotografías consecutivas debe existir un porcentaje de solape tal que sea posible aplicar la técnica fotogramétrica. Los DEM generados de esta forma poseen excelente precisión, con un rango de 3 – 10 cm. Sin embargo, para lograr tan bajo error, es preciso contar con una red de puntos terrestres de control bien distribuidos (GCP por sus siglas en inglés) (Dall’Asta et al., 2016). La ubicación de cada GCP debe ser conocida, para la cual se suele ocupar un GPS diferencial, dejando la estación base en los márgenes del glaciar y marcando la ubicación de los GCP con la estación móvil.

### **3.1.3 Hipsometría en glaciares**

La hipsometría se refiere al estudio de la distribución de la elevación de alguna porción de tierra que se desee estudiar. Se suele representar en gráficos de área acumulada con respecto a la altura. Esta última puede ser normalizada relativo a los rangos de elevación del área de estudio o, en este caso, del glaciar (Rivera et al., 2011). La curva resultante es conocida como curva hipsométrica.

Es posible clasificar glaciares según su curva hipsométrica. Para ello, se la compara con respecto a otra curva teórica, obteniéndose tres categorías diferentes; glaciares con curvas sobre la curva teórica, glaciares con curvas similares a la teórica y glaciares con curvas bajo la curva teórica (Figura 12-A). Los primeros corresponden a glaciares con grandes zonas de acumulación usualmente ubicadas en mesetas en altura. Los segundos a glaciares que mantienen un ancho relativamente constante desde la cabecera hasta el frente. Los terceros a glaciares con grandes zonas de ablación, como glaciares de piedemonte o glaciares que se alimentan a partir de varias zonas de acumulación diferentes (Rivera et al., 2011).

La curva hipsométrica otorga mayor conocimiento de la dinámica y evolución del glaciar si se compara con la evolución temporal de la ELA. Por ejemplo, si se tiene poca masa en la ubicación de la ELA, entonces cambios en esta no afectarán significativamente el balance de masas del glaciar. Viceversa, una ELA ubicada en una zona donde el glaciar es ancho puede afectar fácilmente la evolución del glaciar con pequeños cambios de altura (Figura 12-B).



**Figura 12:** A) Curvas hipsométricas glaciales típicas calculadas a partir de decenas de glaciares en Chile. B) Curva hipsométrica y cambios en la Altura de la Línea de Equilibrio del glaciar Pío XI. Modificado de Rivera et al. (2011).

### 3.1.4 Tiempo de respuesta

El tiempo de respuesta se define como el tiempo, usualmente medido en años, que le toma a un determinado glaciar adaptarse a cambios en el clima. Dicho de otra forma, es el tiempo que toma para pasar desde una situación de equilibrio estable, i.e. balance de masa igual a 0, a la siguiente situación de estabilidad luego de una perturbación en balance de masa (Johannesson et al., 1989; Bahr et al., 1998; Raper & Braithwaite, 2009).

Existen numerosas propuestas para calcular el tiempo de respuesta de un glaciar (Nye, 1960; Johannesson et al., 1989; Bahr et al., 1998; Harrison et al., 2001; entre otros). Dependiendo del método utilizado, los resultados varían significativamente, tal como demostraron Pelto & Hedlund (2001) al calcular el tiempo de respuesta de 17 glaciares con los métodos de Nye (1960) y Johannesson et al. (1989). A pesar de ello, se ha encontrado que, usualmente, glaciares ubicados en los casquetes polares tienden a mostrar tiempos de respuesta más elevados ( $10^2$  a  $10^3$  años) que aquellos glaciares ubicados en ambientes templados marinos o cordones montañosos ( $10^0$  a  $10^1$  años), tal como indican Raper & Braithwaite (2009).

El principal motivo por el cual calcular tiempos de respuesta es una tarea compleja se debe a que este depende de múltiples factores, como la geometría o hipsometría del glaciar, su ubicación, y procesos físicos poco conocidos. Por lo mismo, el tiempo de respuesta de un glaciar que se obtenga no debe ser considerado como una propiedad física intrínseca del glaciar (Pelto & Hedlund, 2001), sino más bien como una aproximación que entrega luces respecto a cómo se comportará frente a cambios en el clima.

A modo de referencia, Raper & Braithwaite (2009), aplicando una metodología propia, encontraron los siguientes tiempos de respuesta según zona geográfica:

**Tabla 1:** Tiempos de respuesta en distintas regiones del mundo, separados según área. Modificado de Raper & Braithwaite (2009).

Tiempos de respuesta (años)								
Región		Isla Axel Heiberg	Svalbard	Norte de Escandinavia	Sur de Noruega	Alpes	Cáucaso	Nueva Zelanda
Área	1 km <sup>2</sup>	771	880	144	138	71	54	30
	10 km <sup>2</sup>	906	1729	155	156	74	50	30
	50 km <sup>2</sup>	1012	2766	162	171	76	47	29

### 3.2 Productos satelitales aplicados a la glaciología

Desde el comienzo de la misión Landsat (1972), la utilización de imágenes satelitales para el estudio de glaciares ha ido en aumento. Esto es particularmente cierto con el surgimiento de imágenes con resoluciones más altas y el aumento de la capacidad computacional (Kargel et al., 2014). La cantidad de productos satelitales es amplia y permiten diversos estudios. Debido a que en el presente trabajo se hizo uso de imágenes satelitales para la confección del inventario y no para otros fines, nos referimos exclusivamente a aquellos productos satelitales empleados en la identificación de glaciares y su monitoreo. Esto último puede incluir: a) el mapeo de los límites de glaciares y sus zonas, b) la evolución temporal de los límites de glaciares, y c) la detección de flujo del hielo en glaciares. Para el desarrollo de esas tres categorías, se utiliza principalmente una porción del espectro electromagnético que va desde el visible (VIS) hasta el infrarrojo de onda corta (SWIR por sus siglas en inglés). Por lo tanto, se dejan de lado aquellos productos satelitales que operan en las bandas termal y de microondas, como pueden ser los Radars de Apertura Sintética (SAR por sus siglas en inglés) y el SAR Interferométrico (InSAR por sus siglas en inglés). También se omiten otros tipos de sensores remotos, como los *Light Detection and Ranging* (LiDAR).

#### 3.2.1 Conceptos básicos de las imágenes satelitales

En vista de lo recién expuesto, las distintas misiones satelitales que son de interés para este trabajo poseen atributos que las diferencian unas de otras. A grandes rasgos, estos atributos pueden ser resumidos en 4 características esenciales de los productos satelitales (Lattus, comunicación personal, 2020).

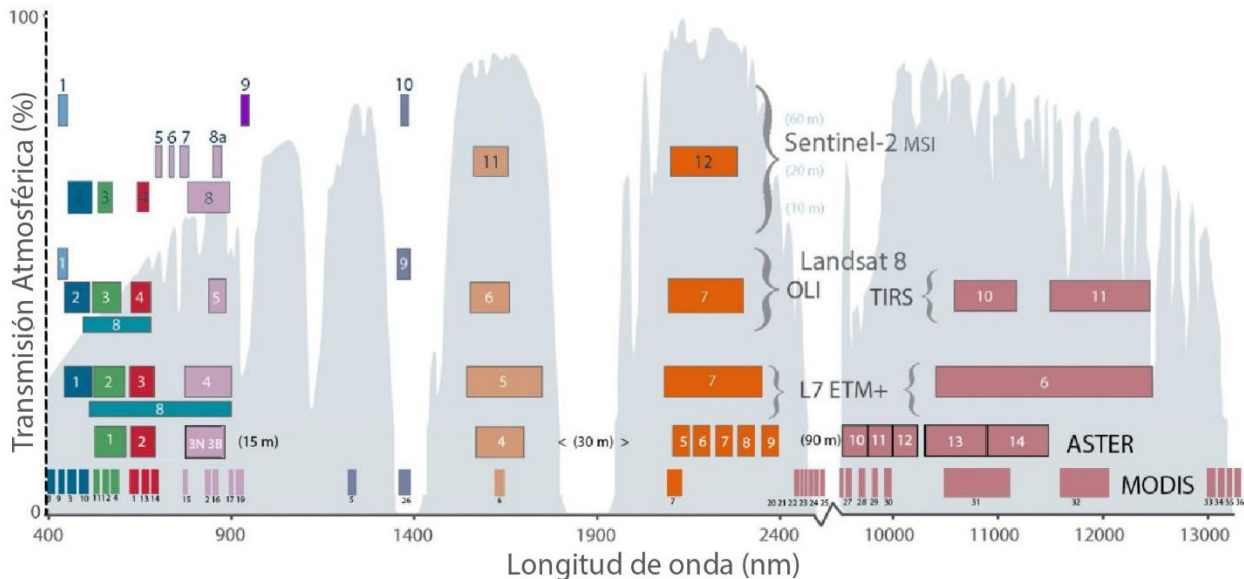
**Resolución espacial:** es el área que cubre cada píxel. Se suele hablar de una medida en unidades de distancia que, por lo general, es el metro. Por ejemplo, un producto satelital que posee una resolución de 30 m se refiere a una imagen donde cada píxel cubre un área de 30 por 30 metros.

**Resolución espectral:** las imágenes capturan la radiación electromagnética en distintas longitudes de onda. Según la cantidad y tipo de sensores que posea el satélite, cada una de estas longitudes de onda genera una imagen independiente que son llamadas “bandas”. A mayor número de bandas, mayor resolución espectral. La mayoría de las imágenes de alta resolución poseen 4 bandas, 3 bandas en el visibles (RGB) y 1 banda en el infrarrojo cercano. Cuando un satélite es capaz de generar entre 3 a 20 bandas por escena se habla de una imagen multiespectral. Cuando este número es mayor, se habla de imágenes hiperespectrales (Figura 13).

**Resolución radiométrica:** se refiere al número de valores que puede tener un píxel, independiente del tamaño de este, y se mide en bits. Así, una imagen de 1 bit posee 2<sup>1</sup> valores posibles por píxel (blanco y negro) y una imagen de 2 bits posee 2<sup>2</sup> valores posibles. La mayoría de las imágenes satelitales poseen resoluciones radiométricas superiores a los 8 bits, de 16 o 32 bits. Sin embargo, los monitores de los computadores solo muestran una resolución de 8 bits, es

decir 256 valores diferentes por píxel, ya que es la profundidad de bits que el ojo humano puede capturar. A pesar de ello, la información está presente y puede, por lo tanto, ser procesada.

**Resolución temporal:** se refiere al tiempo que demora un sensor en volver a capturar una imagen sobre una misma zona. A mayor frecuencia, mayor resolución temporal y viceversa. Por ejemplo, las imágenes Landsat tienen una resolución temporal de 16 días. Esto quiere decir que una vez que el satélite captura una escena, habrá que esperar 16 días para tener la siguiente escena del mismo lugar.



**Figura 13:** Transmisión atmosférica y bandas espectrales para distintos sensores. Se incluyen los productos Sentinel 2, Landsat 8 (OLI), Landsat 7 (ETM+), ASTER y MODIS. Modificado de USGS Landsat Program (2017).

### 3.2.2 Imágenes satelitales para la identificación y monitoreo de glaciares

Existen numerosas misiones satelitales que permiten el estudio de glaciares. Destacan las misiones Landsat, Sentinel y ASTER por su disponibilidad gratuita en la base de datos del Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS por sus siglas en inglés) y resoluciones espaciales lo suficientemente altas como para alcanzar a identificar glaciares con áreas reducidas (Kargel et al., 2014). Los satélites Landsat TM/ETM+/OLI son particularmente útiles para la actualización de inventarios dada su gran cobertura por escena y resoluciones relativamente altas (30 m). Por otro lado, los datos de la misión ASTER proveen una resolución espacial dos veces más alta que Landsat en el visible y el infrarrojo cercano (15 m), pero escenas con menor cobertura superficial (un noveno de las escenas Landsat). Sentinel 2, la última de las misiones en ser lanzada, es probablemente la mejor opción gratuita en la actualidad, al ofrecer resoluciones aún mayores que ASTER (10 m), escenas más grandes que ASTER y una resolución temporal baja, que puede descender a 5 días si se consideran ambos sensores que orbitan la Tierra en configuración tipo *tandem*, Sentinel 2-A y Sentinel 2-B.

Las imágenes satelitales que se encuentran disponibles de manera gratuita tienen resoluciones relativamente bajas al ser comparadas con imágenes satelitales de misiones privadas. Estas últimas pueden alcanzar resoluciones espaciales centimétricas, lo que permite una mucho mejor delimitación de los cuerpos de hielo. Algunos ejemplos comunes de estas son las imágenes de la misión SPOT (1,5 m), PLEIADES (0,5 m), GeoEye-1 (0,41 m), entre otras. Sin embargo, estos productos satelitales son costosos y suelen contar solamente con 4 o 5 bandas.

### 3.2.3 Correcciones, combinaciones de bandas e índices espectrales

La transferencia radiativa se ve afectada por distintos elementos, ya sea el paisaje, la atmósfera o el sensor mismo (Kargel et al., 2014). Por lo tanto, el número digital (DN por sus siglas en inglés), que es el número medido en el sensor, no representa ni la radiancia ni la reflectancia del material terrestre. Para obtener la reflectancia, que es la información propia del material o elemento que se desea estudiar, es necesario realizar ciertas correcciones. Con ellas, lo que se busca es eliminar el efecto que el sensor y la atmósfera puedan haber tenido en la imagen. A grandes rasgos, el DN es el producto en bruto, que contiene la información del material, pero está distorsionado por efecto de la atmósfera y del sensor. Al aplicar una corrección radiométrica, eliminamos el efecto del sensor y obtenemos un producto en radiancia. Luego, al aplicar una corrección atmosférica, eliminamos el efecto de la atmósfera y obtenemos la reflectancia. Ambas correcciones pueden ser ejecutadas, de manera sencilla, en los softwares especialmente diseñados para el procesamiento de imágenes satelitales.

Una vez aplicadas las correcciones, es posible procesar las imágenes satelitales para obtener distintos productos. Entendiendo que las escenas satelitales están conformadas por múltiples imágenes llamadas bandas, y que cada una de esas bandas posee, a su vez, píxeles con distintos valores, podemos conceptualizar cada banda como una matriz, donde cada uno de los píxeles es un valor distinto de la matriz. Esto permite combinar bandas, píxel a píxel, y generar subproductos satelitales. Este proceso se conoce como combinación de bandas. A través de la combinación de bandas podemos calcular, por ejemplo, el albedo del glaciar o aplicar índices espectrales para automatizar la delimitación de cuerpos de hielo. De particular interés para el desarrollo de este trabajo, son el Índice de Diferencia Normalizada de Nieve (NDSI por sus siglas en inglés) y el Índice de Diferencia Normalizada de Agua (NDWI por sus siglas en inglés), que permiten identificar nieve y/o hielo y agua respectivamente y se definen de la siguiente manera (Hall et al., 1995):

$$NDSI = \frac{Green - SWIR}{Green + SWIR} \quad (1)$$

Donde *Green* corresponde a la banda que incluye las longitudes de onda del color verde y *SWIR* a la banda de longitud de onda corta en el infrarrojo.

$$NDWI = \frac{Green - NIR}{Green + NIR} \quad (2)$$

Donde *NIR* corresponde a la banda del infrarrojo cercano.

## 3.3 Patrimonio geológico y Geoparques

### 3.3.1 Definición de patrimonio geológico y algunos conceptos básicos

El patrimonio geológico, conocido también como geopatrimonio, consta de numerosas definiciones. En España, y no así en Chile, el patrimonio geológico queda definido por la ley, en particular en el artículo 3.38 de la Ley 42/2007 (Carcavilla, 2014). En ella, se define al patrimonio geológico como “el conjunto de recursos naturales geológicos de valor científico,

cultural y/o educativo, ya sean formaciones y estructuras geológicas, formas del terreno, minerales, rocas, meteoritos, fósiles, suelos y otras manifestaciones geológicas que permiten conocer, estudiar e interpretar: a) el origen y evolución de la Tierra, b) los procesos que la han modelado, c) los climas y paisajes del pasado y presente y d) el origen y evolución de la vida”. Según esta definición, así como en la mayoría, queda indicado el hecho que son patrimonio solo aquellos recursos naturales geológicos de valor. Esto genera una distinción entre los elementos del patrimonio geológico y el resto de los elementos geológicos. Agrupando ambas categorías se tiene lo que se conoce como geodiversidad, que, a su vez, se define como “la variedad de rocas, fósiles, minerales, geoformas, suelos y elementos tectónicos e hidrológicos que ocurren en nuestro planeta” (Andrasanu, 2006). De hecho, este mismo autor define al geopatrimonio como “la parte con valor de la geodiversidad”.

Otros autores proponen definiciones más academicistas para el patrimonio geológico. Tal es el caso de (Brilha, 2016), quien, en un intento por mantener la rigurosidad del término, lo define como elementos de la geodiversidad que poseen un elevado valor científico. Otros tipos de valores, como pueden ser el valor estético o el valor cultural, son, según el autor, adicionales y no imprescindibles. Destaca de esta definición la distinción entre patrimonio *ex situ* e *in situ*. El primero se refiere a elementos del geopatrimonio mueble, i.e. de carácter móvil, como fósiles o minerales, para el cual suele ser conveniente su traslado a museos o salas interpretativas, donde pueden ser aprovechados y protegidos de manera simultánea. Los elementos del patrimonio geológico *in situ*, de carácter inmueble, son también conocidos como geotopos, Lugar de Interés Geológico (LIG) o geositios. Esta última designación es la que se ha establecido como estándar en Chile. Para efectos del presente trabajo, se hablará de geositios.

Otra definición, proporcionada por Gallego & García (1996), lo define como “el conjunto de recursos naturales no renovables de carácter científico, cultural o educativo, ya sean formaciones y estructuras geológicas, formas del terreno, yacimientos paleontológicos y minerales, que permitan reconocer, estudiar, e interpretar la evolución de la historia geológica de La Tierra y los procesos que la han modelado”. Esta definición precisa el carácter no renovable, típico del geopatrimonio. Duran et al. (1996), afirman que algunos elementos de la geodiversidad y, por ende, del geopatrimonio, si son de carácter renovable, como lo son algunos recursos hídricos. Esta observación, si bien acertada, no niega una característica importante del geopatrimonio: la destrucción de sus elementos es casi siempre irreversible e irrecuperable (Carcavilla, 2007). De allí la relevancia de la geoconservación, concepto que se refiere a la conservación de los elementos de la geodiversidad.

Considerando las definiciones analizadas, es posible afirmar que los glaciares y, en realidad, cualquier elemento de la criósfera, son parte constitutiva de la geodiversidad. De hecho, (Carcavilla, 2014) explicita que los glaciares son parte de la geodiversidad y que, por tanto, pueden ser elementos del patrimonio geológico.

De ahora en adelante se entenderá por patrimonio geológico la definición provista por la ley española 42/2007 ya que es la más laxa y flexible de las analizadas.

### **3.3.2 Estado del arte del patrimonio geológico en Chile**

Chile posee características que lo convierten en un país con un patrimonio geológico extremadamente rico y diverso (Benado et al., 2019; Schilling et al., 2015). A pesar de ello, el

desarrollo del patrimonio geológico como disciplina es aún incipiente y se concentra principalmente en la última década, siendo difícil encontrar iniciativas que se remontan al siglo XX o la primera década del siglo XXI (Benado et al., 2019). Esta situación es promovida por diversos motivos, donde destaca: a) la ausencia de una ley que reconozca el patrimonio geológico como objeto de conservación, b) el bajo número de geocientistas en posiciones de toma de decisiones en la gestión del patrimonio geológico, y c) la carencia de un estudio sistemático e integrado a nivel nacional acerca de la conservación y aprovechamiento del patrimonio geológico (Pérez, 2022).

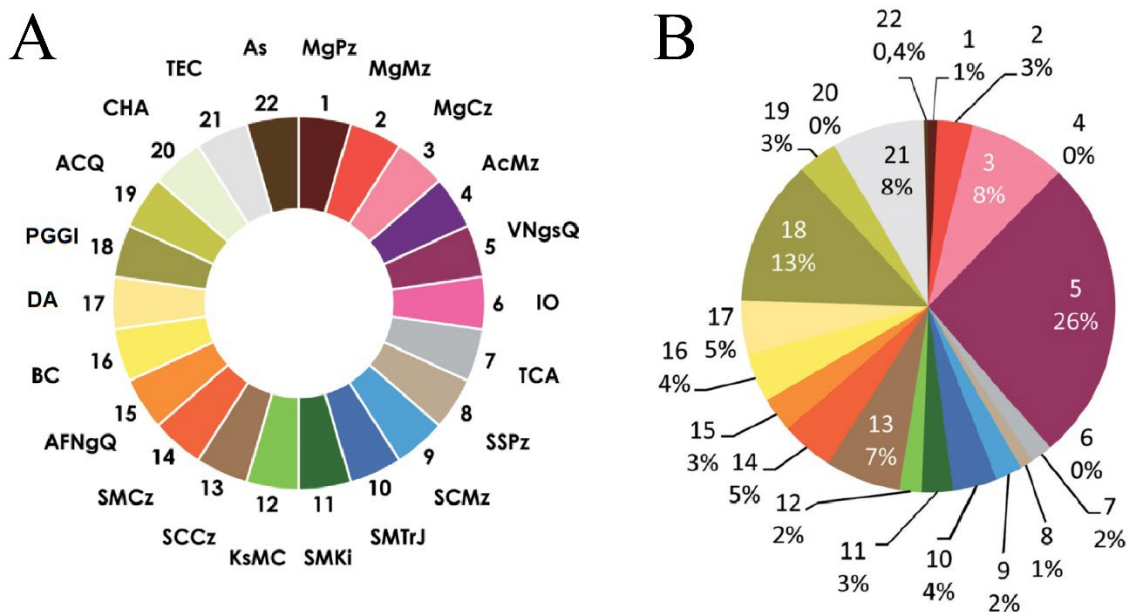
Los primeros trabajos sobre geopatrimonio fueron liderados por la Sociedad Geológica Chilena (SGCh), en particular por el Sr. Francisco Hervé, quienes, en 2007, crean el “Programa de Detección y Establecimiento de Geositios en Chile” (Benado et al., 2019). A través de este programa, la SGCh ha identificado y caracterizado 84 geositios los cuales están disponibles en un sitio web específicamente implementado para su visibilización y puesta en valor<sup>1</sup>. De estos 84 geositios, apenas uno corresponde a un glaciar (geositio Glaciar La Paloma), lo que denota la subrepresentación de los glaciares en iniciativas geopatrimoniales.

Una herramienta importante en la identificación de geositios son los Contextos Geológicos (CG). De hecho, el proyecto *Global Geosites* de la Unión Internacional de Ciencias Geológicas (IUGS) y de la UNESCO sugiere la definición de CG para cada país, con el objetivo de identificar y caracterizar como geositios aquellos elementos de la geodiversidad que sean de mayor relevancia para cada uno de estos contextos (Schilling et al., 2015). En vista de ello, (Mourgues et al., 2012) definieron 22 contextos geológicos nacionales. De ellos, dos se refieren, indirecta y directamente, a glaciares. Estos son el CG “Geoformas y depósitos glaciales del centro y sur de Chile” y el CG “Campos de Hielo e Inlandsis Antártico”. El primero no considera glaciares, solo sus geoformas y depósitos asociados, y el segundo solo integra glaciares de los campos de hielo de la Patagonia y de la Antártica. Esto implica que no existe un CG para el resto de los glaciares en el territorio nacional. De hecho, Schilling et al. (2015), a través de la recopilación de diferentes trabajos y proyectos, donde se incluye el “Programa de Detección y Establecimiento de Geositios en Chile” de la SGCh y el “Programa de Geología para el Ordenamiento Territorial” del Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN), lograron identificar un total de 256 geositios en territorio nacional. De estos, no existe ninguno que sea representativo del CG “Campos de Hielo e Inlandsis Antártico” (Figura 14).

---

<sup>1</sup> <https://geositios.cl/>





**Figura 14:** A) Los 22 contextos geológicos nacionales según (Mourgues et al., 2012). Estos son: 1) Magmatismo Paleozoico, 2) Magmatismo Mesozoico, 3) Magmatismo y volcanismo Cenozoico, 4) Arco volcánico del Mesozoico, 5) Volcanismo Neógeno superior - Cuaternario y campos geotermiales, 6) Islas y piso oceánicos, 7) Terrenos Exóticos y Complejos de Acreción, 8) Series Sedimentarias del Paleozoico, 9) Series Continentales Mesozoicas y sus fósiles, 10) Cuencas marinas del Triásico, Jurásico y Cretácico, 11) Cuencas marinas del Cretácico Inferior, 12) El Cretácico Superior marino de Magallanes y Chile, 13) Series continentales cenozoicas y sus fósiles, 14) Series marinas cenozoicas y sus fósiles, 15) Ambientes fluvioaluviales del Neógeno-Cuaternario, 16) Borde Costero, 17) Desierto de Atacama, 18) Procesos, geoformas y depósitos glaciales del centro y sur, 19) Ambientes Continentales del Cuaternario, la megafauna y los primeros habitantes de América, 20) Campos de Hielo e Inlandis Antártico, 21) Mega Estructuras, Tectónica Andina y Neotectónica y 22) Geoformas por impactos y materiales del Sistema Solar incorporados a la Tierra. B) Número y porcentaje de geositos según CG. Nótese la ausencia de un CG que represente los glaciares del territorio nacional continental fuera de los campos de hielo patagónicos y la ausencia de geositos representativos del CG “Campos de Hielo e Inlandis Antártico”. Modificado de (Schilling et al., 2015).

### 3.3.3 Geoparques y su estado del arte en Chile

De manera particular y autónoma, han sido principalmente las iniciativas de Geoparques las que han permitido el desarrollo de estrategias de conservación, geoturismo y educación en torno al recurso geopatrimonial (Pérez, 2022). A grandes rasgos, los Geoparques son modelos de gestión territorial que tienen como fin último el desarrollo sostenible de los territorios a través de la puesta en valor del geopatrimonio, la educación, la geoconservación y del trabajo con sus comunidades locales mediante un enfoque *bottom-up*, o de abajo hacia arriba. Los Geoparques, si bien no son reconocidos por el Estado chileno, son figuras UNESCO y están bajo el amparo de la Red Global de Geoparques (GGN por sus siglas en inglés).

En la actualidad, Chile cuenta con sólo un Geoparque Mundial de la UNESCO, el Geoparque Kütralkura, ubicado en la Araucanía y reconocido como tal recién en abril del 2019, luego de 10 años de trabajo (Benado et al., 2019). A pesar de ello, existen otras 5 iniciativas que, si bien no son aún reconocidas por UNESCO, buscan consolidarse como Geoparques Mundiales e integrar la GGN. Estas iniciativas son, de norte a sur, los proyectos Geoparque Atacama, Geoparque Valle de Petorca, Geoparque Puchuncaví, Geoparque Cajón del Maipo, Geoparque Pillanmapu y Geoparque Minero Litoral del Biobío.

El proyecto Geoparque Pillanmapu, zona de estudio del presente trabajo, se ubica en la precordillera y cordillera de la VII región del Maule, en las comunas de Romeral, Curicó, Molina,

San Clemente, Colbún y Linares. En sus 4 años de trabajo, se han identificado 102 potenciales geositios, de los cuales 39 han sido evaluados cuantitativamente según la metodología de Brilha (2016). A partir, de la valorización de estos geositios, 20 fueron seleccionados para integrar el inventario regional. De estos 20 geositios, ninguno corresponde a un glaciar.

Es pertinente entonces preguntarse, entendiendo que Chile es uno de los países con mayor superficie glacial y número de glaciares, porque existe una tan baja representatividad de este importante elemento de la geodiversidad en los estudios geopatrimoniales. Si bien esta pregunta no ha sido antes planteada, una posibilidad radica en el carácter multidisciplinario propio de los glaciares y de la glaciología, tal como se mencionó en el apartado 3.1. La gran mayoría de las metodologías para la evaluación del geopatrimonio han sido diseñadas para evaluar elementos de la geodiversidad que están más próximos al campo de la geología tradicional (afloramientos rocosos, estructuras geológicas, petrología, geoformas, minerales, entre otros), dejando parcialmente de lado otros elementos de la geodiversidad que requieren de un análisis más multidisciplinario. Por lo mismo, estas metodologías no permiten una evaluación acertada en glaciares, desincentivando su estudio en iniciativas geopatrimoniales.

### **3.4 Metodologías para la evaluación del geopatrimonio**

#### **3.4.1 Generalidades**

Considerando que muchos de los geositios o elementos del geopatrimonio son utilizados por geocientistas en sus investigaciones, existe también interés por parte de la academia de inventariarlos, evaluarlos y conservarlos (Brilha, 2016). El interés no solo se restringe a la academia, sino que también existe en iniciativas como los Geoparques Mundiales de la UNESCO. Este proceso se ve dificultado producto de la amplia diversidad que caracteriza al geopatrimonio, pudiendo estar representado por elementos tan variados como glaciares, volcanes, ríos, fósiles o minerales y pudiendo destacar tanto por su valor científico, estético, educativo, turístico, ecosistémico o cultural. Adicionalmente, el contexto en el que se enmarque el estudio del geopatrimonio también afecta su evaluación, no siendo lo mismo, por ejemplo, evaluar el potencial de uso turístico de un geositio en Europa, Asia o Sudamérica.

A raíz de lo recién expuesto, han surgido numerosas metodologías para la evaluación del geopatrimonio. Mucivuna et al. (2019) encontró 71 metodologías distintas seleccionando solamente publicaciones en inglés, revisadas por pares y destinadas exclusivamente para la evaluación de geositios geomorfológicos, lo que da cuenta del enorme número de propuestas existentes<sup>2</sup>.

La mayoría de los estudios se enfocan en la generación de inventarios de geositios y su evaluación, tanto cuantitativa como cualitativa. En general, se reconoce el inventario como el primer paso para desarrollar cualquier iniciativa de geoconservación o promoción del geopatrimonio (Brilha, 2016; García-Cortés et al., 2014; Mucivuna et al., 2019; Reynard et al., 2016). Para la generación del inventario, la herramienta más importante es la evaluación cuantitativa, ya que es de suma utilidad para la propuesta de estrategias de gestión del geopatrimonio (Brilha, 2016).

---

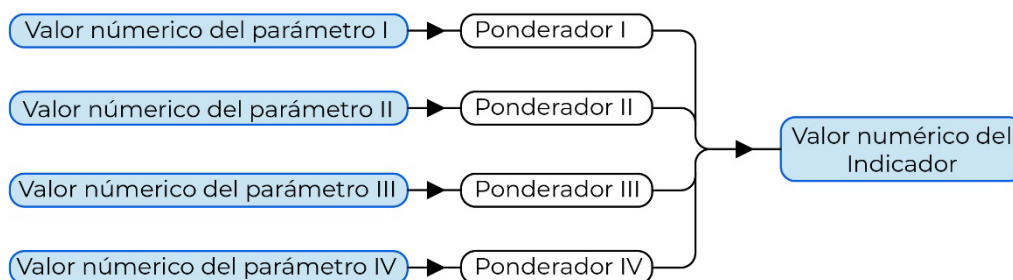
<sup>2</sup>En la actualidad no existe ninguna metodología específicamente diseñada para la evaluación de glaciares desde la mirada geopatrimonial.

### 3.4.2 Estructura de las metodologías para la evaluación del geopatrimonio

Es posible identificar dos componentes que se repiten en las metodologías para la evaluación del patrimonio geológico: a) una estructura general, que de ahora en adelante será llamada “estructura metodológica”, compuesta por distintos pasos que permiten al usuario aplicar la metodología a cabalidad, y b) la evaluación cuantitativa, donde se calculan indicadores (llamados también valores o *values* en inglés) para cada geositio que dan cuenta de su potencial turístico y/o educativo, riesgo de degradación, valor científico, entre otros. La evaluación cuantitativa es, en realidad, un paso más dentro de la estructura metodológica, pero debido a su relevancia y extensión se suele presentar por separado.

A grandes rasgos, la estructura metodológica se repite entre las distintas metodologías (Brilha, 2016; Fassoulas et al., 2011; García-Cortés et al., 2014; Pereira et al., 2007; Reynard et al., 2007; Santos et al., 2020). Por lo general, el primer paso es identificar los potenciales geositios que se quieran evaluar de manera remota, ya sea mediante revisiones bibliográficas o consultas a expertos y/o conocedores de la zona. Luego, se realizan las campañas de campo donde se levanta la información de cada uno de estos lugares y de cualquier otro lugar nuevo que pueda identificarse en terreno. Finalmente, se procesa la información, evaluando de manera cuantitativa cada lugar para definir cuáles serán los geositios que integren el inventario final.

Las evaluaciones cuantitativas también suelen seguir una lógica que se repite entre las distintas propuestas. El cálculo de cada indicador se realiza en base a distintos parámetros, otorgándosele un valor numérico a cada uno de ellos. Adicionalmente, muchos autores (Bruschi et al., 2011; Zhang et al., 2013; García-Cortés et al., 2014; Brilha, 2016; Santos et al. 2020; entre otros) ponderan los distintos parámetros bajo la idea de que no todos tienen la misma relevancia para el cálculo de un determinado indicador (Figura 15). Algunos ejemplos recurrentes de parámetros son rareza, integridad, representatividad, potencial didáctico, proximidad a zonas pobladas, accesibilidad, vulnerabilidad, entre otros.



**Figura 15:** Esquema ilustrativo del cálculo de un determinado indicador en base a sus respectivos parámetros. En este ejemplo, el indicador es calculado en base 4 parámetros distintos con sus respectivas ponderaciones.

A partir de la evaluación cuantitativa de los geositios, es posible diseñar estrategias para la gestión y planificación territorial de estos. Esto último suele ser el objetivo final de las metodologías para la evaluación del geopatrimonio.

### **3.5 Legislación glaciar chilena, proyecto de ley “Ley de protección y preservación de glaciares”**

La historia legislativa en torno a los glaciares se remonta al año 2005, cuándo Michelle Bachelet firma, junto a diversas organizaciones ecologistas, el “Acuerdo de Chagual” donde se explicitaba la protección de glaciares (Herr, 2014). A partir de ese momento, la historia legislativa glaciar ha pasado por un proceso largo y engorroso, donde se han archivado y desarchivado los distintos proyectos de ley numerosas veces (CEM, 2020).

A la fecha de redacción de este trabajo, se tramita en la cámara del senado la sexta versión del proyecto de ley “Protección y Preservación de Glaciares”, en particular a cargo de la comisión de Minería y Energía. La versión original de este proyecto se componía de 7 artículos que se refieren a las siguientes materias: Art. 1º) objetivo general de la ley, donde se establece que su fin es el de preservar y conservar los glaciares, ambientes glaciares y periglaciares y el permafrost, Art. 2º) se entregan definiciones de glaciar, ambiente glaciar, ambiente periglaciario y permafrost, Art. 3º) se indica la naturaleza jurídica de los glaciares, reconociéndolos como bienes nacionales de uso público y que, por lo tanto, se encuentran fuera del comercio humano y son inapropiables por parte de personas, ya sean naturales o jurídicas, Art. 4º) se indica el ámbito de aplicación de la ley, es decir, todo el territorio nacional, independiente si se encuentran dentro de territorio privado, público, protegido o no, Art. 5º) se detallan las prohibiciones, indicando que no se podrá realizar actividades que generen impactos significativos o daños irreversibles tales como remoción, traslado o destrucción, entre otros, Art. 6º) se explicitan las sanciones por infracción de la ley, Art. 7º) se establece la vigencia de la ley, indicando que al momento de enterar en vigencia, deberán cesar todas las actividades que afecten los objetos de conservación definidos por la ley (Hernández, 2020).

En junio del 2021, la comisión de Minería y Energía, luego de realizar algunas modificaciones, aprueba el nuevo proyecto de ley, el cual quedó en las siguientes condiciones: a) se prohibiría cualquier actividad minera o industrial en glaciares de cualquier tipo (blancos o rocosos) y se permitirían actividades turísticas, deportivas o de investigación científica, b) para el ambiente periglaciario, toda actividad que quedase fuera de lo permitido por la ley, ya sean actuales o futuras, deberán someterse a un Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental reforzado y calificado, y c) se contemplan sanciones penales para los ejecutivos de las empresas mineras y otras que no cumplan con las medidas de la ley (Senado, 2021). Posterior a su aprobación por la comisión mencionada, el proyecto pasó a la comisión de Medio Ambiente quienes, el 7 de marzo del 2022, también aprobaron el proyecto. Actualmente, el proyecto de ley está en manos de la comisión de Hacienda.

## **CAPÍTULO 4. METODOLOGÍA**

### **4.1 Metodología para el O.E.1: Diseñar una metodología para la evaluación de glaciares**

La metodología para la evaluación de glaciares fue diseñada a partir de distintas fuentes: a) un análisis bibliográfico de distintas metodologías para la evaluación del geopatrimonio y de otras metodologías o manuales para el estudio de glaciares, y b) dos encuestas realizadas a especialistas en las áreas de la glaciología y el geopatrimonio. A continuación, se detalla la metodología empleada para desarrollar estos puntos.

#### 4.1.1 Selección de metodologías para la evaluación del patrimonio geológico

Se analizaron distintas metodologías para la evaluación del patrimonio geológico. Entendiendo que existen cientos de estas, se utilizaron algunos criterios para su selección:

- i. Se recopilaron las metodologías utilizadas en los proyectos de geoparques y Geoparques Mundiales de la UNESCO que se desarrollan actualmente en Chile. Para ello, se realizó una breve consulta a los coordinadores científicos de cada uno de los proyectos. Para agilizar este proceso, se aprovecharon los canales disponibles en el Grupo Geoparques de Chile, el cual reúne todos los proyectos de geoparque y al único Geoparque Mundial de la UNESCO chileno. Estos son, de norte a sur:
  - i. Proyecto Geoparque Atacama
  - ii. Proyecto Geoparque Valle de Petorca
  - iii. Proyecto Geoparque Puchuncaví
  - iv. Proyecto Geoparque Cajón del Maipo
  - v. Proyecto Geoparque Pillanmapu
  - vi. Proyecto Geoparque Minero Litoral del Biobío
  - vii. Geoparque Mundial de la UNESCO KütralkuraPor otro lado, se contactó al coordinador del proyecto de geoturismo, Patagonia Verde y a dos miembros del grupo de especialistas en geopatrimonio de la Sociedad Geológica de Chile (SGCh).
- ii. Se recopilaron metodologías adicionales que son de relevancia internacional y/o que son representativas de los métodos utilizados en otras partes del mundo, como Asia y Europa. Para ello, se tomaron publicaciones que son citadas con frecuencia en otras metodologías y que fueran revisadas por pares.
- iii. Se filtraron metodologías, ya que algunas se repiten entre el punto i y ii. Otras son actualizaciones de sus versiones anteriores, como ocurre con García-Cortés et al. (2013) y García-Cortés et al. (2014). En estos casos se seleccionó siempre la versión más moderna.

De este modo, las metodologías seleccionadas para su estudio fueron las siguientes:

- i. Pereira et al. (2007)
- ii. Martínez (2008)
- iii. Bruschi et al. (2011)
- iv. Fassoulas et al. (2011)
- v. Zhang et al. (2013)
- vi. García-Cortés et al. (2014)
- vii. Alfaro & Sepúlveda (2015)
- viii. Brilha (2016)
- ix. Reynard et al. (2016)
- x. Suzuki & Takagi (2018)
- xi. Santos et al. (2020)
- xii. Metodología de la SGCh

#### 4.1.2 Análisis de las metodologías para la evaluación del patrimonio geológico seleccionadas

Una vez realizada la selección de metodologías, estas fueron estudiadas y comparadas con miras a esclarecer qué elementos podrían incluirse en la metodología para la evaluación de glaciares y de qué elementos sería posible prescindir.

Como se mencionó en el apartado 3.4.2, es posible identificar dos componentes esenciales de las metodologías para la evaluación del geopatrimonio: a) la estructura metodológica, y b) la evaluación cuantitativa. Si bien la evaluación cuantitativa forma parte de la estructura metodológica siendo un paso más dentro de esta, su extensión e importancia la convierten en un elemento que amerita ser analizado por separado. Así, se realizó un análisis de la estructura metodológica propuesta por los distintos autores y otro análisis exclusivo para la evaluación cuantitativa.

El análisis de la estructura metodológica consistió en identificar los pasos que proponen sus respectivos autores para evaluar el o los geositos en cuestión. Estos pasos fueron diagramados para facilitar su comprensión. Luego, se realizó una breve síntesis de lo identificado, mencionando aquellos aspectos que se repiten con frecuencia entre las distintas metodologías.

El análisis de la evaluación cuantitativa consistió, en primer lugar, en identificar los indicadores que según los diversos autores es necesario cuantificar. Algunos ejemplos de indicadores son Valor Científico, Riesgo de Degradación, Valor de Uso Educativo, entre otros. Luego, se analizaron los parámetros que integra cada indicador. Debido a que para calcular cada indicador se utilizan múltiples parámetros (Figura 15), el análisis de estos es más complejo. Solo en una metodología pueden utilizarse más de 40 parámetros distintos. Por ello, se decidió analizar exclusivamente aquellos que fueron utilizados para determinar los indicadores que se repiten en, al menos, la mitad de las metodologías, dejando fuera del análisis el resto de los indicadores. Finalmente, y al igual que para la estructura metodológica, también se sintetizó lo identificado, mencionando aquellos indicadores y parámetros que se repiten con frecuencia entre las distintas metodologías.

#### **4.1.3 Diseño de la estructura metodológica**

Para el diseño de la estructura metodológica se consideró el análisis recién mencionado de las 12 metodologías para la evaluación del patrimonio geológico. Adicionalmente, se consideraron otras metodologías o manuales para el estudio de glaciares como el Manual Balance de Masa (Rivera et al., 2017) y el Manual de Glaciología (Marangunic et al., 2008).

#### **4.1.4 Diseño de la evaluación cuantitativa**

##### **4.1.4.1 Encuesta para la definición de indicadores**

Como se mencionó en el apartado 3.4, las metodologías para la evaluación del patrimonio geológico incluyen la evaluación cuantitativa como una de sus herramientas más potentes para la gestión del geopatrimonio. Estas evaluaciones se realizan a través del cálculo de distintos indicadores. Cada metodología propone diferentes indicadores, muchas veces de manera arbitraria, como parte de la propuesta del autor. Buscando definir indicadores menos subjetivos, se realizó una encuesta a expertos del área de la glaciología y a expertos del área del geopatrimonio. Se formularon dos conjuntos distintos de preguntas según el área de especialidad del encuestado. Además, se aprovechó la instancia para recabar información de utilidad para

otros aspectos de este trabajo, como, por ejemplo, la definición del tamaño mínimo de un glaciar (Tabla 2).

#### **4.1.4.2 Definición de indicadores y parámetros**

La definición de los indicadores se realizó en base a tres criterios: a) la encuesta recién mencionada, b) el análisis bibliográfico de metodologías para la evaluación del geopatrimonio, y c) el análisis bibliográfico de metodologías o manuales para el estudio de glaciares como el Manual Balance de Masa (Rivera et al., 2017) y el Manual de Glaciología (Marangunic et al., 2008).

Por otro lado, los parámetros fueron definidos en base a dos criterios: a) el análisis bibliográfico de metodologías para la evaluación del geopatrimonio, y b) el análisis bibliográfico de metodologías o manuales para el estudio de glaciares.

#### **4.1.4.3 Encuesta para la definición de la ponderación de parámetros**

El cálculo de cada indicador proviene de una asignación numérica que se les otorga a distintos parámetros, los cuales son posteriormente ponderados (Figura 15). La definición de parámetros forma parte de la propuesta de este trabajo. No obstante, para la definición de los ponderadores se realizó una segunda encuesta donde se solicitó a los encuestados evaluar la importancia de cada parámetro en una escala de Likert (Tabla 3). A diferencia de la primera, para la segunda encuesta solo se definió un grupo de expertos conformado por expertos en glaciología. Esto se debe a que muchos de los criterios requieren de un conocimiento mínimo en la materia.

Buscando reunir más respuestas, esta segunda encuesta fue también enviada a través del repositorio de correos *Cryolist*<sup>3</sup>, para lo cual la encuesta fue traducida al inglés.

---

<sup>3</sup> <https://lists.cryolist.org/mailman/listinfo/cryolist>

**Tabla 2:** Encuesta para la definición de indicadores y otros puntos de interés.

<b>Público</b>	<b>Pregunta</b>	<b>Modalidad</b>
<b>Expertos en glaciología</b>	¿Considera importante evaluar el patrimonio glaciológico y los glaciares en general como insumo para la gestión y planificación territorial?	Opción múltiple
	La metodología incluirá una evaluación cuantitativa basada en el cálculo de distintos indicadores. Por favor, categorice los indicadores propuestos a continuación según la importancia que usted considere oportuna: valor científico, potencial de uso educativo, potencial de uso turístico, valor ecosistémico, valor cultural, valor económico, valor estético, riesgo de degradación, peligrosidad asociada.	Escala de Likert
	En relación con la pregunta anterior, indique métodos o técnicas que permitan medir, en alguna medida, los indicadores que catalogó como "extremadamente importante". En caso de que no haya catalogado ninguno como tal, puede proceder con aquellos catalogados como "muy importante".	Texto
	Algunas metodologías para la evaluación del geopatrimonio prefieren diferenciar el riesgo de degradación en 2 categorías distintas: la fragilidad, que se refiere al riesgo de degradación por procesos naturales, y la vulnerabilidad, que se refiere al riesgo de degradación por causas antrópicas. ¿Cree usted que es necesario diferenciar estas dos categorías para la evaluación del patrimonio glaciológico?	Opción múltiple
	En relación con la pregunta anterior, ¿cómo definiría el retroceso generalizado que están experimentando los glaciares en la actualidad? (Por favor, omita casos particulares como glaciares ubicados en la cercanía de actividades antrópicas que los afectan y refiérase solamente al caso general de retroceso glacial).	Opción múltiple
	La metodología incluirá la generación de un inventario de los glaciares existentes en la zona de estudio. ¿Qué tamaño mínimo cree que deberían tener los glaciares inventariados?	Texto
<b>Expertos en geopatrimonio</b>	¿Considera importante evaluar el patrimonio glaciológico y los glaciares en general como insumo para la gestión y planificación territorial?	Opción múltiple
	Existen ciertos elementos de la geodiversidad que poseen metodologías de evaluación especializadas, tal como el patrimonio paleontológico y el geomorfológico. ¿Estima necesaria la generación de una metodología diseñada especialmente para la evaluación del patrimonio glaciológico? Por favor, explique brevemente su opinión.	Texto
	La metodología incluirá una evaluación cuantitativa basada en el cálculo de distintos índices. Por favor, categorice los índices propuestos a continuación según la importancia que usted considere oportuna: valor científico, potencial de uso educativo, potencial de uso turístico, valor ecosistémico, valor cultural, valor económico, valor estético, riesgo de degradación, peligrosidad asociada.	Escala de Likert
	En relación con la pregunta anterior, indique métodos o técnicas que permitan medir, en alguna medida, los índices que catalogó como "extremadamente importante". En caso de que no haya catalogado ninguno como tal, puede proceder con aquellos catalogados como "muy importante".	Texto
	Algunas metodologías para la evaluación del geopatrimonio prefieren diferenciar el riesgo de degradación en 2 categorías distintas: la fragilidad, que se refiere al riesgo de degradación por procesos naturales, y la vulnerabilidad, que se refiere al riesgo de degradación por causas antrópicas. ¿Cree usted que es necesario diferenciar estas dos categorías para la evaluación del patrimonio glaciológico?	Opción múltiple
	En relación con la pregunta anterior, ¿cómo definiría el retroceso generalizado que están experimentando los glaciares en la actualidad? (Por favor, omita casos particulares como glaciares ubicados en la cercanía de actividades antrópicas que los afectan y refiérase solamente al caso general de retroceso glacial).	Opción múltiple



**Tabla 3:** Encuesta para la definición de ponderadores para cada parámetro.

<b>Indicador</b>	<b>Parámetro como se describió en la encuesta</b>	<b>Modalidad</b>
<b>Valor Científico</b>	Representatividad (cuan representativos son los procesos/elementos de interés del glaciar a nivel regional o nacional)	Escala de Likert
	Rareza (cuan raros son los procesos/elementos de interés del glaciar a nivel regional o nacional. A menor número, mayor valor)	
	Diversidad de elementos de interés (cuantos procesos/elementos de relevancia científica ilustra el glaciar. A mayor número, mayor valor)	
	Conocimiento científico (la existencia de publicaciones científicas previas implica un mayor valor)	
<b>Valor de Uso</b>	Accesibilidad (a mayor calidad de caminos y senderos, mayor valor)	Escala de Likert
	Condiciones de observación (mientras más fácil sea observar el glaciar o sus elementos de interés, mayor valor)	
	Potencial interpretativo (mientras más fácil sea interpretar los elementos o procesos de interés del glaciar, mayor valor)	
	Valor estético (glaciares que muestren rasgos o procesos atractivos, como nunataks, rimayas o calving entregan mayores valores)	
	Limitaciones de uso (restricciones públicas o privadas para el acceso. Menos restricciones implican mayor valor)	
	Seguridad (riesgos asociados a acercarse, subirse o recorrer el glaciar. Menor riesgo implica mayor valor)	
	Proximidad a centros poblados (a menor distancia de centros poblados, mayor valor)	
	Proximidad a centros turísticos (a menor distancia de centros turísticos, mayor valor)	
	Número de habitantes en la comuna (más habitantes en la comuna con respecto al promedio nacional implica un mayor valor)	
	Contexto socioeconómico de la comuna (un mayor ingreso per capita de la comuna con respecto al promedio nacional implica un mayor valor)	
<b>Riesgo de Degradación</b>	Hipsometría (ubicación de la ELA con respecto a la curva hipsométrica del glaciar. Glaciares que poseen su ELA en una posición tal que pequeñas variaciones afectarían una gran superficie del glaciar poseen mayores valores)	Escala de Likert
	Balance de masa (tendencia del balance de masa del glaciar en las últimas dos décadas. Balances de masa negativo implican un mayor valor)	
	Tiempo de respuesta (a menor tiempo de respuesta, mayor valor)	
	Actividad volcánica (existencia y recurrencia de la actividad volcánica en las cercanías del glaciar. A mayor recurrencia, mayor valor)	
	Interés para la explotación hídrica o minera (a mayor interés, mayor valor)	
	Tipo de actividad antrópica (que tipo de actividad se desarrolla actualmente en las cercanías del glaciar, si la hay. Actividades que tienen un impacto directo en el glaciar entregan mayores valores)	
<b>Peligrosidad Asociada</b>	Grietas (a mayor número, tamaño y dificultad para sortear las grietas del glaciar, mayor valor)	Escala de Likert
	Desprendimientos de material (frecuencia y distribución de desprendimientos de material como roca o hielo. A mayor frecuencia, mayor valor)	
	Avalanchas (a mayor probabilidad, mayor valor)	
	Avalanchas de roca - hielo (tipo Huascarán. A mayor probabilidad, mayor valor)	
	GLOFs (a mayor probabilidad, mayor valor)	
	Lahares (a mayor probabilidad, mayor valor)	
	Surges (a mayor probabilidad, mayor valor)	

## 4.2 Metodología para el O.E.2: Levantar la línea base glaciológica en el territorio del proyecto Geoparque Pillanmapu

La línea base glaciológica del territorio del proyecto Geoparque Pillanmapu se levantó a partir de dos fuentes: a) la realización de un inventario propio según los métodos descritos en el apartado 4.2, y b) la consulta a inventarios o análisis multitemporales realizados por otros investigadores o instituciones.

### 4.2.1 Confección del inventario propio

#### 4.2.1.1 Diseño de la ficha para el inventario

Para el diseño de la ficha del inventario se ocupó una versión simplificada del formato utilizado por la Dirección General de Aguas (DGA) en su inventario nacional de glaciares (Rivera et al., 2009), con algunas modificaciones menores (Tabla 4). Se procuró codificar los glaciares con el mismo código con el que aparecen en el inventario de la DGA. En caso de que el glaciar se hubiese fragmentado desde la realización del inventario de la DGA hasta la fecha de la realización de este trabajo, se agregó una letra mayúscula al final del código (“A”, luego “B”, luego “C”, y así sucesivamente dependiendo del número de fragmentos). En un intento por mantener los códigos asignados por la DGA, en caso de que se identificara un glaciar que no había sido identificado previamente por dicha institución, se codificó con el número entero siguiente disponible para esa subsubcuenca. Por ejemplo, si para una determinada subsubcuenca se habían identificado 3 glaciares y en el presente trabajo se identificó un cuarto, el código terminaría en 004, independiente de la ubicación del glaciar. Si para la misma subsubcuenca se identificaron 2 o más glaciares nuevos, entonces se codificaron con los números enteros siguientes, ordenados según la posición de las manecillas de un reloj.

**Tabla 4:** Formato de la ficha para el inventario de glaciares.

<b>Campo</b>	<b>Descripción</b>	<b>Unidad</b>
COD GLA	Código del Glaciar según normas del World Glacier Inventory	
NOMBRE	Nombre del Glaciar (si lo posee)	
CLASIFICA	Clasificación morfológica primaria según norma UNESCO/WGI	
REGIÓN	Número de región donde se ubica el glaciar	
COMUNA	Nombre de comuna donde se ubica el glaciar	
DATUM	Sistema de referencia	
HUSO	Zona cartográfica	
FUENTE DIG	Fuente a partir de la cual se dibujó el polígono	
FUENTE FEC	Fecha de la fuente	dd/mm/aa
INVENT FEC	Fecha del inventario	aaaa
ESTE	Coordenada este UTM del centroide del polígono	m
NORTE	Coordenada norte UTM del centroide del polígono	m
AREA	Área del glaciar	m <sup>2</sup>
HMIN	Altura mínima del glaciar	msnm
HMAX	Altura máxima del glaciar	msnm
HMEDIA	Altura promedio del glaciar	msnm
PENDIENTE	Pendiente promedio del glaciar	grados
ESP MED	Espesor promedio del glaciar	m
VOL	Volumen del glaciar	m <sup>3</sup>

Tanto el espesor como el volumen fueron calculados empleando la relación superficie – volumen propuesta por Chen & Ohmura (1990) (Ecuaciones 3 y 4). Si bien existen numerosas fórmulas para estimar volúmenes glaciales a partir de superficies, se prefirió trabajar con esta dada su simplicidad y dado que es la relación empleada por la DGA para la realización del inventario oficial de glaciares de Chile del año 2022.

$$\bar{H} (m) = 28,5 \cdot S^{0,357} \quad (3)$$

$$V(km^3) = 28,5 \cdot S^{1,357} \quad (4)$$

Donde  $\bar{H}$  y  $S$  corresponden a la profundidad promedio del glaciar en metros y a la superficie en kilómetros cuadrados respectivamente.

#### **4.2.1.2 Procesamiento imágenes satelitales para la identificación de glaciares**

##### **4.2.1.2.1 Selección escenas**

Todas las escenas satelitales fueron seleccionadas de manera manual para evitar cobertura por nieve o nubes. Se prefirieron escenas con la menor cantidad de nieve estacional, por lo que se buscaron imágenes para los meses de marzo, abril y mayo. Para dichos meses, se seleccionó la escena que mostrase la menor superficie de nieve/hielo, asumiendo que cualquier exceso corresponde a nieve estacional. De este modo, se seleccionaron 4 imágenes Landsat OLI y 4 imágenes Sentinel 2.

##### **4.2.1.2.2 Preprocesamiento de las imágenes**

Todas las escenas fueron recortadas al área de estudio. Las imágenes Landsat OLI fueron, además, sometidas a un proceso conocido como *pansharpening* que permite aumentar la resolución de estas imágenes de 30 a 15 metros utilizando la banda pancromática.

Se aplicaron correcciones radiométricas y atmosféricas a 7 bandas (banda 1 a banda 7) de las cuatro escenas seleccionadas con el fin de convertir los datos a reflectancia y obtener información consistente. Para las correcciones radiométricas se utilizó el módulo *Radiometric Calibration* del software ENVI 5.3 en todas las bandas, convirtiendo los Números Digitales (DN por sus siglas en inglés) a radianza. Para las correcciones atmosféricas se utilizó el módulo *IAR Reflectance Correction*, obteniéndose finalmente la reflectancia.

Adicionalmente, se construyó un mosaico de las escenas seleccionadas para utilizarse como mapa base. Para su realización se trabajó con el módulo *Seamless Mosaic* del mismo software recién mencionado.

##### **4.2.1.3 Detección y delimitación automática de cuerpos de hielo y nieve**

Para detectar el hielo y la nieve se ocupó el NDSI (ver apartado 3.2.3), el cual opera siguiendo el principio de que dichos materiales absorben fuertemente las longitudes de onda del Short Wave InfraRed (SWIR) y poseen alta reflectancia en la región visible (Ulloa, 2020).

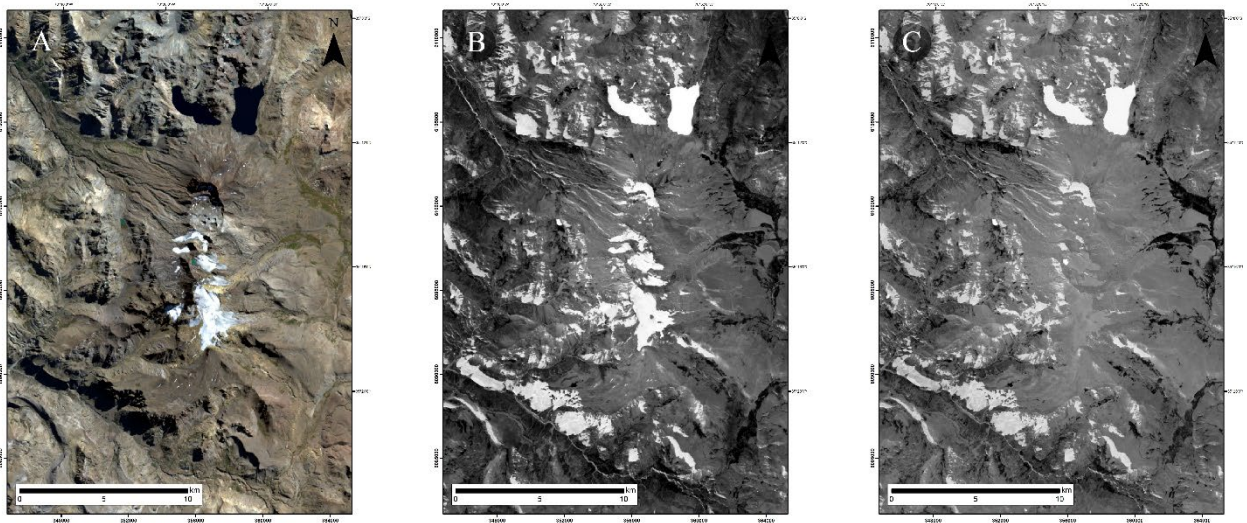
El NDSI es muy efectivo para delimitar hielo glacial y nieve, sin embargo, resalta también las sombras y cuerpos de agua. Para eliminar las sombras del NDSI, se generó una máscara utilizando el NDWI, el cual delimita bien ambos elementos sin resaltar ni la nieve ni el hielo (Figura 16). Al utilizar imágenes Landsat OLI, estos índices se definen de la siguiente manera:

$$NDSI = \frac{B3 - B6}{B3 + B6} \quad (5)$$

$$NDWI = \frac{B3 - B5}{B3 + B5} \quad (6)$$

Donde B3, B5 y B6 corresponden a las bandas 3, 5 y 6 respectivamente.

A partir del NDWI se generó una máscara que fue posteriormente aplicada al NDSI, obteniéndose un ráster que no resalta ni sombras ni cuerpos de agua (Figura 16). Finalmente, con este último producto se generó una Región de Interés (ROI por sus siglas en inglés), la cual fue convertida a formato vectorial (*shapefile*) mostrando los contornos de hielo y nieve sin incluir sombras.

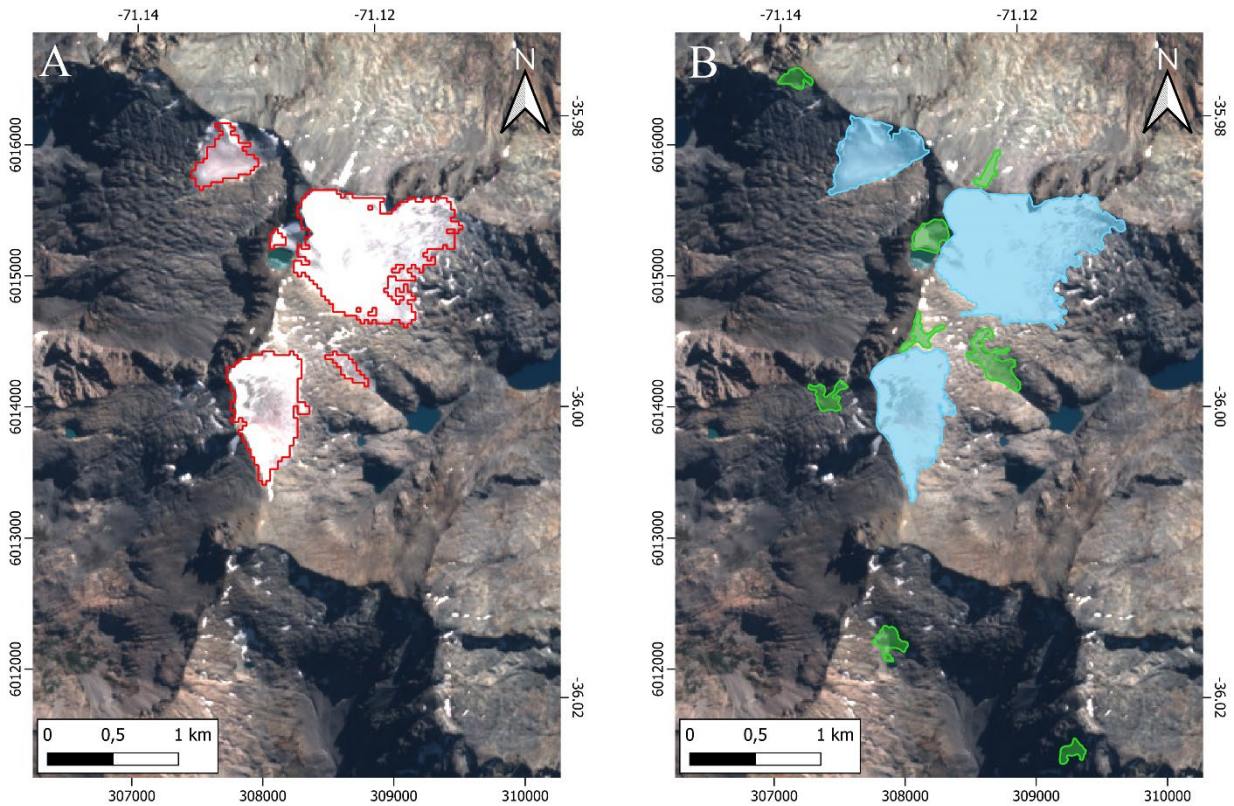


**Figura 16:** A) Imagen Landsat OLI color real del CVPPA con fecha 11 de abril del 2021. B) NDSI calculado para la misma escena. Se puede observar cómo resaltan los cuerpos de nieve y hielo en colores blancos, pero también las sombras y cuerpos de agua. C) NDWI calculado para la misma escena. Este último resalta sombras y cuerpos de agua sin resaltar los cuerpos de nieve o hielo. Al aplicar el NDWI como máscara para recortar sombras y agua sobre el NDSI, se obtiene un producto que resalta únicamente glaciares y nieves.

#### 4.2.1.4 Detección y delimitación manual de cuerpos de hielo y nieve

Posterior a la selección automática, se realizó una selección manual. Para ello, se editaron los polígonos en ArcGIS pro 2.9. Para cumplir con la definición provista en el apartado 3.1.1.1, en primer lugar, se eliminaron todos aquellos polígonos menores a 0,01 km<sup>2</sup> de superficie. En segunda instancia, se hizo una revisión exhaustiva de la zona de estudio, eliminando los polígonos que no correspondían a cuerpos de hielo o nieve y creando nuevos polígonos donde el NDSI no los hubiese detectado. Todos los polígonos resultantes de este proceso fueron redibujados de forma manual (Figura 17). Para este fin se utilizaron imágenes Sentinel 2 y Landsat 8 con el apoyo del repositorio de imágenes de *Google Earth* y de *SAS Planet*.

Tanto para la delimitación de glaciares descubiertos como glaciares cubiertos o rocosos, se tomó en cuenta la metodología propuesta por la DGA. En particular, se adoptó la sugerencia para la delimitación de cabeceras donde se asume que “existe hielo cubierto hasta el borde inferior de eventuales afloramientos rocosos, o hasta la divisoria topográfica si no existen afloramientos rocosos. A menos que exista evidencia en las imágenes de un cambio de litología u otro cambio geomorfológico que sugiera un posible límite del glaciar”.



**Figura 17:** A) Delimitación automática de glaciares con NDSI enmascarado. B) Reajuste manual de los polígonos de glaciares de montaña (azules) y glaciaretos (verdes). Imagen base: Sentinel 2 con fecha 13 de abril del 2021.

Como apoyo a la revisión e identificación manual, se revisaron inventarios globales y nacionales para corroborar la información levantada previamente. Los inventarios utilizados fueron el *Randolph Glacier Inventory* (RGI), el inventario de *Global Land Ice Measurement from Space* (GLIMS) y los inventarios nacionales de la DGA 2014 y 2022. Estos últimos resultaron de particular utilidad para la identificación de glaciares rocosos. También, se hizo una revisión bibliográfica de trabajos realizados en la zona (Osorio, 2013; Reinthaler et al., 2019).

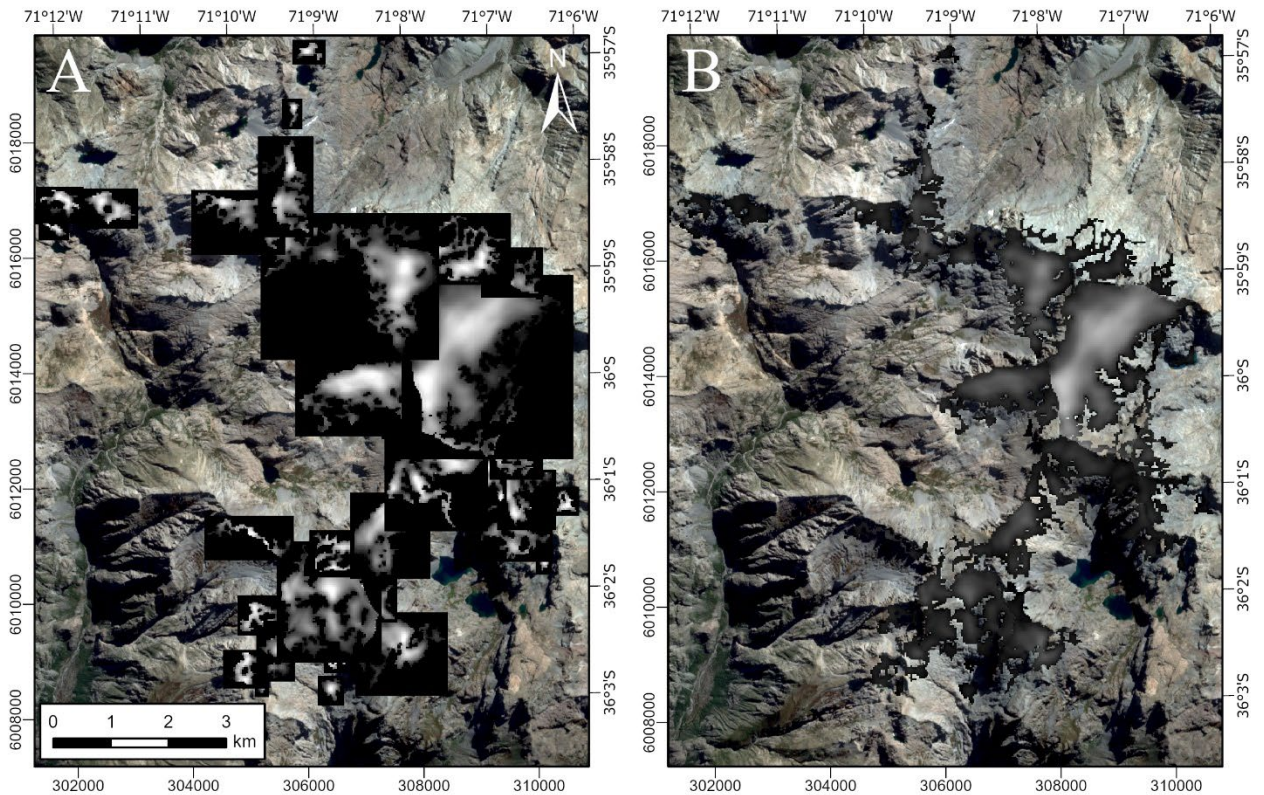
#### 4.2.1.5 Identificación de nieves estacionales

La definición de glaciar que se utiliza en este trabajo, mencionada en el apartado 3.1.1.1, indica, entre otras cosas, que el cuerpo de nieve o hielo debe subsistir por al menos dos años para ser considerado glaciar. Para corroborar que los glaciares identificados mediante el método recién descrito cumplieran con esta condición, se descargaron imágenes Sentinel 2 del año 2019. Todos los cuerpos de hielo o nieve identificados que no existieran en dichas imágenes fueron considerados nieves estacionales y, por tanto, eliminados del inventario.

#### 4.2.2 Revisión de otros inventarios y análisis multitemporales

Se revisaron un total de 9 trabajos adicionales. Estos son, en orden cronológico de publicación: i) un inventario de la cuenca del Mataquito (Noveroy, 1987); ii) un inventario de glaciares de la región del Maule (Osorio, 2013); iii) el inventario de glaciares de la DGA (2014); iv) el *Randolph Glacier Inventory 6,0* (RGI, 2017); v) un análisis multitemporal de pérdidas de masa en los Andes (Dussaillant et al., 2019); vi) un análisis multitemporal de cambios de altura y masa en Sudamérica (Braun et al., 2019); vii) cálculos de espesor glacial en el mundo (Farinotti et al.; 2019); viii) análisis multitemporal de cambios de superficie en glaciares emplazados en centros volcánicos latinoamericanos (Reinthal et al.; 2019); ix) el inventario de glaciares de la DGA (2022).

Los trabajos mencionados fueron comparados con el inventario realizado en el presente trabajo. Algunos trabajos no cubren la totalidad de la zona de estudio. En dicho caso, se recortó el inventario propio para dar sentido a la comparación entre ambos. Por otro lado, algunos trabajos abarcan una superficie mayor. Estos fueron recortados a la extensión del territorio del proyecto Geoparque Pillanmapu. Finalmente, algunos trabajos presentaron complejidades adicionales producto del formato en el que están disponibles los datos para su descarga. Los datos de Dussaillant et al. (2019) son archivos de tipo ráster con dimensiones de 1° de longitud por 1° de latitud. Se recortaron dichos ráster a la extensión de los glaciares según el RGI 6,0, que fue el utilizado por los autores del trabajo. Por otro lado, los datos de Farinotti et al. (2019) son archivos de tipo ráster, donde cada glaciar es un archivo por separado. Para extraer los datos deseados, en primer lugar, se identificaron todos los archivos disponibles dentro de la zona de estudio. Esto se hizo de manera manual, utilizando los códigos del RGI 6,0 para simplificar la tarea. En segundo lugar, se recortaron las áreas de los ráster con valores iguales a 0 (Figura 18). Debido a que se encontraron 181 archivos dentro de la zona de estudio, esta tarea fue automatizada mediante la herramienta *ModelBuilder* de *ArcGis Pro*. Finalmente, todos los archivos fueron unidos en un único archivo tipo ráster.

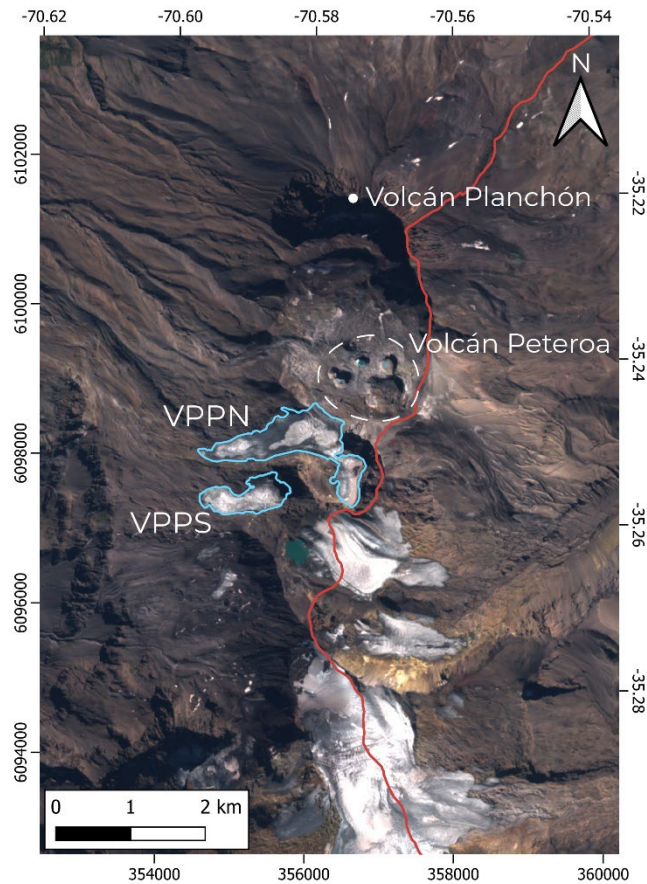


**Figura 18:** Espesores glaciares al año 2000 en el sector del Cerro Toro según Farinotti et al. (2019). A) Archivos tipo ráster sin recortar. B) Archivos ráster recortados. Debido al gran número de archivos dentro de la zona de estudio (181), este proceso se automatizó utilizando la herramienta *ModelBuilder* de *ArcGis Pro*. Imagen base: Sentinel 2 con fecha 13 de abril del 2021. Datos extraídos de Farinotti et al. (2019).

### 4.3 Metodología para el O.E.3: Aplicar la metodología en el territorio del Geoparque Pillanmapu

Para probar la metodología diseñada, esta fue aplicada en el territorio del proyecto Geoparque Pillanmapu. En particular, para probar la evaluación cuantitativa (uno de los tantos pasos de la metodología), se seleccionaron dos glaciares de montaña ubicados en la ladera occidental del CVPPA (Figuras 19 y 20). Ambos están nominados como los glaciares “Volcán Planchón Peteroa” en el inventario de la DGA. De ahora en adelante, se les llamará glaciares Volcán Planchón Peteroa Norte (VPPN) y Volcán Planchón Peteroa Sur (VPPS) para referirse al glaciar ubicado al norte y al glaciar ubicado al sur respectivamente.

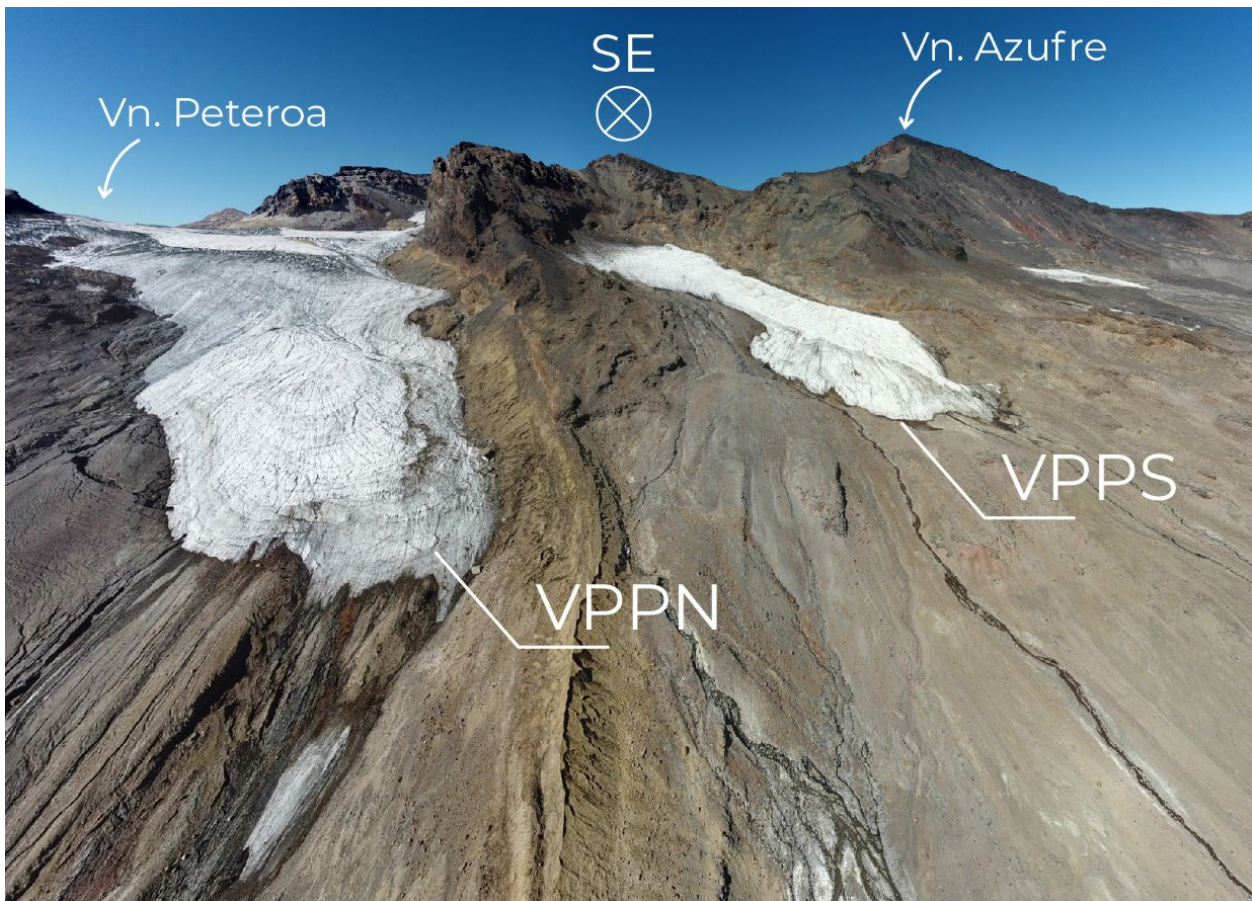
La selección de los glaciares se hizo tomando en consideración la metodología propuesta en el libro *Manual Balance de Masa Glaciar* (Rivera et al., 2017), la cual sugiere que el glaciar a elección debe ser: a) espacialmente representativo, b) representativo de la diversidad glaciológica regional, c) hipsométricamente representativo, d) con fáciles condiciones de acceso (incluyendo la situación legal de acceso), e) que disponga de información adicional, como imágenes aéreas, datos históricos, meteorológicos, entre otros y, f) seguro, es decir, evitar aquellos glaciares que pueden suponer un riesgo para investigadores, como grietas, avalanchas o séracs. Para efectos del presente trabajo, se tomaron en consideración especialmente los criterios b), d) y f).



**Figura 19:** Glaciares visitados durante las campañas de campo (polígonos celestes). El polígono septentrional corresponde al VPPN, mientras que el polígono meridional al VPPS. La línea roja continua marca el límite fronterizo chileno - argentino. Imagen base: Sentinel 2 con fecha 13 de abril del 2021.

En el glaciar VPPS se realizaron estudios de mayor profundidad que en el VPPN. En este último solo se hicieron observaciones menores, mientras que en el primero se realizaron levantamientos fotogramétricos en dos fechas distintas a partir de UAV. El haber seleccionado dos glaciares y haber tomado datos exclusivamente de uno responde a tres motivos: a) permite comparar dos evaluaciones cuantitativas distintas realizadas mediante métodos distintos, b) permite ver la factibilidad de aplicar la metodología de manera completamente remota al aplicarla en un glaciar donde, prácticamente, no se tomaron datos (VPPN), y c) la mayor extensión del glaciar VPPN habría dificultado el levantamiento mediante UAV.





**Figura 20:** Vista aérea de los glaciares VPPS y VPPN en abril del 2022. Fotografía de Felipe Ugalde.

### 4.3.1 Campañas de campo

Se realizaron tres campañas de campo, en abril del 2021 y enero y abril del 2022, donde se visitaron los glaciares del CVPPA.

La primera campaña tuvo por objetivos: a) identificar la ruta de acceso a los glaciares, b) instalar una cámara autosuficiente para el monitoreo del frente del glaciar VPPN con fines divulgativos para la Fundación Geoparque Pillanmapu, y c) realizar un levantamiento fotogramétrico de la topografía del VPPS mediante UAV con miras a realizar un balance de masas geodésico.

La segunda campaña tuvo por objetivos: a) recuperar las imágenes capturadas por la cámara autosuficiente hasta la fecha, y b) revisar el estado de la cámara autosuficiente y reemplazarla en caso de ser necesario. Para estos fines se llevó una segunda cámara y todo lo necesario para su instalación en terreno.

La tercera campaña tuvo por objetivos: a) recuperar las imágenes capturadas hasta la fecha, b) retirar la cámara autosuficiente y todo el equipo empleado en su instalación, y c) realizar un segundo levantamiento fotogramétrico de la topografía del VPPS mediante UAV.

#### 4.3.1.1 Levantamiento topográfico del VPPS mediante UAV

Para realizar el levantamiento fotogramétrico se utilizó el UAV DJI Mavic 2 Pro y el *software* de planificación de vuelo *MapPilot*. Se eligió este *software* por contar con corrección topográfica de líneas de vuelo, lo que permite mantener un Tamaño de Píxel en Terreno (GSD por sus siglas en inglés) constante en cada fotografía. Para corregir distorsiones y disminuir el error del levantamiento, se instalaron 7 Puntos de Control Terrestres (GCP por sus siglas en inglés, Figura 21).



**Figura 21:** GCP sobre la superficie del VPPS. Fotografía de David Cossio.

Para calcular la posición de los GCP se utilizaron dos receptores del Sistema Global de Navegación por Satélite (GNSS por sus siglas en inglés) doble frecuencia Emlid RS2 (Figura 22). Uno se utilizó como receptor base y el otro como receptor móvil. Las coordenadas precisas de la base se obtuvieron por medio de la página web de Posicionamiento Preciso de Puntos (PPP) CSRS-PPP del gobierno de Canadá.

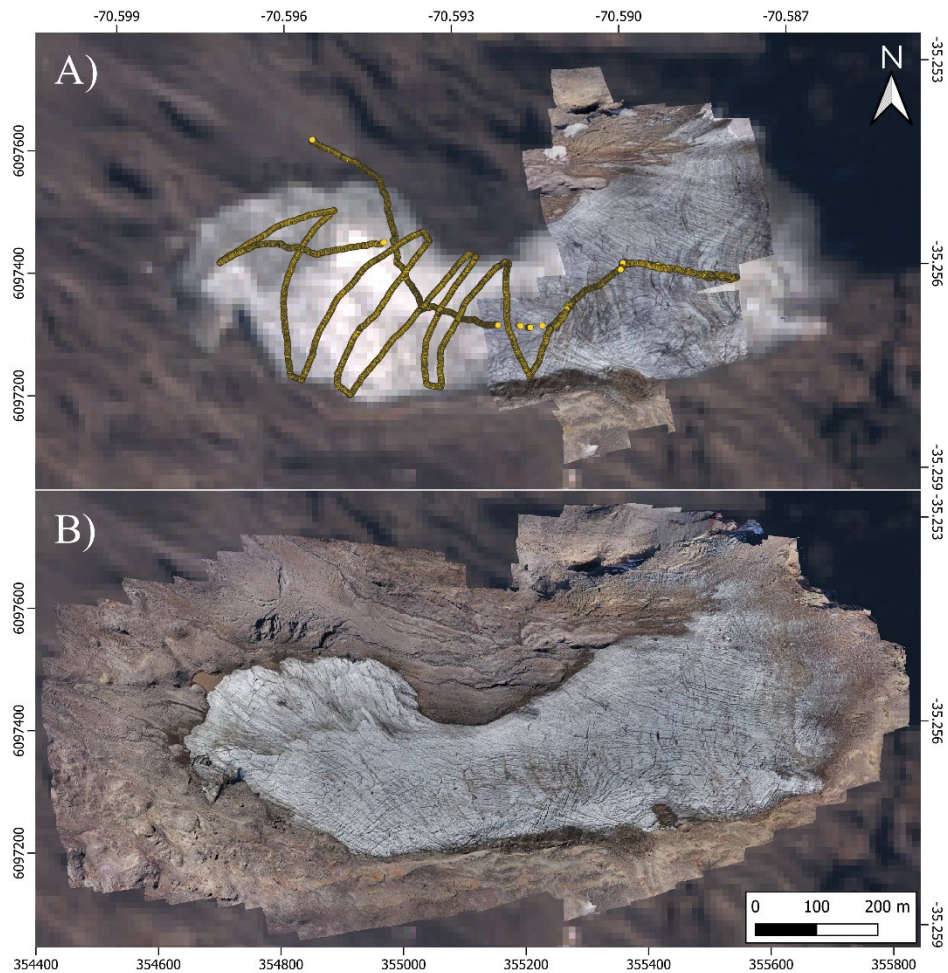


**Figura 22:** Receptor base (con trípode) y receptor móvil (con jalón). A la izquierda se observa parte del glaciar VPPS. Vista hacia el sur. Fotografía de David Cossio.

Los Modelos Digitales de Elevación (DEM por sus siglas en inglés) fueron procesados en el *software* Agisoft Metashape, siguiendo el siguiente flujo de trabajo: i) añadir las fotografías, ii) orientar las fotografías, iii) añadir la ubicación de los GCP y optimizar, y iv) crear el DEM.

Durante la primera campaña de campo (abril 2021), producto de una falla en el UAV, solo se pudo cubrir el 59,9% de la superficie total del VPPS para ese año (Figura 23). A pesar de ello, se alcanzaron a capturar 3 de los 7 GCP instalados y medidos, lo que cumple con el mínimo para corregir distorsiones. Durante la segunda campaña de campo, se logró cubrir la totalidad del glaciar.

En un intento por completar el levantamiento topográfico parcialmente fallido del 2021, se realizó un levantamiento cinemático. Para ello, se ocuparon los mismos receptores GNSS y se recorrió, en forma zigzagueante la porción del glaciar que no fue capturada por el dron, con el receptor móvil, tomando puntos de manera automática cada 1 segundo (Figura 23). Con las mismas coordenadas precisas del receptor base mencionadas más arriba, se procesaron las líneas del levantamiento cinemático utilizando el *software* libre RTKLIB b33 (versión optimizada para GNSS Emlid). Los puntos obtenidos del postproceso fueron extrapolados a un DEM en el *software* *Global Mapper*.



**Figura 23:** Ortomosaicos del glaciar VPPS. A) Ortomosaico de imágenes capturadas con UAV durante la primera campaña de campo (abril 2021). Producto de una falla en el UAV, el ortomosaico cubre poco más de la mitad del glaciar VPPS. Los puntos amarillos corresponden a las mediciones automáticas realizadas con la estación móvil que sirvieron para el levantamiento cinemático. B) Ortomosaico de imágenes capturadas con UAV durante la segunda campaña de campo (abril 2022). Imagen base: Sentinel 2 con fecha 13 de abril del 2021.

### 4.3.2 Procesamiento de datos del glaciar VPPS

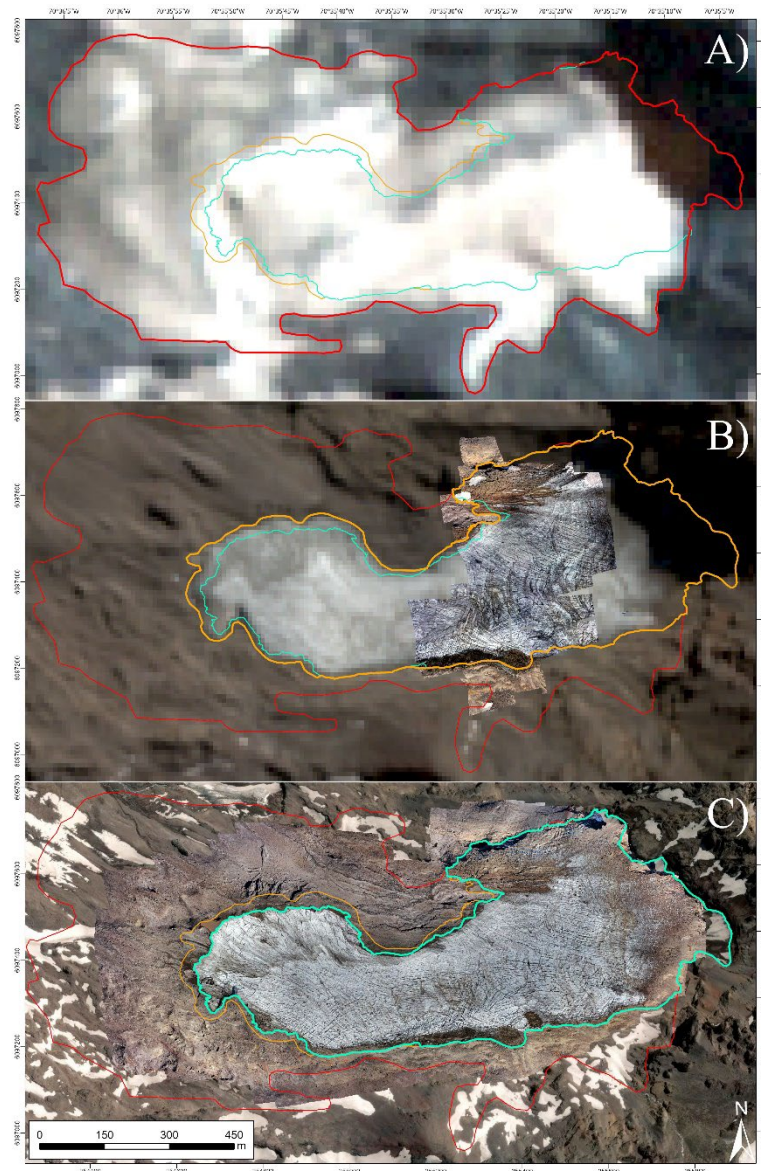
#### 4.3.2.1 Delimitación del glaciar VPPS

Con miras a no inducir errores al momento de restar los DEM para el cálculo de los balances de masa, se buscó identificar la extensión del glaciar VPPS para los años 2000, 2021 y 2022. El año 2000 fue necesario ya que, como se indica en el apartado 4.3.3, se ocupó el DEM de la Misión Topográfica de Radar Shuttle (SRTM por sus siglas en inglés) para uno de los cálculos de balance de masa.

Para conocer la extensión del glaciar en el año 2022, se utilizó el ortomosaico de dicho año. Sin embargo, algunas porciones menores de la cabecera no fueron capturadas por el UAV. Para completarlas, se utilizaron imágenes de alta resolución del repositorio de imágenes de *SAS Planet*. Este último no permite acceder a la metadata de las escenas, por lo que no es posible conocer la fecha en que fueron capturas. Sin embargo, dado que se trata de sectores pequeños y que pertenecen a la cabecera, la parte más estable del glaciar, se asumió que esta no ha sufrido cambios significantes.

Para conocer la extensión del glaciar en el año 2021, en primer lugar, se ocupó el ortomosaico capturado en abril del 2021 (Figura 24). Para completar la cabecera, se utilizó el ortomosaico capturado en abril del 2022, asumiendo, tal como se mencionó recién, que la cabecera del glaciar es estable. En tercer y último lugar, para conocer la extensión del frente, se utilizó una imagen Sentinel 2 con fecha 13 de abril del 2021.

Para conocer la extensión del glaciar en el año en que fue capturado el DEM SRTM, se utilizó una imagen Landsat ETM+ con fecha 09 de abril del 2000. Para la selección de esta escena, se utilizaron los mismos criterios que los descritos en el apartado 4.2.1.2.1. A dicha escena se le aplicó el proceso de *pansharpening*, aumentando así su resolución a 15 m.



**Figura 24:** Delimitación del glaciar VPPS para los años 2000 (línea roja), 2021 (línea naranja) y 2022 (línea celeste). A) Imagen utilizada para la delimitación del glaciar en el año 2000. Imagen base: Landsat ETM+ *pansharpened* con fecha 09 de abril del 2000. B) Imágenes utilizadas para la delimitación del glaciar en el año 2021. Imágenes base: Sentinel 2 con fecha 13 de abril 2021 y ortomosaico con fecha 04 de abril 2021. C) Imágenes utilizada para la delimitación del glaciar en el año 2022. Imágenes base: Mapbox sin fecha y ortomosaico con fecha 17 de abril 2022.

### 4.3.2.2 Cálculo del balance de masa del VPPS

Para calcular el balance de masas se empleó el método geodésico (ver apartado 3.1.2.1). En total, se utilizaron 3 DEM, el SRTM del año 2000 y los dos DEM mencionados más arriba, capturados mediante UAV en abril del 2021 y abril del 2022 (DEM<sub>2000</sub>, DEM<sub>2021</sub> y DEM<sub>2022</sub> de ahora en adelante). La referencia vertical para los 3 archivos es ortométrica, sin embargo, los DEM<sub>2022</sub> y DEM<sub>2021</sub> generados por UAV están referidos al Modelo de Geoide Español del 2008 (EGM08 por sus siglas en inglés), mientras que el DEM<sub>2000</sub> está referido al EGM96. Utilizando el módulo *Raster Transform* del *software Global Mapper*, se dejó el DEM<sub>2000</sub> referido al EGM08, haciendo así coincidir los 3 DEM.

Se realizaron tres cálculos: i) la diferencia entre el DEM<sub>2000</sub> y el DEM<sub>2021</sub>, ii) la diferencia entre el DEM<sub>2021</sub> y el DEM<sub>2022</sub>, y iii) la diferencia entre el DEM<sub>2000</sub> y el DEM<sub>2022</sub>. Esto generó tres archivos tipo raster, cuyos valores de píxel corresponden a la diferencia de altura entre los DEM restados. Posteriormente, se multiplicó la sumatoria total de dicha diferencia por el área del píxel para obtener la diferencia de volumen, tal como se muestra en las ecuaciones 7, 8 y 9:

$$\Delta V_{2021-2000} = (\sum p_i) \cdot A_{p1} \quad (7)$$

$$\Delta V_{2022-2021} = (\sum p_i) \cdot A_{p2} \quad (8)$$

$$\Delta V_{2022-2000} = (\sum p_i) \cdot A_{p3} \quad (9)$$

Donde  $A_{p1}$ ,  $A_{p2}$  y  $A_{p3}$  corresponde al área de píxel para el raster generado a partir de la resta DEM<sub>2021</sub> – DEM<sub>2000</sub>, DEM<sub>2022</sub> – DEM<sub>2021</sub> y DEM<sub>2022</sub> – DEM<sub>2000</sub> respectivamente y  $p_i$  corresponde a los valores de cada píxel.

Las medidas de cambio volumétrico fueron transformadas a cambios de masa asumiendo un factor de 850 kg/m<sup>3</sup>, una aproximación frecuentemente utilizada para balances de masa geodésicos (Dussaillant et al., 2019; Farías-Barahona et al., 2020; Huss, 2013).

Finalmente, la diferencia de altura promedio entre un período y otro se transformó a metros equivalente en agua (m w.e. por sus siglas en inglés) multiplicando la diferencia de altura de los DEM por el cociente de la densidad del hielo, 850 kg/m<sup>3</sup> en este caso, y la densidad del agua, 1000 kg/m<sup>3</sup> (Ecuación 10).

$$\Delta h_{mean} (m w.e.) = \Delta h_{mean} \cdot \frac{\rho_i}{\rho_w} \quad (10)$$

### 4.3.2.3 Cálculos de espesor y volumen del VPPS

Para calcular en cuanto tiempo desaparecería el VPPS según la tendencia del balance de masa de las últimas dos décadas (criterio requerido para aplicar la metodología), se utilizó el trabajo de Farinotti et al. (2019), quienes calcularon espesores al año 2000 para todos los glaciares del mundo según el RGI 6,0. A partir de diferencia entre los espesores calculados para el VPPS y el DEM<sub>2000</sub> se obtuvo una topografía aproximada del lecho. Luego, la diferencia entre el DEM<sub>2022</sub> y la topografía del lecho entrega el espesor del glaciar para el año 2022. Finalmente, se asumió que

el tiempo en el que desaparecería el glaciar es igual al cociente entre el espesor máximo actual del glaciar y la pérdida de altura anual.

#### 4.3.2.4 Cálculo del tiempo de respuesta del VPPS

Calcular tiempos de respuesta es una tarea compleja debido a que depende de múltiples factores, como la geometría o hipsometría del glaciar, su ubicación, y procesos físicos poco conocidos. A raíz de lo mismo, existen numerosos métodos para calcularlo, algunos de los cuales fueron mencionados en el apartado 3.1.4. Sin embargo, el método de Johannesson et al. (1989), destaca como el más popular, principalmente debido a su simpleza (Harrison et al., 2001). Por este motivo, se escogió este método para realizar los cálculos de tiempo de respuesta.

Johannesson et al. (1989) establece que el tiempo de respuesta de un glaciar es la razón entre su espesor ( $H$ ) y la ablación en el frente del glaciar ( $b_t$ ), tal como se muestra en la ecuación (11).

$$T = \frac{H}{-b_t} \quad (11)$$

$H$  fue obtenido a partir de la Ecuación 3. A pesar de que  $b_t$  se refiere a la ablación en el término del glaciar, al calcular los balances de masa para los periodos 2022 – 2000, 2022 – 2021 y 2021 – 2000, no se observaron diferencias significativas entre la ablación del término o de la cabecera del glaciar (Figura 58). Por lo mismo, se consideró  $b_t$  como la ablación promedio para todo el glaciar, y no sólo en el término. En caso de ser necesario calcular exclusivamente la ablación para la zona terminal del glaciar, para identificar esta última se puede recurrir al criterio empleado por Pelto & Hedlund (2001), quienes la consideraron como el 25% más bajo del glaciar.

#### 4.3.2.5 Cálculo de pendientes del VPPS

Para estimar los parámetros “Avalanchas” y “Lahares”, es necesario conocer la pendiente del glaciar y las laderas que lo rodean. Para ello, se recortó el DEM<sub>2000</sub> a la extensión del valle en el que se emplaza. Para identificar dicha extensión, se utilizó el mismo DEM así como imágenes del repositorio de *Google Earth Pro* e imágenes de alta resolución obtenidas del repositorio de imágenes de *SAS Planet*. El límite superior del polígono se consideró como el límite superior del valle. Una vez obtenido el DEM recortado, se aplicó la herramienta *Slope*, del *software ArcGis Pro* para conocer la pendiente mínima, máxima y promedio.

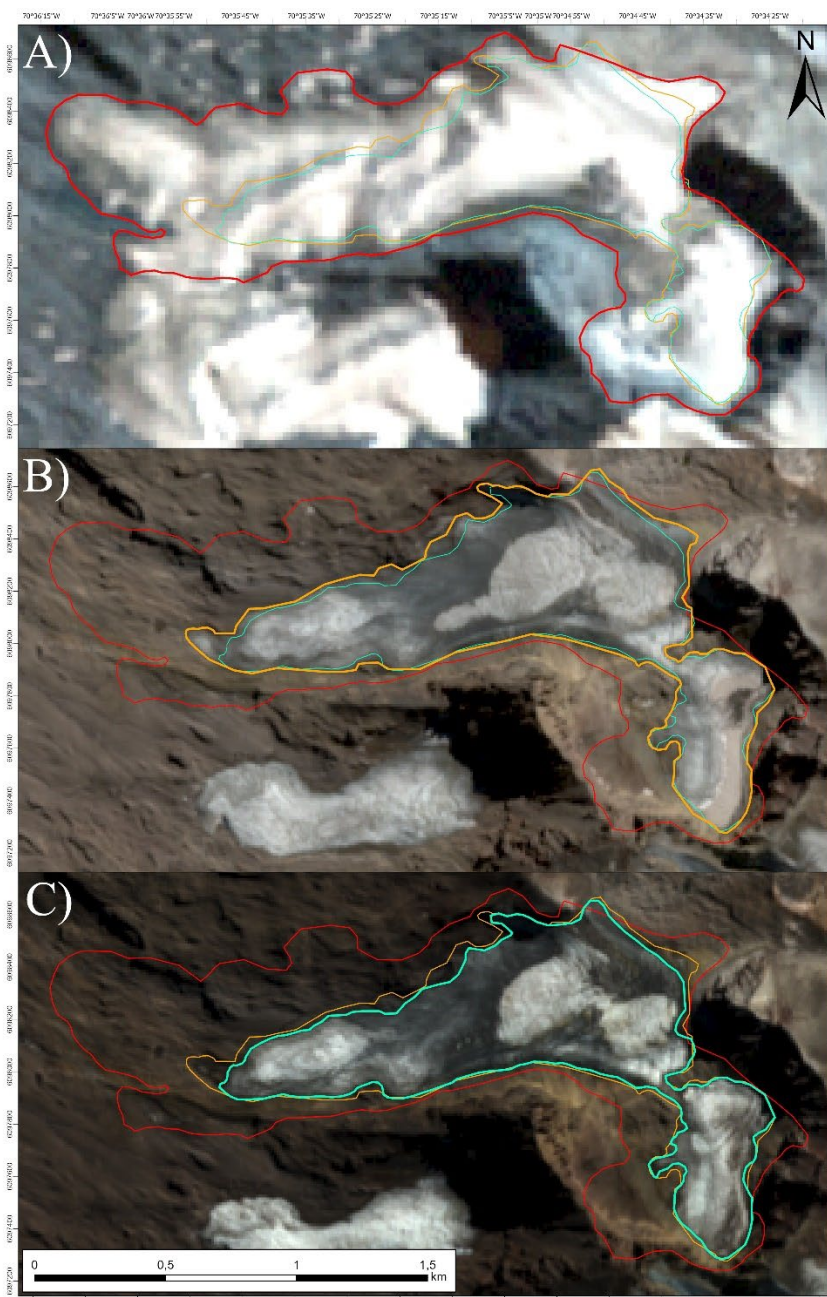
#### 4.3.3 Procesamiento de datos del glaciar VPPN

Tal como se mencionó, para el glaciar VPPN solo se cuenta con algunas observaciones menores realizadas en terreno. Por lo mismo, los métodos utilizados incurren en aproximaciones mayores que las descritas para el glaciar VPPS.

##### 4.3.3.1 Delimitación del glaciar VPPN

Al no contar con ortomosaicos que faciliten la delimitación del VPPN, se utilizaron imágenes satelitales. Para la delimitación del glaciar en los años 2000 y 2021, se utilizaron las mismas imágenes que para el glaciar VPPS, es decir una imagen Landsat ETM+ con fecha 09 de abril del

2000 y una imagen Sentinel 2 con fecha 13 de abril del 2021. Para la delimitación en el año 2022, se utilizó una imagen Sentinel 2 con fecha 18 de abril del 2022 (Figura 25).



**Figura 25:** Delimitación del glaciar VPPN para los años 2000 (línea roja), 2021 (línea naranja) y 2022 (línea celeste). A) Imagen utilizada para la delimitación del glaciar en el año 2000. Imagen base: Landsat ETM+ *pansharpened*.con fecha 09 de abril del 2000. B) Imagen utilizada para la delimitación del glaciar en el año 2021. Imagen base: Sentinel 2 con fecha 13 de abril 2021. C) Imagen utilizada para la delimitación del glaciar en el año 2022. Imagen base: Sentinel 2 con fecha 18 de abril 2022.

#### 4.3.3.2 Cálculo del volumen y balance de masa del VPPN

Para calcular el balance de masa se utilizaron las Ecuaciones 3 y 4, aplicadas a los años 2000, 2021 y 2022. Calculando la diferencia entre los volúmenes del 2000 y 2022 se obtuvo un balance de masa aproximado. Cabe destacar que la fórmula paramétrica propuesta por Chen & Ohmura



(1990) no fue diseñada para estimar balances de masa. Sin embargo, se recurrió a esta por no contar con DEM actuales.

#### **4.3.3.3 Cálculo del tiempo de respuesta y pendientes del VPPN**

Para calcular el tiempo de respuesta y las pendientes del VPPN, se utilizaron los mismos métodos que los empleados en el glaciar VPPS. Es decir, para el cálculo del tiempo de respuesta se utilizó la Ecuación 11 y para generar el mapa de pendientes se utilizó el DEM SRTM, recortado al valle donde se emplaza el glaciar.

## **CAPÍTULO 5. RESULTADOS**

### **5.1 Resultados del O.E.1: Diseñar una metodología para la evaluación de glaciares.**

#### **5.1.1 Análisis bibliográfico de metodologías para la evaluación del patrimonio geológico**

Tal como se comentó en el apartado 3.4.2, es posible identificar dos componentes que suelen presentarse en las metodologías para la evaluación del patrimonio geológico: a) la estructura metodológica y b) la evaluación cuantitativa.

Para simplificar el estudio de las distintas metodologías, a continuación, se separará el análisis de la estructura metodológica del de la evaluación cuantitativa.

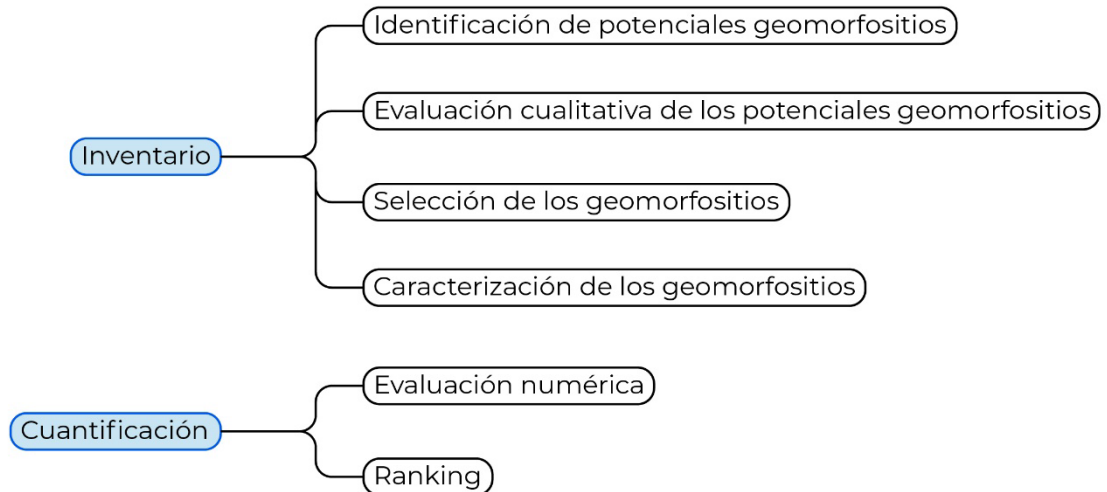
##### **5.1.1.1 Análisis bibliográfico de la estructura metodológica**

De las 12 metodologías estudiadas, 9 describen una estructura metodológica. Los 3 trabajos restantes solo proponen y describen la evaluación cuantitativa.

###### **a) Pereira et al. (2007)**

Pereira et al. proponen una metodología separada en 2 pasos, inventario y cuantificación, los cuales a su vez se subdividen en 4 y 2 pasos respectivamente (Figura 26). Cabe destacar que esta metodología está diseñada, en particular, para la evaluación de geomorfositos.

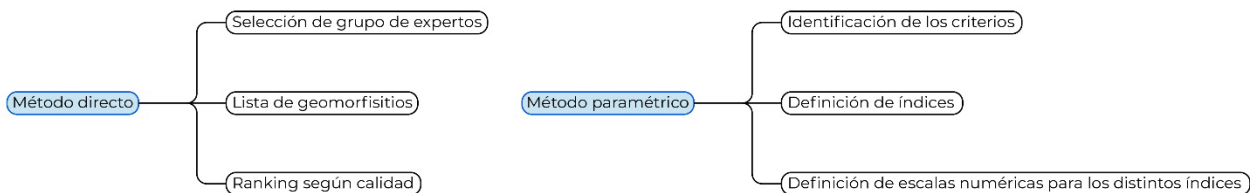
El primer paso consiste en generar el inventario, reconocido por muchos como el paso más importante en la evaluación del geopatrimonio (Brilha, 2016; García-Cortés et al., 2014; Reynard et al., 2016). Para ello se identifican primero potenciales geositios, los cuales son evaluados de manera cualitativa con el objetivo de seleccionar solo los más importantes y representativos. Una vez hecho esto se procede con la evaluación cuantitativa y el ranking, que constituyen el segundo paso metodológico.



**Figura 26:** Estructura metodológica según Pereira et al. (2007). Los recuadros celestes representan los pasos y los blancos representan los sub-pasos.

### b) Bruschi et al. (2011)

Los autores de este trabajo proponen y comparan dos estructuras metodológicas distintas, una que sigue el “método directo” y otra que sigue el “método paramétrico”. La primera se hace en base a consultas a expertos y sin el uso de índices ni criterios objetivos, siendo por lo tanto criticada por los propios autores de ser subjetiva. La segunda se hace en base a parámetros y criterios previamente establecidos con el fin de reducir la subjetividad.



**Figura 27:** Estructuras metodológicas de las dos metodologías propuestas por Bruschi et al. (2011). Los recuadros celestes indican las distintas metodologías, los blancos indican los pasos de cada una.

Cabe destacar que, luego de poner a prueba ambos métodos, los autores no encontraron resultados significativamente diferentes. Sin embargo, favorecen el uso del método paramétrico ya que el directo dificulta el rastreo del origen de los resultados.

### c) Fassoulas et al. (2011)

La descripción de los pasos metodológicos ofrecida por Fassoulas et al. (2011) no tiene el mismo nivel de detalle que las metodologías anteriores. Aun así, se alcanzan a reconocer 3 pasos:

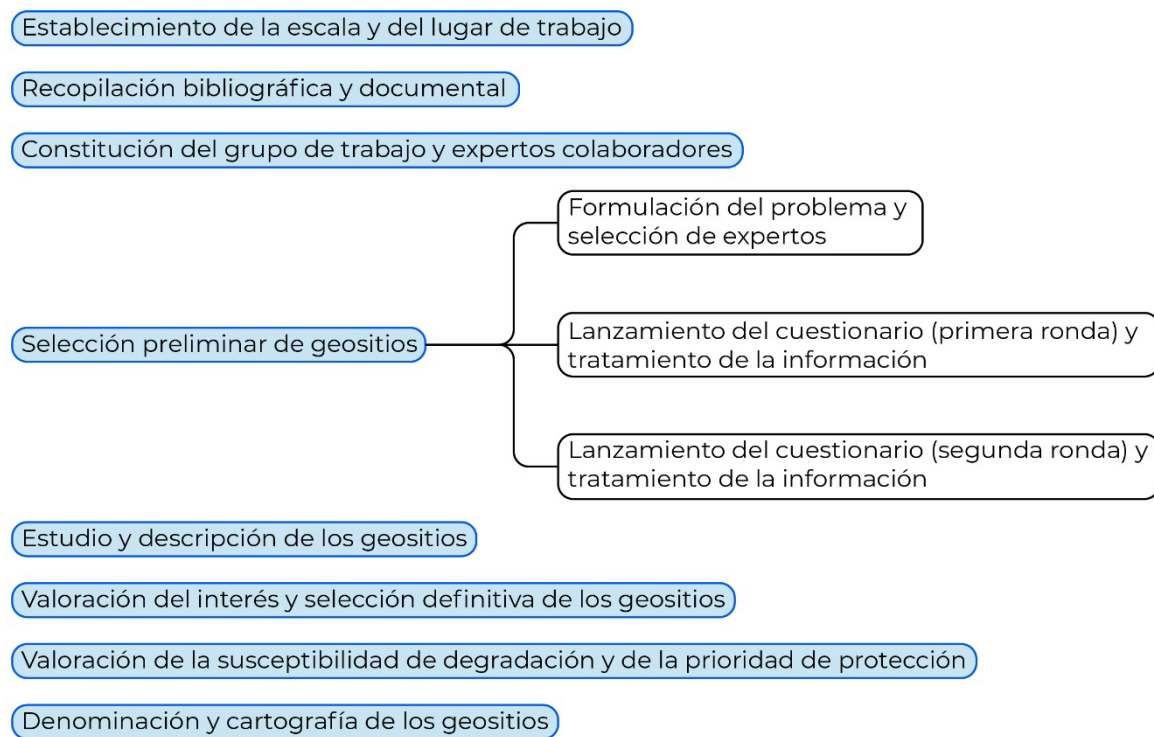
- i. Selección de un grupo de expertos.
- ii. Revisión bibliográfica.
- iii. Recopilación de información adicional.

No queda claro en qué momento se realiza la evaluación cuantitativa, ni si existen pasos posteriores a ella. De todas maneras, se puede asumir que esta vendría después de los 3 primeros pasos descritos.

#### d) **García-Cortés et al. (2014)**

Esta metodología fue diseñada para la realización del Inventario Español de Lugares de Interés Geológico (IELIG) de España. Es una de las más completas analizada en este trabajo y, probablemente, una de las más completas a nivel mundial.

Proponen una selección preliminar de geositios en base a recopilación bibliográfica y a consultas realizadas a grupos de expertos. Luego, esta pre-selección es filtrada mediante estudios y las respectivas evaluaciones cuantitativas (Figura 28).



**Figura 28:** Estructura metodológica propuesta por García-Cortés et al. (2014) para el Inventario Español de Lugares de Interés Geológico (IELIG). Los recuadros celestes representan los pasos y los blancos representan los sub-pasos.

#### e) **Alfaro & Sepúlveda (2015)**

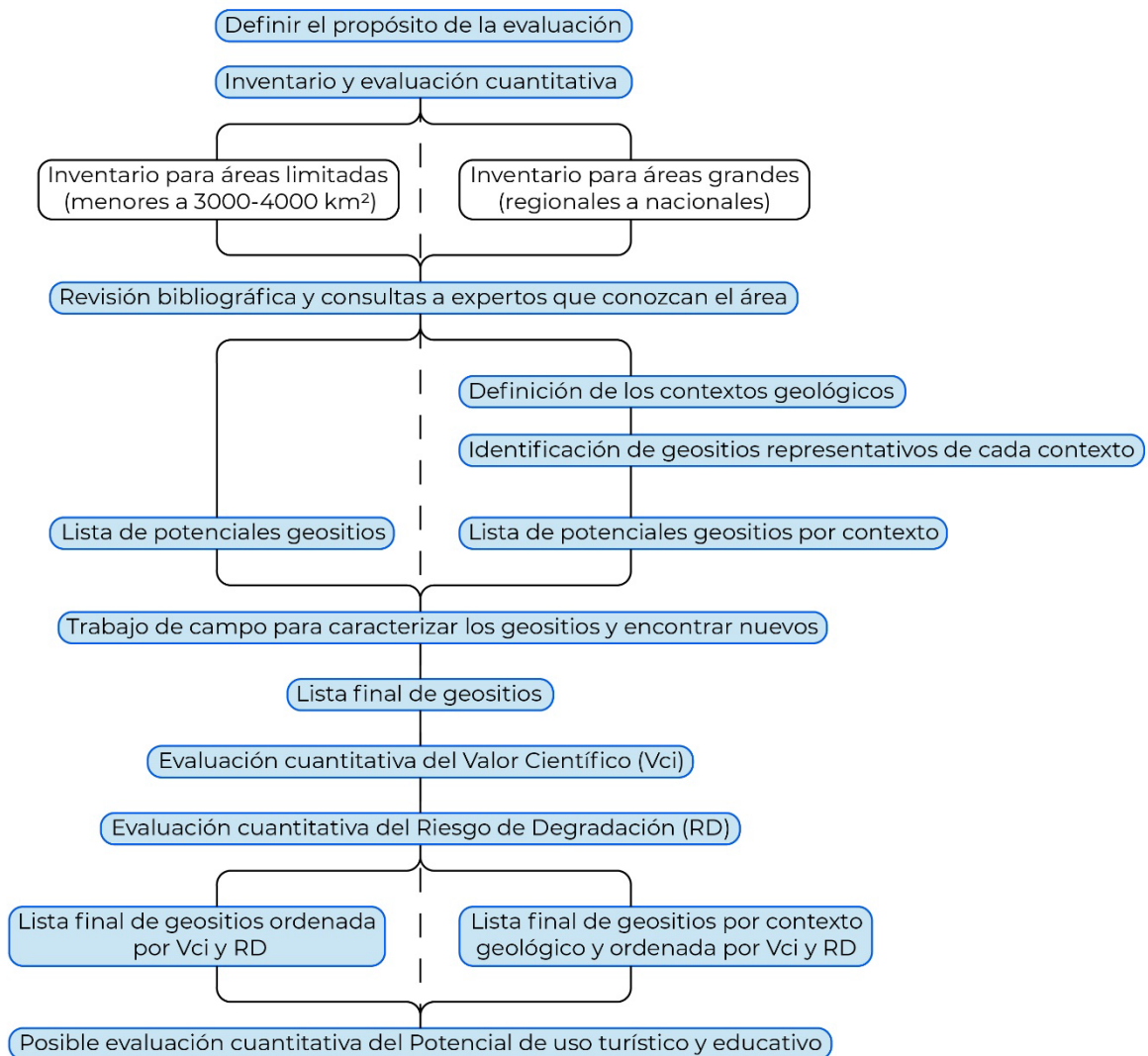
La metodología de Alfaro & Sepúlveda (2015) es simple y se compone de dos pasos, sin la presencia de divisiones posteriores. Estos pasos son:

- i i. la descripción del geositio de manera cualitativa.
- ii ii. la descripción del geositio de manera cuantitativa.

f) **Brilha, J. (2016)**

Al igual que la metodología del IELIG (García-Cortés et al., 2014), la metodología de Brilha, J. (2016) también destaca por su nivel de detalle y descripción, siendo, además, la metodología más utilizada en Chile.

Esta se compone de diversos pasos, los cuales, a partir de cierto punto, se separan en dos rutas metodológicas distintas dependiendo de la escala de trabajo. De esta manera, si se busca generar una evaluación del geopatrimonio a nivel nacional o regional se debe seguir otra ruta que la propuesta para evaluaciones de carácter más local.



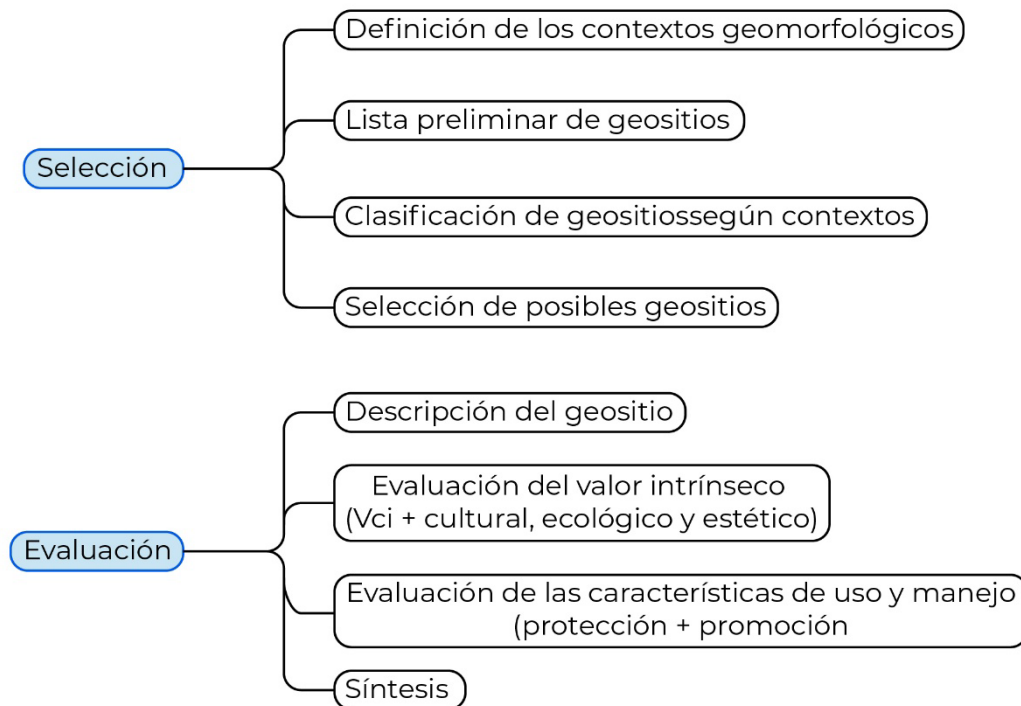
**Figura 29:** Estructura metodológica propuesta por Brilha, (2016). A partir de los recuadros blancos la metodología se separa en dos rutas distintas dependiendo de la escala de trabajo. La línea segmentada separa estas dos rutas.

Brilha, (2016) da énfasis al cálculo del Valor Científico (Vci) al definir los geositos primordialmente como lugares de interés científico. Calcula también el Riesgo de Degradación (RD) ya que considera el manejo de este índice como fundamental para poder realizar actividades científicas de manera sostenible. A diferencia de otros trabajos, los índices restantes (el potencial

de uso turístico y educativo) son definidos como secundarios y su evaluación se deja como optativa.

### g) Reynard et al. (2016)

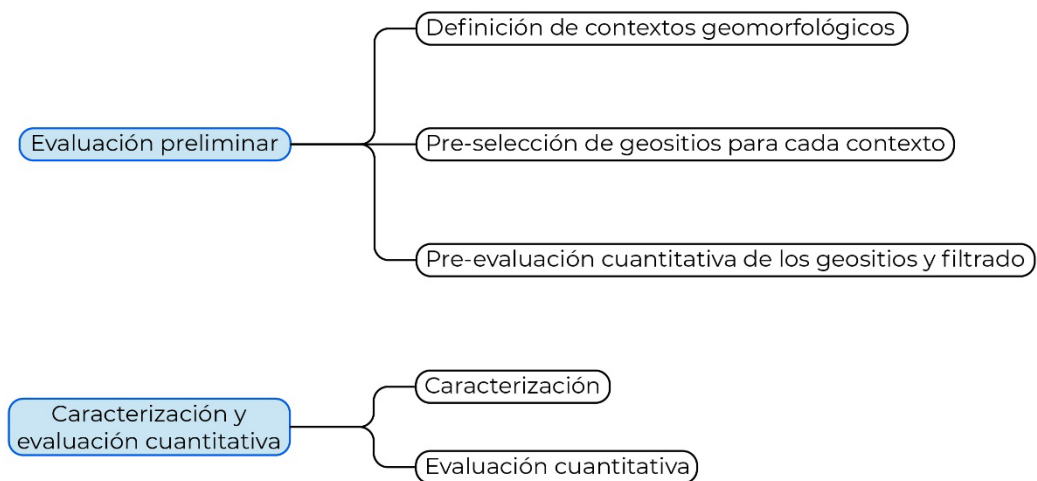
La metodología propuesta por Reynard et al. (2016) no difiere mucho de las anteriores. Se compone de un primer paso que constituye una selección preliminar de posibles LIG's para luego seguir con la evaluación cuantitativa. Se diferencia por separar los índices en dos grandes familias: i) el valor de uso intrínseco, donde incluye el Vci, el valor cultural, ecológico y estético, y ii) el valor de uso y manejo, donde incluye tanto la protección del LIG como su promoción.



**Figura 30:** Estructura metodológica propuesta por Reynard, et al. (2016). Los recuadros celestes representan los pasos y los blancos representan los sub-pasos.

### h) Santos et al. (2020)

La estructura metodológica propuesta por Santos et al. (2020) consta de una pre-selección de geositios seguida por una selección definitiva. No obstante, este trabajo es el único que incluye dos evaluaciones cuantitativas, una preliminar y otra más detallada y definitiva. La preliminar se ocupa como un primer filtro a los potenciales geositios. A grandes rasgos considera los mismos índices que la evaluación definitiva, pero se simplifica considerablemente en los parámetros y criterios utilizados para medir cada indicador. Aun así, es una opción interesante si se busca reducir la cantidad de geositios que serán evaluados en segundas instancias, sin perder objetividad en el proceso.



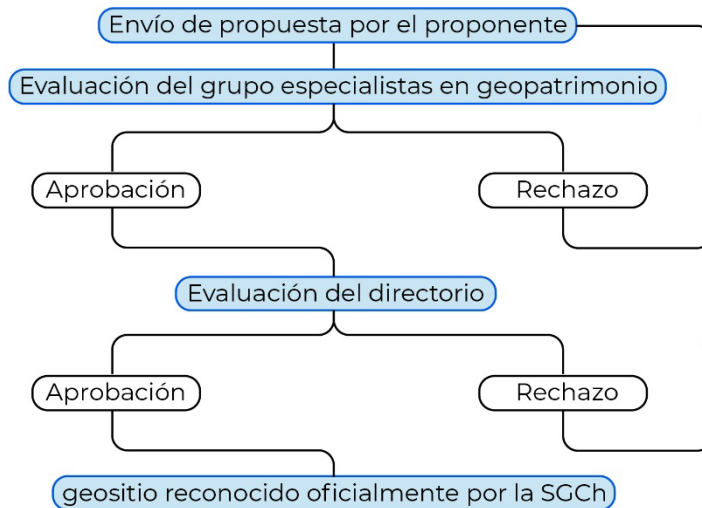
**Figura 31:** Estructura metodológica propuesta por Santos, et al. (2020). Los recuadros celestes representan los pasos y los blancos representan los sub-pasos.

### i) Metodología propuesta por la Sociedad Geológica de Chile

La Sociedad Geológica de Chile (SGCh), en particular el área de especialistas en Geopatrimonio de dicha institución, ha asumido la importante tarea de identificar y describir los geositios de Chile. Para ello, han desarrollado un método único, basado en la participación ciudadana y accesible a través de la plataforma web que han dispuesto para ello<sup>4</sup>.

Para postular un geositio, se debe ingresar en dicha plataforma y llenar una ficha. Esta ficha es luego revisada por el grupo de especialistas en geopatrimonio, quienes dan su opinión para la posterior evaluación por parte del directorio de la Sociedad. Cabe destacar que, a la fecha de redacción de este trabajo, el inventario cuenta con 84 geositios, de los cuales solamente uno es un glaciar, correspondiente al glaciar La Paloma. Esto da cuenta de la poca representatividad que han tenido estos elementos de la geodiversidad en iniciativas que buscan relevar el geopatrimonio.

<sup>4</sup> <https://geositios.cl/inscribe-un-geositio/>



**Figura 32:** Proceso para la inclusión de un geositio al inventario nacional de geositios de la SGCh.

#### 5.1.1.1 Síntesis del análisis bibliográfico de la estructura metodológica

Se identifica un patrón a partir del análisis de las 9 estructuras metodológicas recién descritas. Los primeros pasos se refieren a tareas más genéricas, como la definición del área de estudio, la escala de trabajo, el propósito del trabajo, los contextos geológicos o la identificación de un grupo de expertos. En segundas instancias, se proponen actividades para la identificación temprana de geositios o análisis bibliográficos que puedan ayudar a generar inventarios preliminares. Hecho esto, le suceden actividades de trabajo de campo y estudio de los geositios propuestos. Finalmente, estos son sometidos a las distintas evaluaciones cuantitativas propuestas por los autores, las cuales permiten el desarrollo de estrategias de gestión y la designación de geositios que integraran el inventario de geositios oficiales de los respectivos proyectos o territorios.

#### 5.1.1.2 Análisis bibliográfico de la evaluación cuantitativa

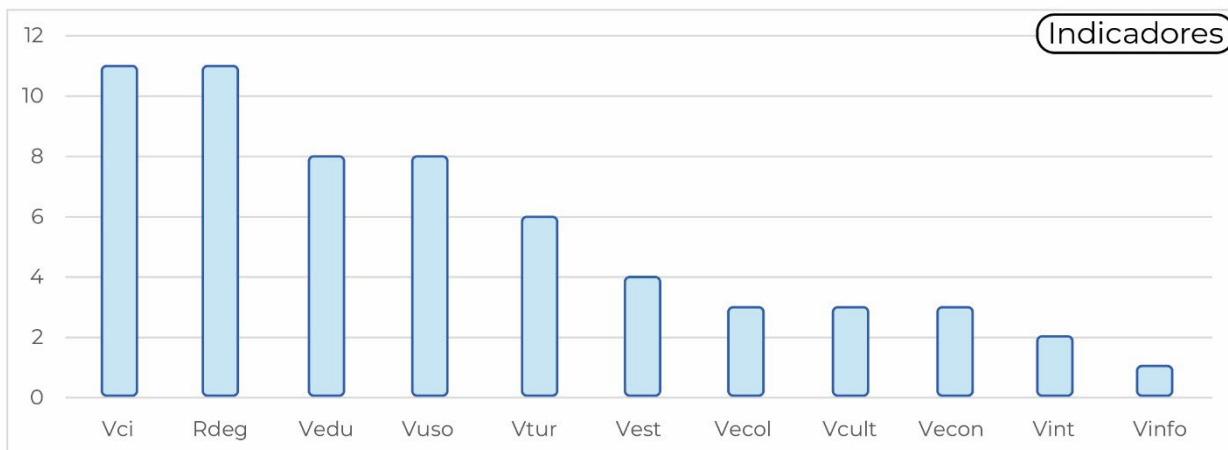
Tal como se mencionó en el apartado 3.4.2, la evaluación cuantitativa de un geositio se basa en el cálculo de distintos indicadores. Estos últimos, a su vez, son calculados en base a parámetros que suelen tener distintas ponderaciones según la importancia que el autor asigne a cada uno de ellos (Figura 15).

De las 12 publicaciones estudiadas, 11 incluyen la evaluación cuantitativa como parte de la metodología. A continuación, se muestran las principales estadísticas asociadas a dichas evaluaciones cuantitativas.

##### a) Comparación de indicadores

Los índices que más se repiten son el Valor Científico (Vci), el Valor Educativo (Vedu), el Valor Turístico (Vtur), el Valor de Uso (Vuso) y el Valor de Protección (Vprot) (Figura 33). Este último difiere mucho en nombre, siendo llamado valor de protección, riesgo de degradación, susceptibilidad de degradación, fragilidad, etc. A pesar de que la manera de calcularlo también difiere entre las distintas publicaciones, todos se refieren, en general, al estado de integridad del

geositio y a su necesidad de protegerlo, por lo que se decidió agruparlos bajo un mismo índice llamado Riesgo de Degradación. Lo mismo ocurre con otros índices, como el Vuso.



**Figura 33:** Número de apariciones de los distintos indicadores. Vci: valor científico; Rdeg: riesgo de degradación/valor de protección/susceptibilidad de degradación/fragilidad/necesidad de protección/amenazas potenciales/vulnerabilidad antrópica; Vedu: valor de uso educativo; Vuso: valor de uso/condiciones de visita/seguridad y accesibilidad; Vtur: valor de uso turístico; Vest: valor estético; Vecol: valor ecológico; Vcult: valor cultural; Vecon: valor económico; Vint: valor intrínseco; Vinfo: valor de información turística.

## b) Comparación de parámetros

Debido a que para calcular cada indicador se utilizan múltiples parámetros, el análisis de estos es más complejo. Solo en una metodología pueden utilizarse más de 40 parámetros distintos. Por ello, se decidió analizar exclusivamente aquellos que fueron utilizados para determinar los indicadores que se repiten en, al menos, la mitad de las metodologías. En consecuencia, los parámetros que se incluyen en esta parte son los pertenecientes al Vci, Rdeg, Vedu, Vuso y al Vtur, omitiéndose los demás.

Es importante destacar que muchos parámetros son nombrados de maneras diferentes, pero se refieren a lo mismo. En dichos casos, se agruparon todos aquellos parámetros bajo el mismo nombre. También, algunos autores hacen subdivisiones de ciertos parámetros que otros autores prefieren agrupar. Tal es el caso de la accesibilidad, que la mayoría de los autores dejaron como tal, pero que Alfaro & Sepúlveda (2015) decidieron separar en accesibilidad, accesibilidad estacional y grado de dificultad de acceso. Otro ejemplo de esto es el trabajo de Santos et al. (2020), quienes dividen el criterio “Valor estético” en 3 componentes distintas. Para efectos de este trabajo se prefirió trabajar con las formas agrupadas para simplificar el análisis.

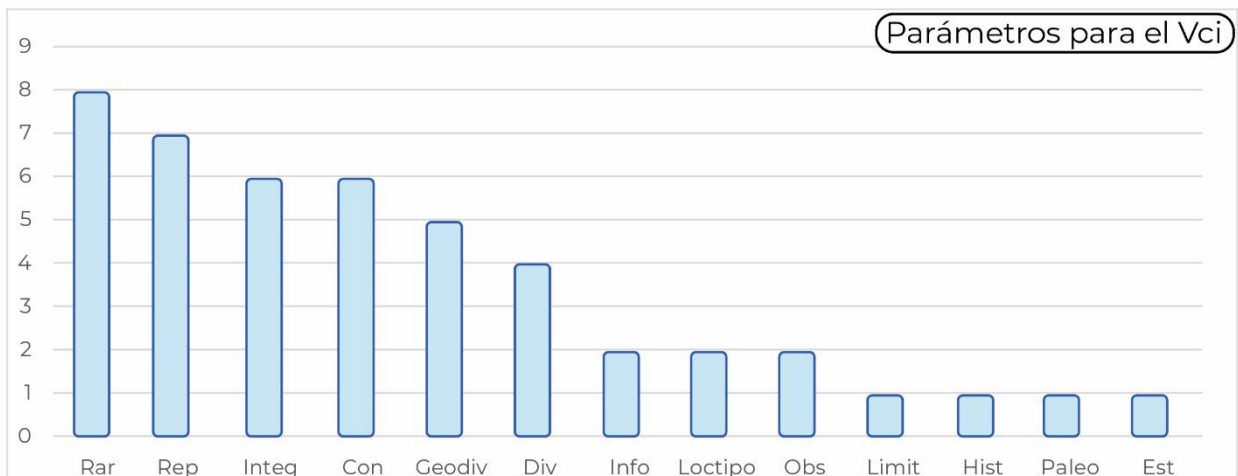
### i. Parámetros para el cálculo del Valor Científico (Vci)

Existe solamente un trabajo en el cual el Vci no es calculado (Bruschi et al., 2011), sin embargo, los criterios utilizados para calcular el Valor Intrínseco (Vint) de dicha metodología son similares a los criterios que se ocupan para calcular el Vci en los otros trabajos. Por ello, en los siguientes párrafos, donde se analizan los criterios para el cálculo del Vci, se consideraron también aquellos del Vint de Bruschi, et al. (2011).

Dos trabajos consideraron el Vci como un parámetro y no como un indicador (Martínez, 2008; Zhang et al., 2013). Adicionalmente, en el trabajo de Alfaro & Sepúlveda (2015) calculan el Vci



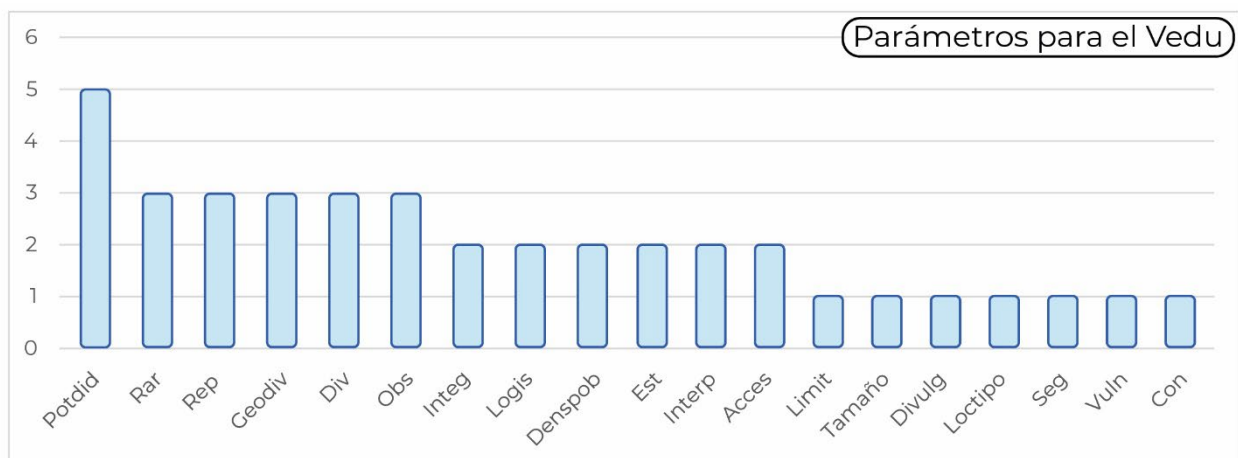
simplemente como alto, medio, bajo o nulo, perdiéndose la posibilidad de analizar los parámetros. Estos tres trabajos fueron omitidos en el análisis de parámetros para el cálculo del Vci, teniéndose por tanto un total de 8 trabajos en lugar de 11 (Figura 34).



**Figura 34:** Número de apariciones de los distintos parámetros utilizados para calcular el Vci. Rar: rareza; Rep: representatividad; Integ: integridad; Con: grado de conocimiento científico; Geodiv: geodiversidad (número de elementos de interés geológico); Div: diversidad (número de elementos interés cultural, ecológico, biológico u otro); Info: calidad de la información en paneles, guías, páginas web, etc; Loctipo: carácter de localidad tipo; Obs: condiciones de observación; Limit: Limitaciones de uso; Hist: historia geológica (cuanto de la historia geológica local está representada en el geositio en cuestión); Paleo: valor paleogeográfico (importancia para la historia de la Tierra o el clima); Est: valor estético.

## ii. Parámetros para el cálculo del Valor de Uso Educativo (Vedu)

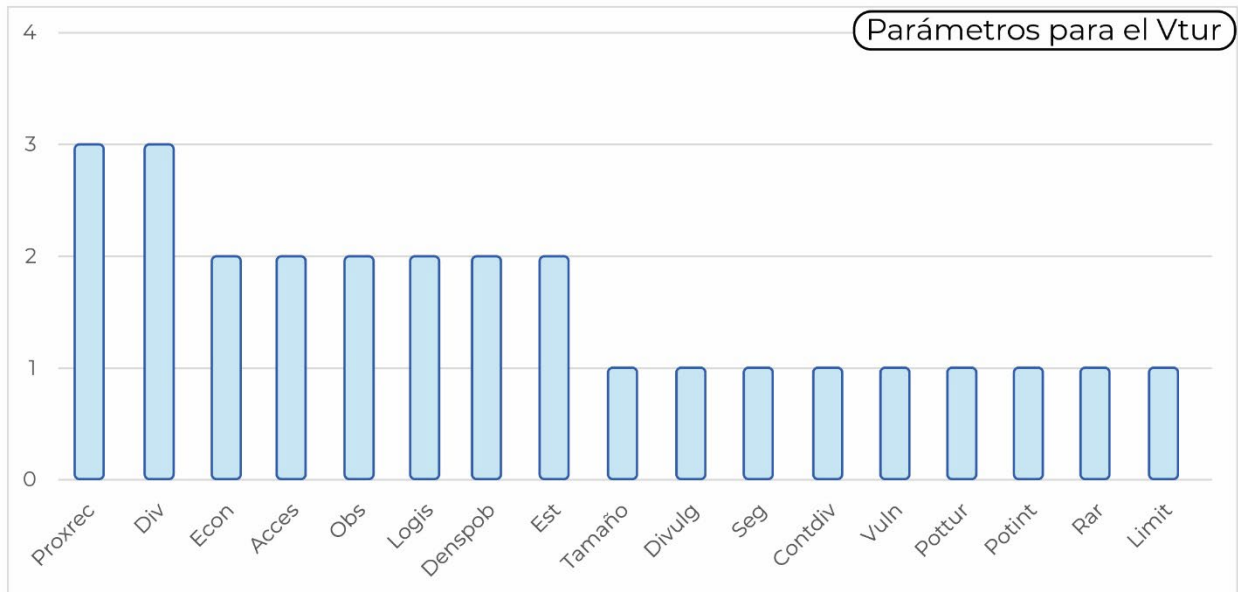
De las 11 metodologías, 7 consideran el Vedu. Sin embargo, Martínez (2008) incorpora el valor didáctico como parámetro y no como indicador. Adicionalmente Alfaro & Sepúlveda (2015), al igual que para el Vci, calculan el Vedu simplemente como alto, medio, bajo o nulo, perdiéndose la posibilidad de analizar los parámetros. Ambos trabajos fueron omitidos en este análisis, teniéndose un total de 5 trabajos analizados.



**Figura 35:** Número de apariciones de los distintos parámetros utilizados para calcular el Vedu. Potdid: potencial didáctico; Rar: rareza; Rep: representatividad; Geodiv: geodiversidad (número de elementos de interés geológico); Div: diversidad (número de elementos interés cultural, ecológico, biológico u otro); Obs: condiciones de observación; Integ: integridad; Logis: infraestructura logística; Denspob: densidad poblacional; Est: valor estético; Interp: infraestructura interpretativa; Acces: accesibilidad; Limit: Limitaciones de uso; Tamaño: tamaño del geositio; Divulg: escala de divulgación actual del geositio (nacional, regional, local, etc); Loctipo: carácter de localidad tipo; Seg: seguridad; Vuln: vulnerabilidad; Con: grado de conocimiento científico.

### iii. Parámetros para el cálculo del Valor de Uso Turístico (Vtur)

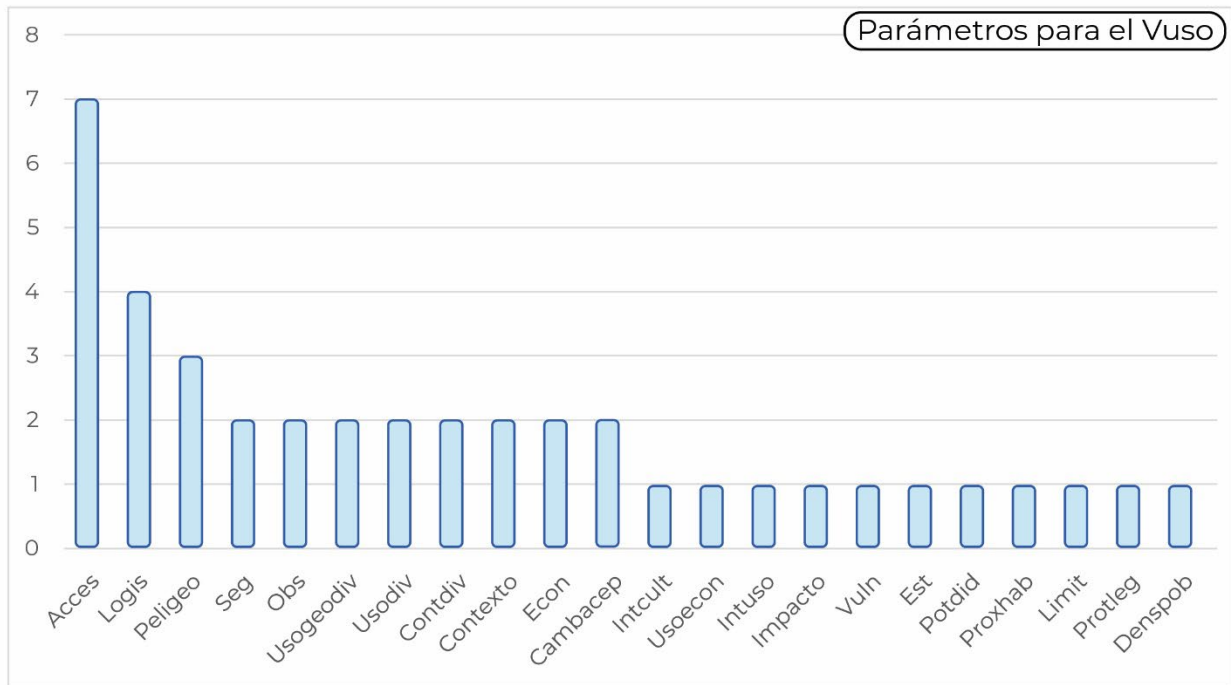
De las 11 metodologías analizadas, 5 consideran el Vtur dentro de sus evaluaciones cuantitativas. Sin embargo, Martínez (2008) incorpora el valor turístico como un parámetro. Adicionalmente Alfaro & Sepúlveda (2015), al igual que para el Vci y el Vedu, calculan el Vtur simplemente como alto, medio, bajo o nulo, perdiéndose la posibilidad de analizar los parámetros. Ambos trabajos fueron omitidos en este análisis, teniéndose un total de 3 trabajos analizados.



**Figura 36:** Número de apariciones de los distintos parámetros utilizados para calcular el Vtur. Proxrec: proximidad a otras zonas recreativas; Div: diversidad (número de elementos interés cultural, ecológico, biológico u otro); Econ: contexto socio-económico; Acces: accesibilidad; Obs: condiciones de observación; Logis: infraestructura logística; Denspob: densidad poblacional; Est: valor estético; Tamaño: tamaño del geositio; Divulg: escala de divulgación actual del geositio (nacional, regional, local, etc); Seg: seguridad; Contdiv: contenido divulgativo; Vuln: vulnerabilidad; Pottur: potencial turístico; Potint: potencial interpretativo; Rar: rareza; Limit: Limitaciones de uso.

### iv. Parámetros para el cálculo del Valor de Uso (Vuso)

Para el índice Vuso se consideraron 8 metodologías en total. Los nombres de los parámetros en el trabajo de Zhang et al. (2013) no se explican por sí mismos y tampoco están descritos en la publicación. Producto de lo mismo, se buscó hacerlos coincidir con otros criterios similares, pero también se optó por omitir algunos cuando no se supo en que categoría integrarlos.

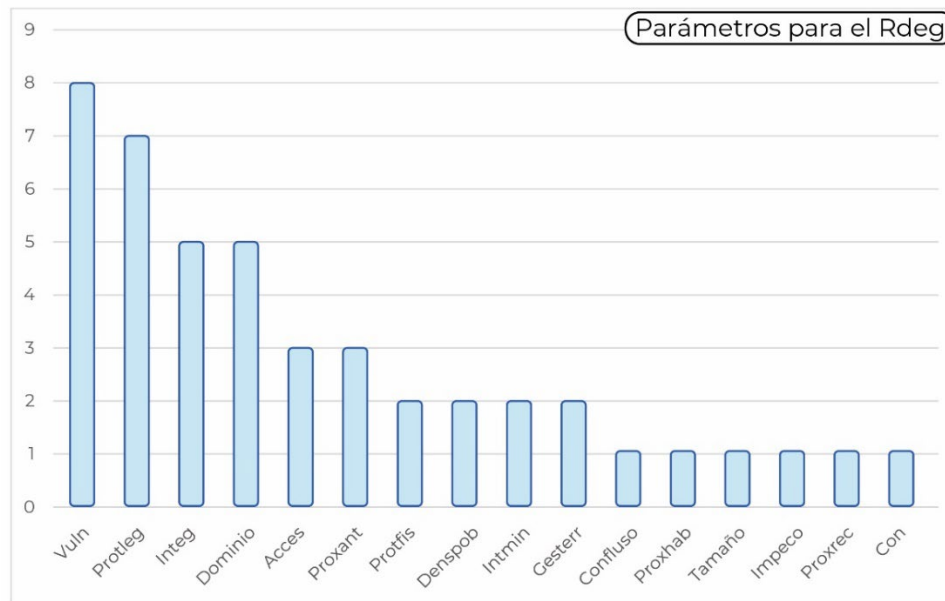


**Figura 37:** Número de apariciones de los distintos parámetros utilizados para calcular el Vuso. Acces: accesibilidad; Logis: infraestructura logística; Peligeo: peligros geológicos que afecten al geositio; Seg: seguridad; Obs: condiciones de observación; Usogeodiv: usos del elemento de interés geológico; Usodiv: usos de otros elementos de interés; Contdiv: contenido divulgativo; Contexto: contexto en el que se ubica el geositio; Econ: contexto socio-económico; Cambacep: cambios aceptables; Intcult: interés cultural; Usoecon: posibilidad de darle un uso económico al geositio; Intuso: intensidad de uso actual; Impacto: impactos en el sitio; Vuln: vulnerabilidad; Est: valor estético; Potdid: potencial didáctico; Proxhab: cercanía a lugares habitados; Limit: Limitaciones de uso; Protleg: protección legal del sitio; Denspob: densidad poblacional.

#### v. Parámetros para el cálculo del Riesgo de Degradación (Rdeg)

Al igual que para el Vci, solamente un trabajo no considera el Valor de Protección (o el riesgo de degradación). Por lo tanto, en esta sección se analizaron 10 trabajos distintos.

Cabe destacar que muchas metodologías, como, por ejemplo, Garcia-Cortéz et al. (2014), Alfaro & Sepúlveda (2015) o Santos et al. (2020), separan la vulnerabilidad de la fragilidad, atribuyéndole a la primera un carácter de origen antrópico y a la segunda el riesgo por fenómenos naturales. Ejemplos de geositios vulnerables serían sitios con fósiles sin la protección adecuada para impedir que los visitantes se lleven los ejemplares. Por otro lado, un ejemplo de un geositio frágil sería un afloramiento altamente meteorizado y, por lo tanto, susceptible de ser erosionado fácilmente. Con tal de simplificar el análisis, en este trabajo se decidió agrupar ambos parámetros bajo el nombre de vulnerabilidad.



**Figura 38:** Número de apariciones de los distintos parámetros utilizados para calcular el Vprot. Vuln: vulnerabilidad; Protleg: protección legal; Integ: integridad; Dominio: régimen de propiedad (público o privado); Acces: accesibilidad; Proxant: proximidad a actividades antrópicas; Protfis: protecciones físicas; Denspob: densidad poblacional; Intmin: Interés minero por la zona; Gesterr: grado de protección ofrecido por gestiones territoriales; Confluso: conflictos de uso que puedan perjudicar al geositio; Proxhab: cercanía a lugares habitados; Tamaño: tamaño del geositio; Impeco: impacto ecológico del geositio; Proxrec: proximidad a otras zonas recreativas; Con: grado de conocimiento científico.

### 5.1.1.2.1 Síntesis del análisis bibliográfico de la evaluación cuantitativa

Los indicadores que más se repiten en los 11 trabajos que incluyen evaluaciones cuantitativas son Valor Científico, Riesgo de Degradación, Valor Educativo, Valor de Uso y Valor Turístico. Si consideramos sólo aquellos parámetros que son considerados en al menos la mitad de las metodologías, se tiene que los parámetros más importantes para el cálculo de los distintos indicadores son: i) para el Valor Científico: Rareza, Representatividad, Integridad, Grado de Conocimiento Científico, Geodiversidad y Diversidad; ii) para el Valor Educativo: Potencial Didáctico, Rareza, Representatividad, Geodiversidad, Diversidad y Condiciones de Observación; iii) para el Valor Turístico: Proximidad a Otras Zonas Recreativas, Diversidad, Contexto Socio-Económico, Accesibilidad, Condiciones de Observación, Infraestructura Logística, Densidad Poblacional y Valor Estético; iv) para el Valor de Uso: Accesibilidad y Logística; v) para el Riesgo de Degradación: Vulnerabilidad, Protección Legal, Integridad y Régimen de Propiedad.

### 5.1.2 Resultados de la encuesta para la definición de indicadores

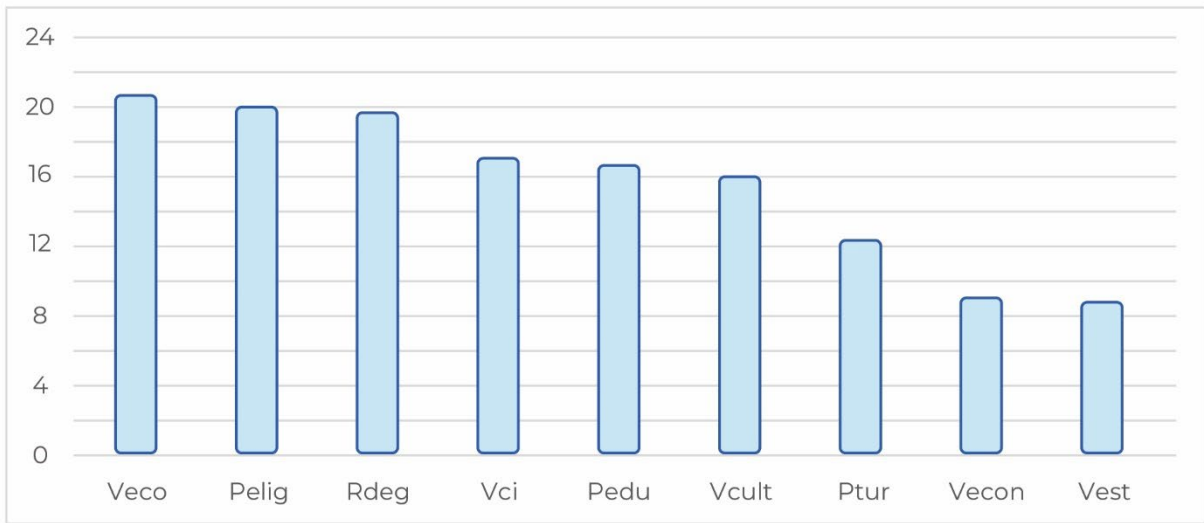
Respondieron esta encuesta un total de 23 personas, de las cuales 8 se definieron como especialistas en geopatrimonio mientras que 15 como especialistas en glaciología. Como se mencionó en el apartado 4.1.1, las preguntas de la encuesta difieren ligeramente según la especialidad del encuestado. Al sumar el total de preguntas, sin contar las preguntas que se repiten entre un grupo y otro, se tiene un total de 7 preguntas. A pesar de ello, a continuación, solo se muestran los resultados de 3 preguntas, que son las que tuvieron mayor incidencia en el diseño de la metodología. El resto de los resultados de esta encuesta pueden encontrarse en la sección de anexos.

Respecto a la pregunta donde se solicitó jerarquizar 9 potenciales indicadores mediante una escala de Likert, existe una clara predominancia de los indicadores *Valor Ecosistémico del Glaciar*, *Riesgo de Degradación del Glaciar* y *Peligrosidad Asociada al Glaciar* como aquellos que son de mayor importancia. Por otro lado, *Potencial de Uso Turístico del Glaciar*, *Valor Económico del Glaciar* y *Valor Estético del Glaciar* figuran como los indicadores de menor relevancia, mientras que *Valor Científico del Glaciar*, *Potencial de Uso Educativo del Glaciar* y *Valor Cultural del Glaciar* se hallan en una situación intermedia (Figura 39).

Para simplificar la interpretación de la jerarquización, se asignó una ponderación múltiple de 0,25 a cada categoría, siendo 0 el valor mínimo y 1 el máximo. De esta manera, la categoría de menor jerarquía, *Sin Importancia*, posee una ponderación de 0 puntos, *Poco Importante* posee 0,25, *Moderadamente Importante* posee 0,5, *Importante* 0,75 y *Muy Importante* 1 punto. Al multiplicar la ponderación de cada categoría por el número de veces en que fue seleccionada y sumarlas se obtiene un puntaje final para cada indicador (Tabla 5). El gráfico de la Figura 39 ilustra la jerarquización de mayor a menor puntaje.

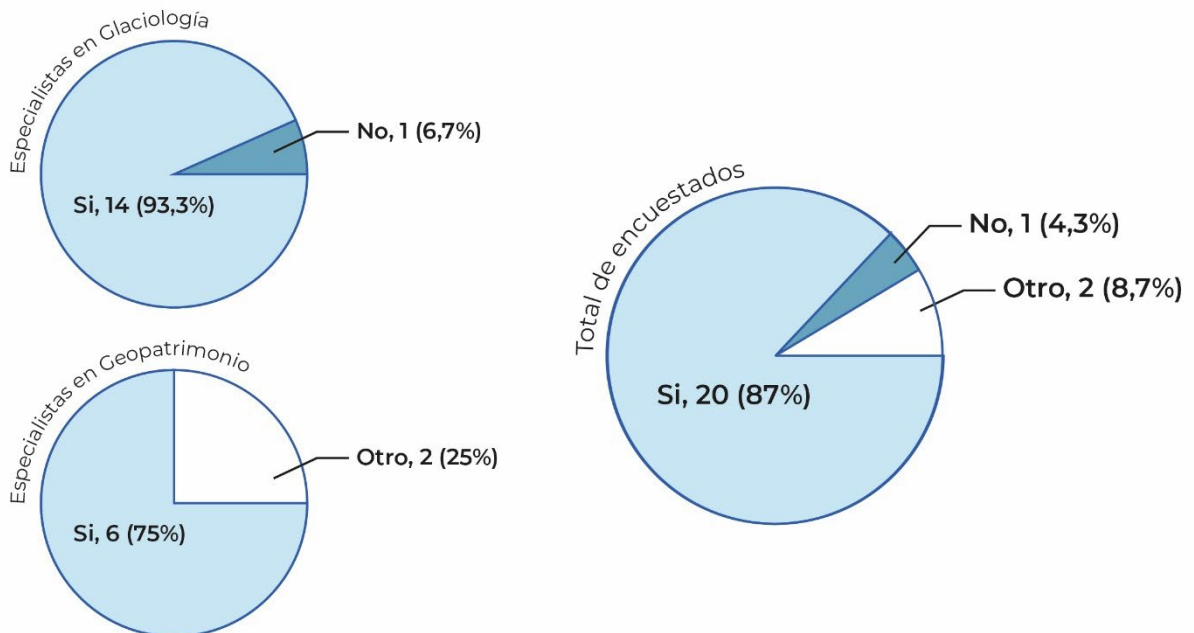
**Tabla 5:** Resultado de la jerarquización de indicadores de la primera encuesta mediante escala de Likert (SI: Sin Importancia, PI: Poco Importante, MoI: Moderadamente Importante, I: Importante, MI: Muy Importante). Para simplificar la visualización de la jerarquización, a cada categoría se le asoció una puntuación múltiple de 0,25. Así, la categoría SI posee una puntuación de 0,00 puntos, PI de 0,25, MoI de 0,50, I de 0,75 y MI de 1,00.

Indicador	Tipo encuestado	SI	PI	MoI	I	MI	Puntaje
<b>Valor científico</b>	Expertos en glaciología	0	0	3	9	3	<b>17,00</b>
	Expertos en geopatrimonio	0	1	2	2	3	
	Total	0	1	5	11	6	
<b>Potencial de uso educativo</b>	Expertos en glaciología	0	0	6	4	5	<b>16,50</b>
	Expertos en geopatrimonio	0	0	2	6	0	
	Total	0	0	8	10	5	
<b>Potencial de uso turístico</b>	Expertos en glaciología	0	5	5	3	2	<b>12,25</b>
	Expertos en geopatrimonio	0	3	1	4	0	
	Total	0	8	6	7	2	
<b>Valor ecosistémico</b>	Expertos en glaciología	0	0	1	5	9	<b>20,50</b>
	Expertos en geopatrimonio	0	0	0	3	5	
	Total	0	0	1	8	14	
<b>Valor cultural</b>	Expertos en glaciología	0	0	7	5	3	<b>16,00</b>
	Expertos en geopatrimonio	0	0	2	5	1	
	Total	0	0	9	10	4	
<b>Valor económico</b>	Expertos en glaciología	2	2	8	1	2	<b>11,00</b>
	Expertos en geopatrimonio	2	1	2	2	1	
	Total	4	3	10	3	3	
<b>Valor estético</b>	Expertos en glaciología	1	5	7	1	1	<b>10,75</b>
	Expertos en geopatrimonio	0	2	3	5	0	
	Total	1	7	10	6	1	
<b>Riesgo de degradación</b>	Expertos en glaciología	0	1	3	3	8	<b>19,75</b>
	Expertos en geopatrimonio	0	0	0	1	7	
	Total	0	1	3	4	15	
<b>Peligrosidad asociada</b>	Expertos en glaciología	0	1	1	3	10	<b>20,00</b>
	Expertos en geopatrimonio	0	0	1	2	5	
	Total	0	1	2	5	15	



**Figura 39:** Jerarquización de potenciales indicadores para la evaluación de glaciares según la opinión de expertos en glaciología y geopatrimonio. Veco: Valor Ecosistémico del Glaciar; Pelig: Peligrosidad Asociada al Glaciar; Rdeg: Riesgo de Degradación del Glaciar; Vci: Valor Científico del Glaciar; Pedu: Potencial de Uso Educativo del Glaciar; Vcult: Valor Cultural del Glaciar; Ptur: Potencial de Uso Turístico del Glaciar; Vecon: Valor Económico del Glaciar; Vest: Valor Estético del Glaciar.

Respecto a la segunda pregunta, se solicitó a los encuestados indicar si era de su preferencia separar el riesgo de degradación de un glaciar en vulnerabilidad y fragilidad. Algunas metodologías para la evaluación del geopatrimonio hacen esta distinción, entendiendo la vulnerabilidad como el riesgo de degradación del geositio producto de actividades antrópicas y a la fragilidad como el riesgo de degradación producto de procesos naturales. 20 de los 23 encuestados consideran que si es pertinente realizar dicha distinción (Figura 40).



**Figura 40:** Preferencia de los encuestados respecto a separar el riesgo de degradación de un glaciar en vulnerabilidad (riesgo de degradación por causas antrópicas) y fragilidad (riesgo de degradación por causas naturales).

Respecto a la tercera y última pregunta, exclusiva para los especialistas en glaciología y donde se les solicitó indicar el tamaño mínimo de un glaciar para la generación de inventarios, existe una tendencia de los encuestados (5 de 15) a sugerir que el tamaño mínimo debe ser de 1 hectárea (Tabla 6). Esto, además, se condice con el tamaño mínimo utilizado en el inventario de la Dirección General de Aguas (DGA). Sin embargo, cabe destacar que el último inventario de la DGA incluye glaciares menores a 1 ha (hasta 0,1 ha), siempre y cuando estos provengan de la fragmentación de glaciares que en el inventario anterior poseían más de 1 ha de superficie.

**Tabla 6:** Respuestas de los encuestados respecto al tamaño mínimo de un glaciar para la generación de inventarios. 5 de 15 encuestados indicaron que el tamaño mínimo debiese ser 1 hectárea.

Número	Respuesta según se registró en la encuesta	Área
1	0,01 hectáreas	0,01 ha
2	Depende de la zona de interés, 0,1 hectárea es un estándar internacional.	0,1 ha
3	Todos son importantes, pero depende del objetivo de estudio. No olvidar los glaciares cubiertos o rocosos de la zona árida.	S/I
4	0,1 hectárea (este valor esta alineado con lo que se considera "normal" a nivel internacional).	0,1 ha
5	1 hectárea.	1 ha
6	El tamaño en cual se puede definir como un glaciar (flujo de hielo).	S/I
7	Si el glaciar se mueve debería ser considerado. Bajo 0,1 km <sup>2</sup> un glaciar no tiene suficiente masa y el hielo está estancado.	0,1 km <sup>2</sup>
8	¿La zona de estudio es todo Chile? El tamaño mínimo debe ser el que pueda ser inventariado con rango de error aceptable según el tipo de base de dato a utilizar.	S/I
9	Todos los glaciares deberían ser inventariados.	Sin tamaño mínimo
10	Consideraría los estándares nacionales e internacionales.	S/I
11	1 hectárea (0,01 km <sup>2</sup> ).	1 ha
12	1 hectárea (0,01 km <sup>2</sup> ).	1 ha
13	Mayor a 1 ha.	1 ha
14	0,7 km <sup>2</sup>	0,7 km <sup>2</sup>
15	1 hectárea.	1 ha

### 5.1.3 Resultados de la encuesta para la definición de la ponderación de los parámetros

Respondieron a esta encuesta un total de 44 personas (29 respondieron la versión en inglés, mientras que 15 respondieron la versión en español). Al igual que para la jerarquización de los indicadores, para calcular la ponderación de cada parámetro se asignó un puntaje de 0 a 1, con incrementos de 0,25 a cada categoría. Esto quiere decir que la categoría *Sin Importancia* posee una ponderación de 0 puntos, *Poco Importante* posee 0,25, *Moderadamente Importante* posee 0,50, *Importante* 0,75 y *Muy Importante* 1 punto. (Tabla 7).

**Tabla 7:** Respuestas de la encuesta para la definición de la ponderación o peso asociado a cada parámetro (SI: Sin Importancia, PI: Poco Importante, MoI: Moderadamente Importante, I: Importante, MI: Muy Importante).

Indicador	Parámetro	SI	PI	MoI	I	MI	Puntaje	Peso (%)
Valor uso	Accesibilidad	0	2	8	16	18	34,50	<b>13</b>
	Condiciones de observación	0	2	10	17	15	33,25	<b>13</b>
	Potencial interpretativo	0	6	19	13	6	26,75	<b>10</b>
	Valor Estético	5	13	5	12	9	23,75	<b>9</b>
	Limitaciones de uso	0	5	14	14	11	29,75	<b>12</b>
	Seguridad	0	8	6	15	15	31,25	<b>13</b>
	Proximidad a centro poblados	2	10	15	9	8	24,75	<b>9</b>
	Proximidad a centros turísticos	4	9	15	10	6	23,25	<b>9</b>
	Número de habitantes comuna	9	8	14	9	4	19,75	<b>6</b>
	Contexto socioeconómico comuna	14	10	13	5	2	14,75	<b>6</b>
Valor científico	Representatividad	0	0	4	16	24	38,00	<b>29</b>
	Rareza	1	4	14	13	12	29,75	<b>23</b>
	Diversidad de elementos de interés	0	5	12	16	11	30,25	<b>23</b>
	Conocimiento científico	0	5	8	15	16	32,50	<b>25</b>
Riesgo de degradación	Hipsometría	0	4	6	14	20	34,50	<b>19</b>
	Tiempo de respuesta	3	2	11	14	14	30,50	<b>17</b>
	Balance de masa	1	4	5	11	23	34,75	<b>20</b>
	Actividad volcánica	1	12	9	16	6	25,50	<b>14</b>
	Interés para la explotación	3	8	10	16	7	26,00	<b>15</b>
	Tipo de actividad antrópica	2	11	8	15	8	26,00	<b>15</b>
Peligrosidad asociada	Grietas	3	6	10	13	12	28,25	<b>13</b>
	Desprendimientos de material	1	5	5	13	20	33,50	<b>15</b>
	Avalanchas	1	6	8	7	22	32,75	<b>15</b>
	Avalanchas roca – hielo	1	4	6	12	21	34,00	<b>15</b>
	GLOF's	1	2	4	13	24	36,25	<b>16</b>
	Lahares	1	4	10	12	17	32,00	<b>14</b>
	Surges	3	3	14	15	9	28,00	<b>12</b>

#### 5.1.4 Metodología para la evaluación de glaciares

En base a los resultados de las encuestas y al análisis bibliográfico de metodologías para la evaluación del geopatrimonio, se diseñó una metodología para la evaluación de glaciares. Al igual que las metodologías para la evaluación del geopatrimonio, la metodología aquí presentada puede ser separada en dos partes. La primera de ellas se refiere a la estructura general de la metodología. Puede ser concebida como un algoritmo que de seguirse permite la aplicación completa de la metodología. A esta parte se le llama “estructura metodológica”. La segunda parte se refiere a la evaluación cuantitativa y es, en realidad, un paso más dentro de la estructura metodológica, pero debido a su relevancia y extensión, se presenta por separado.



### 5.1.4.1 Estructura metodológica

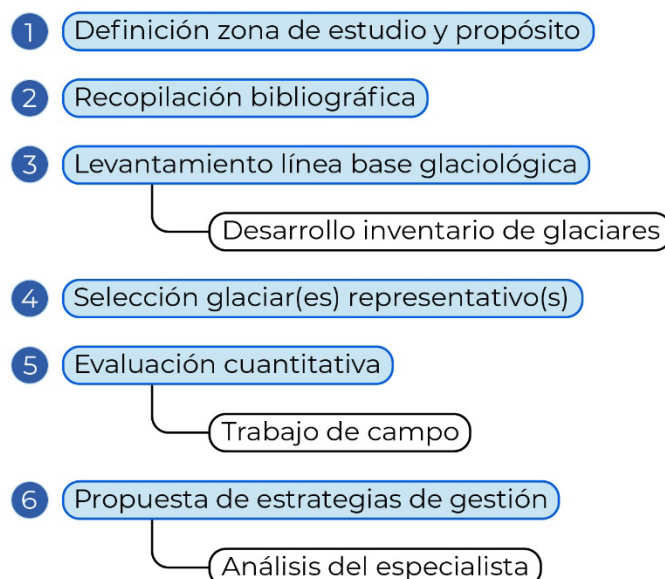
La estructura metodológica para la evaluación de glaciares se compone de 6 pasos individuales que deben ser aplicados en el orden indicado en la Figura 41. El primero de ellos considera la definición de la zona de estudio y el propósito. Este último puede ser turístico, educativo, científico, entre otros. Una vez definidos ambos, se procede a realizar una recopilación bibliográfica. Esta debe incluir, idealmente, todas las publicaciones relativas a glaciares que se hayan realizado dentro de la zona de estudio. Son de especial utilidad aquellas publicaciones que incluyen inventarios o análisis multitemporales, puesto que servirán de insumo para el tercer paso, el levantamiento de la línea base glaciológica.

De no contar con un inventario actualizado para la zona de estudio, se sugiere realizar uno propio. A partir de este, y utilizando también las otras publicaciones que existan del territorio, se puede esbozar un diagnóstico general del contexto glaciológico que indique parámetros clave como número y tipos de glaciares, superficie englaciada, volumen de hielo, balances de masa, entre otros. Apoyándose en este diagnóstico, es posible seleccionar uno o más glaciares que sean representativos del contexto glaciológico para su posterior evaluación cuantitativa. Aquellos proyectos que cuenten con recursos necesarios y/o que posean glaciares de fácil acceso deberían seleccionar tantos glaciares como les sea factible o, al menos, seleccionar todos aquellos glaciares para los cuales se desean diseñar estrategias de gestión. Sin embargo, la mayoría de los proyectos de SLM o gobernanzas locales cuentan con recursos limitados y los glaciares suelen ser de difícil acceso. En dicho caso, basta con seleccionar un solo glaciar, teniendo en consideración que la evaluación cuantitativa será representativa para ese glaciar en particular y sucesivamente menos representativa para glaciares de distinto tamaño, con distinta orientación, de distinta clasificación, ubicados en otro lugar, etc. La selección de él o los glaciares puede hacerse tomando en consideración la metodología propuesta en el libro *Manual Balance de Masa Glaciar* (Rivera et al., 2017), la cual sugiere que el glaciar a elección debe ser: a) espacialmente representativo, b) representativo de la diversidad glaciológica regional, c) hipsométricamente representativo, d) con fáciles condiciones de acceso (incluyendo la situación legal de acceso), e) que disponga de información adicional, como imágenes aéreas, datos históricos, meteorológicos, entre otros y, f) seguro, es decir, evitar aquellos glaciares que pueden suponer un riesgo para investigadores, como grietas, avalanchas o séracs.

Una vez seleccionado él o los glaciares, se procede a evaluarlo(s) cuantitativamente. Para ello, puede ser necesario realizar campañas de campo que permitan obtener los datos necesarios. De no contar con la posibilidad para realizar visitas al glaciar, la evaluación cuantitativa puede ser aplicada de manera remota. Sin embargo, se deberá incurrir en un gran número de aproximaciones que aumentarán la incertidumbre de los resultados. Por lo mismo, se sugiere enfáticamente realizar estudios in situ.

Finalmente, en base a los resultados obtenidos, se procede a diseñar las estrategias de gestión. Estas deben enfocarse según el propósito del estudio definido en el primer paso. Nuevamente, cabe destacar que, en caso de haberse aplicado la evaluación en un solo glaciar, la estrategia de gestión que emerja de esta será de mayor utilidad para dicho glaciar, y sucesivamente menos representativa para glaciares de distinto tamaño, con distinta orientación, de distinta clasificación, ubicados en otro lugar, etc. Por lo mismo, de ser posible, deben evaluarse todos los glaciares para los cuales se desee establecer estrategias de gestión. También es necesario destacar que los resultados de la evaluación cuantitativa deben ser analizados por el especialista que condujo el

estudio y no pueden basarse únicamente en los resultados de la evaluación cuantitativa. Así, esta última debe ser considerada como un apoyo para la propuesta de estrategias y no como un indicador absoluto.



**Figura 41:** Estructura metodológica para la evaluación de glaciares. Los pasos 3 y 5 pueden o no incluir el desarrollo de un inventario propio de glaciares y la ejecución de trabajo de campo. La propuesta de las estrategias de gestión se basa en la evaluación cuantitativa y en el análisis del especialista que aplicó la metodología.

#### 5.1.4.2 Evaluación cuantitativa

La evaluación cuantitativa se separa en 4 indicadores: Valor de Uso (VU), Valor Científico (VC), Riesgo de Degradación (RD) y Peligrosidad Asociada (PA). A su vez, para calcular cada uno de estos indicadores, es necesario estimar el puntaje de distintos parámetros, tal como se muestra en la Figura 15.

##### 5.1.4.2.1 Evaluación cuantitativa del indicador “Valor de Uso”

La evaluación cuantitativa del VU se calcula a partir de 10 parámetros:

- i. Accesibilidad: a mayor calidad de caminos y senderos, mayor valor. Se separa en accesibilidad de aproximación, de sendero y estacional. Cada una de estas partes tiene el mismo peso.
- ii. Condiciones de observación: mientras más fácil sea observar el glaciar o sus elementos de interés, mayor valor.
- iii. Potencial interpretativo: mientras más fácil sea interpretar los elementos o procesos de interés del glaciar, mayor valor.
- iv. Valor estético: glaciares que muestren rasgos o procesos atractivos, como nunataks, rimayas o calving entregan mayores valores.
- v. Limitaciones de uso: restricciones públicas o privadas para el acceso. Menos restricciones implican mayor valor.
- vi. Seguridad: riesgos asociados a acercarse, subirse o recorrer el glaciar. Menor riesgo implica mayor valor.
- vii. Proximidad a centros poblados: a menor distancia de centros poblados, mayor valor.
- viii. Proximidad a centros turísticos: a menor distancia de centros turísticos, mayor valor.

- ix. Número de habitantes en la comuna: más habitantes en la comuna con respecto al promedio nacional implica un mayor valor.
- x. Contexto socioeconómico de la comuna: un mayor ingreso per capita de la comuna con respecto al promedio nacional implica un mayor valor.

**Tabla 8:** Parámetros, ponderaciones, criterios y puntajes para calcular el VU.

Valor de Uso			
Parámetro	Criterio	Pje	
Accesibilidad 13%	Accesibilidad de aproximación	Camino apto para todo vehículo, incluyendo buses, con baja o nula exposición a peligros.	100
		Camino apto para todo vehículo, incluyendo buses, con mediana o alta exposición a peligros.	75
		Camino apto para todo vehículo, excluyendo buses.	50
		Camino apto solo para vehículos todo terreno con baja exposición a peligros.	25
		Camino apto solo para vehículos todo terreno con mediana o alta exposición a peligros o, en su defecto, es necesario embarcarse.	0
	Accesibilidad de sendero	Dificultad baja, para todo público.	100
		Dificultad media-baja, para personas afines a caminatas largas.	75
		Dificultad media, para personas con buen estado físico y conocimientos básicos de montañismo.	50
		Difícil, para personas con buen estado físico y conocimientos intermedios de montañismo.	25
		Muy difícil, sólo para personas con buen estado físico, conocimientos avanzados de montañismo, como progresión en glaciar o rescate en grietas, y equipo técnico.	0
	Accesibilidad estacional	Visitable las cuatro estaciones del año.	100
		Visitable solo durante tres estaciones del año.	75
		Visitable solo durante dos estaciones del año.	50
		Visitable solo durante una estación del año.	25
		Difícil acceso durante cualquier estación del año.	0
Condiciones de observación 13%	Es posible observar gran parte del glaciar o su(s) elemento(s) de interés sin la necesidad de recorrer el lugar.	100	
	Existen elementos que enmascaran el paisaje siendo necesario recorrer el lugar para observar el glaciar o su(s) elemento(s) de interés.	50	
	Es necesario contar con equipo técnico y conocimientos avanzados de progresión en glaciar para llegar a un punto que permita observar el glaciar o su(s) elemento(s) de interés.	0	
Potencial interpretativo 10%	El/los principal(es) elemento(s) de interés del glaciar ilustra(n) procesos que son fácilmente comprensibles por todo público.	100	
	El/los principal(es) elemento(s) de interés del glaciar ilustra(n) procesos que son comprensibles para público con base teórica en ciencias.	50	
	El glaciar ilustra procesos que son solo comprensibles por expertos.	0	
Valor estético 9%	El glaciar cumple con los cuatro atributos siguientes: - Gran parte de su superficie está descubierta o, en su defecto, está cubierto, pero se observan claros indicios de flujo. - Es dinámico y muestra recurrentemente procesos como calving o desprendimientos de material. - Posee elementos de interés visibles y llamativos, como rimayas, grietas, seracs, nunataks, morrenas, entre otros. - Posee una forma o tamaño que lo hacen llamativo.	100	
	Cumple con tres de los cuatro atributos mencionados previamente.	75	
	Cumple con dos de los cuatro atributos mencionados previamente.	50	
	Cumple con uno de los cuatro atributos mencionados previamente.	25	
	No cumple con ningún atributo.	0	
Limitaciones de uso 12%	Es posible realizar actividades de investigación (sondajes de hielo, instalación instrumentos, entre otros) y visitas al glaciar sin restricciones.	100	
	Solo es posible realizar actividades de investigación y visitas al glaciar con previa autorización.	50	
	No es posible realizar ningún tipo de actividad en el glaciar.	0	
Seguridad 13%	Acercarse, subirse y recorrer el glaciar no supone mayores riesgos.	100	
	Acercarse y subirse al glaciar no supone mayores riesgos, pero existen riesgos al recorrerlo (grietas, desprendimientos, entre otros).	75	
	Acercarse al glaciar no supone mayores riesgos, pero existen riesgos al subirse o recorrerlo.	50	
	Acercarse al glaciar supone riesgos moderados.	25	
	Acercarse al glaciar es muy riesgoso.	0	
Proximidad a centros poblados	La aproximación al glaciar no toma más de media jornada desde el centro poblado más cercano.	100	
	La aproximación al glaciar toma una jornada desde el centro poblado más cercano.	75	
	Es necesario pernoctar una noche para llegar al glaciar desde el centro poblado más cercano.	50	
	Es necesario pernoctar dos noches para llegar al glaciar desde el centro poblado más cercano.	25	

9%	Es necesario pernoctar al menos tres noches para llegar al glaciar desde el centro poblado más cercano.	0
Proximidad a centros turísticos 9%	Existen servicios turísticos, hoteles, restaurantes o cafeterías ubicados a no más de media jornada del glaciar.	100
	Existen servicios turísticos, hoteles, restaurantes o cafeterías ubicados a no más de una jornada del glaciar.	75
	Existen servicios turísticos, hoteles, restaurantes o cafeterías tal que es necesario pernoctar una noche para llegar al glaciar.	50
	Existen servicios turísticos, hoteles, restaurantes o cafeterías tal que es necesario pernoctar dos noches para llegar al glaciar.	25
	Existen servicios turísticos, hoteles, restaurantes o cafeterías tal que es necesario pernoctar al menos tres noches para llegar al glaciar.	0
Número de habitantes en la comuna 6%	El glaciar se ubica en una comuna cuya densidad poblacional es mayor al doble del promedio nacional.	100
	El glaciar se ubica en una comuna cuya densidad poblacional es mayor al promedio nacional.	75
	El glaciar se ubica en una comuna cuya densidad poblacional es similar al promedio nacional.	50
	El glaciar se ubica en una comuna cuya densidad poblacional es menor al promedio nacional.	25
	El glaciar se ubica en una comuna cuya densidad poblacional es menor a la mitad del promedio nacional.	0
Contexto socioeconómico 6%	El glaciar se ubica en una región con un ingreso per cápita mayor al doble del promedio nacional.	100
	El glaciar se ubica en una región con un ingreso per cápita mayor al promedio nacional.	75
	El glaciar se ubica en una región con un ingreso per cápita similar al promedio nacional.	50
	El glaciar se ubica en una región con un ingreso per cápita menor al promedio nacional.	25
	El glaciar se ubica en una región con un ingreso per cápita menor a la mitad del promedio nacional.	0

#### 5.1.4.2.2 Evaluación cuantitativa del indicador “Valor Científico”

La evaluación cuantitativa del VC se calcula a partir de 4 parámetros:

- i. Representatividad: cuan representativos son los procesos/elementos de interés del glaciar a nivel regional o nacional. Difiere de la rareza por ser cualitativo.
- ii. Rareza: cuan raros son los procesos/elementos de interés del glaciar a nivel regional o nacional. A menor número, mayor valor. Difiere de la representatividad por ser cuantitativo.
- iii. Diversidad de elementos de interés: cuantos procesos/elementos de relevancia científica ilustra el glaciar. A mayor número, mayor valor.
- iv. Conocimiento científico: la existencia de publicaciones científicas previas implica un mayor valor dado que reflejan, en cierta medida, el valor científico otorgado por la comunidad de geocientistas.

**Tabla 9:** Parámetros, ponderaciones, criterios y puntajes para calcular el VC.

Valor Científico		
Parámetro	Criterio	Pje
Representatividad 29%	Es uno de los mejores ejemplos a nivel nacional para ilustrar o estudiar determinados procesos o rasgos glaciológicos.	100
	Es un buen ejemplo a nivel nacional para ilustrar o estudiar determinados procesos o rasgos glaciológicos.	75
	Es un buen ejemplo a nivel regional para ilustrar o estudiar determinados procesos o rasgos glaciológicos.	50
	Es un buen ejemplo a nivel regional para ilustrar o estudiar determinados procesos o rasgos glaciológicos, pero existen mejores opciones en la región.	25
	No es un buen ejemplo para ilustrar o estudiar determinados procesos o rasgos glaciológicos.	0
Rareza 23%	Los procesos o rasgos glaciológicos de interés científico que ilustra el glaciar son muy raros a nivel nacional.	100
	Los procesos o rasgos glaciológicos de interés científico que ilustra el glaciar son medianamente raros a nivel nacional.	75
	Los procesos o rasgos glaciológicos de interés científico que ilustra el glaciar son muy raros a nivel regional.	50
	Los procesos o rasgos glaciológicos de interés científico que ilustra el glaciar son medianamente raros a nivel regional.	25
	Los procesos o rasgos glaciológicos de interés científico que ilustra el glaciar son comunes.	0
Diversidad de elementos de interés 23%	El glaciar ilustra al menos 4 procesos o rasgos de relevancia científica.	100
	El glaciar ilustra 3 procesos o rasgos de relevancia científica.	75
	El glaciar ilustra 2 procesos o rasgos de relevancia científica.	50
	El glaciar ilustra 1 proceso o rasgo de relevancia científica.	25
	El glaciar no posee ningún atributo que suscite su estudio.	0
Conocimiento científico 25%	El glaciar cuenta con publicaciones científicas en revistas internacionales.	100
	El glaciar cuenta con publicaciones científicas en revistas nacionales.	75
	El glaciar cuenta con tesis de posgrado o abstracts presentados en eventos científicos.	50
	El glaciar cuenta con al menos una tesis de pregrado.	25
	No existen trabajos publicados del glaciar.	0

### 5.1.4.2.3 Evaluación cuantitativa del indicador “Riesgo de Degradación”

La evaluación cuantitativa del RD se separa en fragilidad (riesgo de degradación del glaciar por procesos naturales) y vulnerabilidad (riesgo de degradación por procesos antrópicos). De no existir amenazas de origen antrópico en toda la zona de estudio, esta última parte debe ser omitida. De aplicarse la evaluación cuantitativa en dos o más glaciares y en caso de que al menos uno de ellos está bajo amenazas antrópicas, el RD de todos los glaciares debe ser calculado considerando la vulnerabilidad. Esto permite que el RD sea comparable entre los distintos glaciares.

Cabe destacar que el retroceso acelerado que experimentan los glaciares de manera generalizada es producto del calentamiento global, el cual a su vez es producto de acciones antrópicas. Sin embargo, dado que el fin último de la metodología es generar estrategias de gestión, se optó por considerar el retroceso generalizado de los glaciares como parte de la fragilidad, ya que a la fecha la única medida para mitigar dicho retroceso es la disminución de gases de efecto invernadero, la cual es una política pública de carácter internacional que va más allá de la capacidad de acción de proyectos o gobernanzas locales.

La fragilidad se calcula a partir de 4 parámetros:

- i. Hipsometría vs ELA: ubicación de la ELA con respecto a la curva hipsométrica del glaciar. Glaciares que poseen su ELA en una posición tal que pequeñas variaciones afectarían una gran superficie del glaciar poseen mayores valores.
- ii. Tiempos de respuesta: a menor tiempo de respuesta, mayor valor.
- iii. Balance de masa: tendencia del balance de masa del glaciar en las últimas dos décadas. Balances de masa negativo implican un mayor valor.
- iv. Actividad volcánica: existencia y recurrencia de la actividad volcánica en las cercanías del glaciar. A mayor recurrencia, mayor valor.

A su vez, la vulnerabilidad se calcula a partir de 2 parámetros:

- i. Interés para la explotación: se refiere a la explotación hídrica o minera que pueda desarrollarse sobre, bajo o en la vecindad inmediata del glaciar.
- ii. Tipo de actividad: que tipo de actividad se desarrolla actualmente en las cercanías del glaciar, si la hay. Actividades que tienen un impacto directo en el glaciar entregan mayores valores.

Tabla 10: Parámetros, ponderaciones, criterios y puntajes para calcular el RD.

Riesgo de Degradación			
Categoría	Parámetro	Criterio	Pje
Fragilidad 70%	Hipsometría vs ELA 27%	La curva hipsométrica del glaciar en relación con la ubicación de la ELA es tal que un pequeño aumento de la ELA reduce significativamente la <i>Accumulation Area Ratio</i> (AAR) o, en su defecto, la ELA se ubica por encima del glaciar.	100
		La curva hipsométrica del glaciar en relación con la ubicación de la ELA es tal que se requiere un aumento moderado de la ELA para reducir significativamente la AAR.	50
		La curva hipsométrica del glaciar en relación con la ubicación de la ELA es tal que grandes aumentos de la ELA no afectan significativamente la AAR.	0
	Balance de masa 29%	De mantenerse la tendencia del balance de masa de las últimas dos décadas, el glaciar desaparecería en menos de 1 década.	100
		De mantenerse la tendencia del balance de masa de las últimas dos décadas, el glaciar desaparecería en más de 1 y menos de 5 décadas.	75
		De mantenerse la tendencia del balance de masa de las últimas dos décadas, el glaciar desaparecería en más de 5 décadas y menos de 1 siglo.	50
		De mantenerse la tendencia del balance de masa de las últimas dos décadas, el glaciar desaparecería en más de un siglo o, en su defecto, el balance de masa del glaciar durante las últimas dos décadas es aproximadamente 0.	25
		La tendencia del balance de masa del glaciar durante las últimas dos décadas es positiva.	0
	Tiempo de respuesta 24%	El glaciar tiene un tiempo de respuesta inferior a 1 década.	100
		El glaciar tiene un tiempo de respuesta de 1 a 2 décadas.	75
		El glaciar tiene un tiempo de respuesta de 2 a 5 décadas.	50
		El glaciar tiene un tiempo de respuesta de 5 décadas a 1 siglo.	25
		El glaciar tiene un tiempo de respuesta que supera el siglo.	0
	Actividad volcánica 20%	El glaciar se ubica sobre o en las cercanías de una zona volcánica donde se han registrado erupciones en el último siglo.	100
		El glaciar se ubica sobre o en las cercanías de una zona volcánica donde se han registrado erupciones desde al menos el siglo XX.	75
		El glaciar se ubica sobre o en las cercanías de una zona volcánica donde se han registrado erupciones en tiempos históricos.	50
		El glaciar se ubica sobre o en las cercanías de una zona volcánica donde no se han registrado erupciones en tiempos históricos.	25
		El glaciar no se ubica sobre o en las cercanías de una zona volcánica.	0
	Vulnerabilidad 30%	Interés para la explotación 50%	El glaciar se ubica en una zona de gran interés para la explotación del recurso hídrico y/o minero y donde ya existe al menos una faena activa.
El glaciar se ubica en una zona de gran interés para la explotación del recurso hídrico y/o minero, donde está prevista su explotación.			75
El glaciar se ubica en una zona de interés para la explotación del recurso hídrico y/o minero, pero aún no está prevista su explotación inmediata.			50
El glaciar se ubica en una zona de bajo interés para la explotación del recurso hídrico y/o minero.			25
El glaciar se ubica en una zona donde no hay interés para la explotación del recurso hídrico y/o minero.			0
Tipo de actividad 50%		Se desarrollan actividades que implican la destrucción directa de hielo, tal como su remoción con maquinaria o tronaduras.	100
		Se desarrollan actividades que afectan al glaciar de manera remota producto del levantamiento de polvo, como caminos vehiculares o tronaduras en la vecindad del glaciar.	50
		Actualmente no se desarrolla ninguna actividad antrópica en las cercanías de glaciar que lo puedan afectar.	0

#### 5.1.4.2.4 Evaluación cuantitativa del indicador “Peligrosidad Asociada”

La evaluación cuantitativa de la PA se separa en peligros in situ (peligros que solo se desarrollan en el glaciar o su vecindad inmediata) y peligros ex situ (peligros que tienen un alcance mayor y su área de afectación puede incluir zonas a kilómetros de distancia del glaciar).

La peligrosidad asociada a peligros in situ se calcula a partir de 3 parámetros:

- i. Grietas: a mayor número, tamaño y dificultad para sortear e identificar las grietas del glaciar, mayor valor.
- ii. Desprendimientos de material: frecuencia y distribución de desprendimientos de material como roca o hielo. A mayor frecuencia, mayor valor.
- iii. Avalanchas: a mayor probabilidad, mayor valor.

A su vez, la peligrosidad asociada a peligros ex situ se calcula a partir de 4 parámetros:

- i. Avalanchas de roca – hielo: tipo Huascarán. A mayor probabilidad, mayor valor.
- ii. Surges: a mayor probabilidad, mayor valor.
- iii. GLOF's: a mayor probabilidad, mayor valor.
- iv. Lahares: a mayor probabilidad, mayor valor.

**Tabla 11:** Parámetros, ponderaciones, criterios y puntajes para calcular la PA.

<b>Peligrosidad Asociada</b>			
<b>Categoría</b>	<b>Parámetro</b>	<b>Criterio</b>	<b>Pje</b>
<b>Peligros in situ</b> 43%	Grietas 30%	Existen numerosas grietas, profundas y anchas, que son difícilmente identificables o sorteables.	100
		Existen unas pocas grietas, profundas y anchas, que son difícilmente identificables o sorteables.	75
		El glaciar posee grietas lo suficientemente profundas y anchas como para suponer riesgo para la progresión, pero que en su mayoría son identificables y sorteables.	50
		El glaciar posee grietas que pueden suponer algún riesgo menor para la progresión y que son fácilmente identificables y sorteables.	25
		El glaciar solo posee grietas menores que no suponen mayor riesgo para la progresión.	0
	Desprendimientos de material 35%	Existen frecuentes desprendimientos de material en gran parte del glaciar, durante cualquier momento del día y estación del año.	100
		Existen frecuentes desprendimientos de material, pero que solo se dan en algunas zonas del glaciar, o bien, que están acotados a momentos específicos del día o estación del año.	75
		Existen frecuentes desprendimientos de material, pero que solo se dan en algunas zonas del glaciar y que, además, están acotados a momentos específicos del día o estación del año.	50
		Los desprendimientos de material son poco frecuentes, se dan solo en algunas zonas del glaciar y están acotados a momentos específicos del día o estación del año.	25
		La pendiente del glaciar y laderas que lo rodean son tan bajas que es poco probable que se produzcan desprendimientos de material.	0
	Avalanchas 35%	El glaciar y las laderas que lo rodean, poseen pendientes superiores a 30° donde se registran consistentemente avalanchas a lo largo del año y en múltiples sectores.	100
		El glaciar y las laderas que lo rodean, poseen pendientes superiores a 30°, pero se registran avalanchas sólo en determinadas épocas del año o sectores.	75
		El glaciar, o bien las laderas que lo rodean, poseen una pendiente de 20 a 30°.	50
		El glaciar, o bien las laderas que lo rodean, poseen una pendiente de 10 a 20°.	25
		El glaciar, o bien las laderas que lo rodean, poseen una pendiente inferior a 10°.	0



<b>Peligros ex situ</b> 57%	Avalanchas de roca-hielo 26%	El glaciar o sector donde se emplaza cumple con los cinco atributos siguientes: - Se ubica sobre o esta flanqueado por grandes laderas empinadas e inestables (e.g. litología muy alterada, fracturada o con planos de buzamiento que favorecen su desprendimiento). - Es un sector donde pueden darse fuertes precipitaciones (en estado líquido), o bien, anomalías térmicas importantes que favorezcan eventos de fuerte ablación glacial tal que exista abundante disponibilidad de agua en estado líquido que pueda contribuir a un alza de la presión de poros de sedimentos subyacentes y/o a la lubricación del lecho glacial. - Tiene una morfología o rasgos que lo hacen susceptible a desprendimientos de hielo (i.e. glaciar colgante, elevadas pendientes o abundantes seracs). - Se ubica en una zona sísmicamente activa. - Producto del retroceso glacial, es altamente probable que las laderas hayan perdido confinamiento lateral.	100
		Cumple con cuatro de los cinco atributos mencionados previamente.	75
		Cumple con tres de los cinco atributos mencionados previamente.	50
		Cumple con dos de los cinco atributos mencionados previamente.	25
		Cumple con uno o ninguno de los cinco atributos mencionados previamente.	0
	Surges 21%	El glaciar ha sufrido eventos de tipo surge posteriores a la Pequeña Edad de Hielo (LIA por sus siglas en inglés).	100
		El glaciar ha sufrido eventos de tipo surge durante o previos a la LIA, pero no después.	50
		No se han registrado eventos de tipo surge.	0
	GLOF's 28%	Hay lagos con superficies superiores a 0,01 km <sup>2</sup> embalsados por hielo y el glaciar termina en un lago embalsado por una morrena frontal con antecedentes históricos de vaciamientos repentinos.	100
		Hay lagos con superficies superiores a 0,01 km <sup>2</sup> embalsados por hielo o el glaciar termina en un lago embalsado por una morrena frontal con antecedentes históricos de vaciamientos repentinos.	75
		Hay lagos con superficies superiores a 0,01 km <sup>2</sup> embalsados por hielo o el glaciar termina en un lago embalsado por una morrena frontal sin antecedentes históricos de vaciamientos repentinos.	50
		El glaciar está a menos de 500 m de lagos con superficies superiores a 0,01 km <sup>2</sup> embalsados por morrenas consideradas estables (con vegetación y sin antecedentes de vaciamientos previos).	25
		No hay lagos superiores a 0,01 km <sup>2</sup> asociados al glaciar (ni embalsado por el hielo ni por una morrena frontal).	0
	Lahares 25%	El glaciar se ubica sobre o en las cercanías de una zona volcánica donde, además, se cumple con los cuatro atributos siguientes: - Hay abundante disponibilidad de sedimentos no consolidados. - Se han registrado erupciones en el último siglo. - Se tienen pendientes mayores a 25°. - Se han registrado lahares previamente.	100
		El glaciar se ubica sobre o en las cercanías de una zona volcánica donde, además, se cumple con tres de los cuatro atributos mencionados previamente.	75
		El glaciar se ubica sobre o en las cercanías de una zona volcánica donde, además, se cumple con dos de los cuatro atributos mencionados previamente.	50
		El glaciar se ubica sobre o en las cercanías de una zona volcánica donde, además, se cumple con uno de los cuatro atributos mencionados previamente.	25
		El glaciar no se ubica sobre o en las cercanías de una zona volcánica.	0

Una vez se han calculado los valores para cada indicador, para simplificar el análisis de los resultados, estos pueden ser categorizados en 5 categorías: Muy Bajo (0 – 20), Bajo (20 – 40), Medio (40 – 60), Alto (60 – 80) y Muy Alto (80 – 100).

## **5.2 Resultados del O.E.2: Levantar la línea base glaciológica en el territorio del proyecto Geoparque Pillanmapu, ubicado en la cordillera de los Andes de la región del Maule**

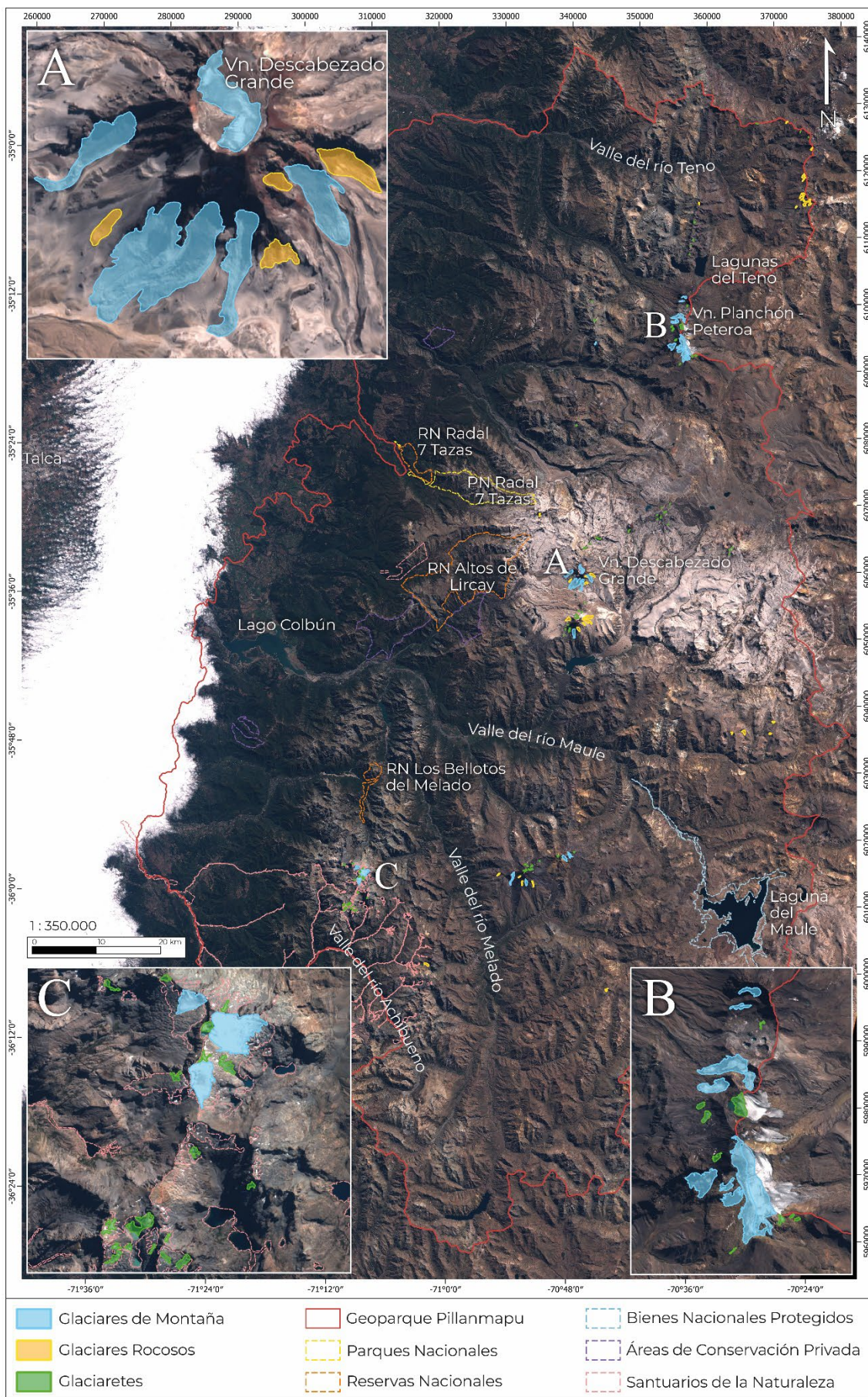
La línea base glaciológica del territorio del proyecto Geoparque Pillanmapu se levantó a partir de dos fuentes: a) la realización de un inventario propio según los métodos descritos en el apartado 4.2, y b) la consulta a inventarios realizados por otros investigadores o instituciones.

### **5.2.1 Inventario propio**

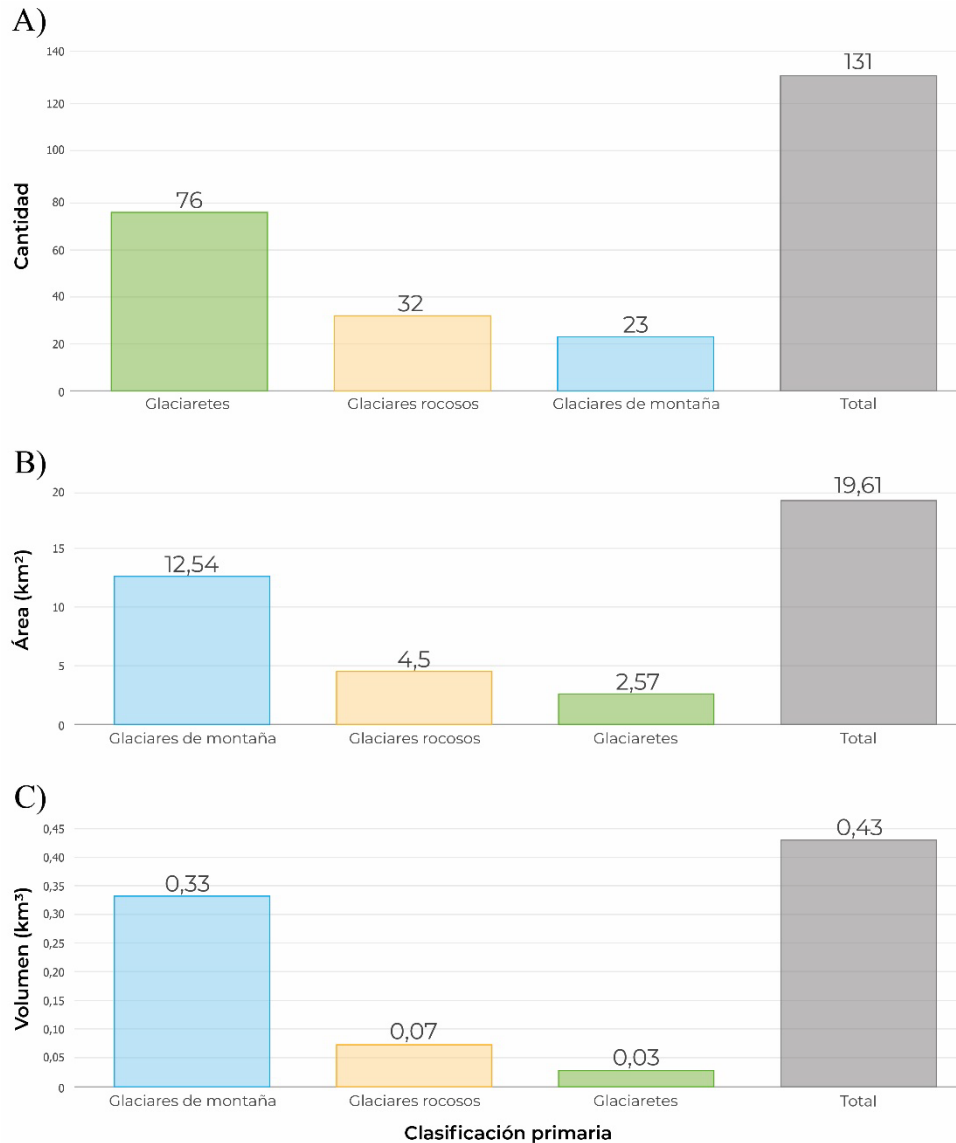
Se realizó un catastro georreferenciado de los glaciares existentes dentro de los límites del proyecto Geoparque Pillanmapu (Figura 42). Cada polígono cuenta con la información detallada en la Tabla 4. A raíz de los resultados de la primera encuesta mencionados en el apartado 5.1.1, el área mínima considerada para cada glaciar fue de 1 hectárea.

Del inventario realizado se desprende que el territorio del Geoparque Pillanmapu cuenta con 131 glaciares, de los cuales 76 corresponden a glaciaretos, 32 a glaciares rocosos y 23 a glaciares de montaña. Estos suman una superficie total de 19,61 km<sup>2</sup>, que se dividen en 2,57 km<sup>2</sup>, 4,5 km<sup>2</sup> y 12,54 km<sup>2</sup> respectivamente (Figura 43). Los glaciares de montaña suman 0,33 km<sup>3</sup> de volumen de hielo, los glaciares rocosos 0,07 km<sup>3</sup> y los glaciaretos 0,03 km<sup>3</sup>, teniéndose un total de 0,43 km<sup>3</sup>. Esto equivale a 0,37 km<sup>3</sup> de agua o a 3,7x10<sup>11</sup> L. Adicionalmente, se encontró un espesor promedio de 21,33 m en glaciares de montaña, 13,34 m en glaciares de roca y 7,88 m en glaciaretos.

De los 131 glaciares, 20 glaciaretos y 3 glaciares de montaña se encuentran bajo protección al estar dentro del polígono del Santuario de la Naturaleza “Cajón del Río Achibueno” (Figura 42, recuadro C). Estos 23 glaciares suman una superficie total de 2,34 km<sup>2</sup>, lo que representa un 11,93% de la superficie englaciada total.



**Figura 42:** Inventario de glaciares (polígonos rellenos) en el territorio del proyecto Geoparque Pillanmapu y áreas de conservación (líneas discontinuas). Se encontró un total de 131 glaciares, los que suman un área englaciada total de 19,61 km<sup>2</sup>. Al ubicarse dentro del polígono del Santuario de la Naturaleza “Cajón del Río Achibueno”, 23 de los 131 glaciares están protegidos (recuadro C), lo que representa un 11,93% de la superficie total englaciada. Página anterior.



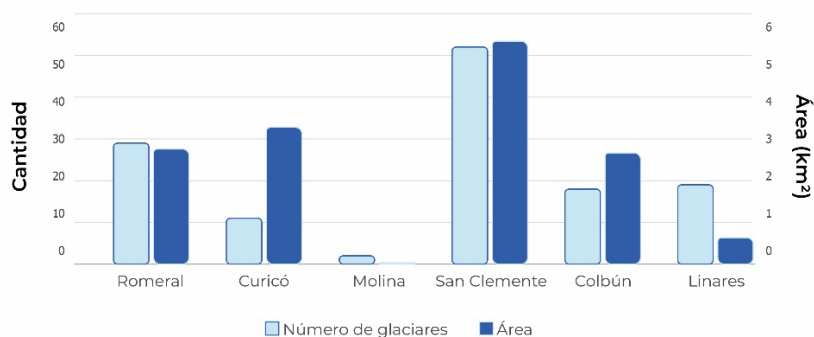
**Figura 43:** A) Cantidad de glaciares según su clasificación primaria. B) Superficie glacial según su clasificación primaria. C) Volumen según su clasificación primaria.

Los glaciares rocosos de la zona de estudio son los que alcanzan menores alturas, con una altura promedio de 2.944 msnm, mientras que los de montaña son los más altos, con una altura promedio de 3.099 msnm. Los glaciaretos son los más acotados en su rango altitudinal, abarcando apenas 115 m entre su altura mínima y máxima promedio, comparados con los 433 m y los 327 m de rango que poseen los glaciares de montaña y rocosos respectivamente (Tabla 12).

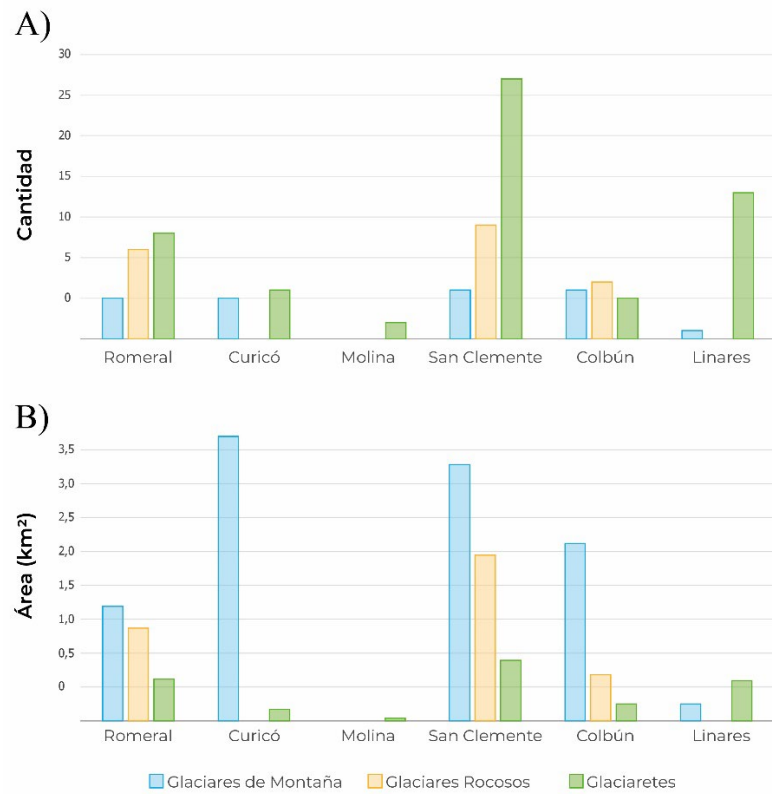
**Tabla 12:** Espesor promedio, alturas mínimas, máximas y promedio según los distintos tipos de glaciares separados por su clasificación primaria.

Clasificación primaria	Espesor promedio (m)	Altura mínima (msnm)	Altura máxima (msnm)	Altura mínima promedio (msnm)	Altura máxima promedio (msnm)	Altura promedio (msnm)
Glaciares de montaña	21,3	2.202	3.901	2.888	3.321	3.099
Glaciares rocosos	13,3	1.495	3.614	2.783	3.110	2.944
Glaciaretos	7,9	2.265	3.754	2.973	3.088	3.032

Respecto a la distribución por comuna (Figura 44), San Clemente destaca como la comuna con mayor número de glaciares, con 6 glaciares de montaña, 14 glaciares rocosos y 32 glaciaretos, sumando un total de 52 glaciares y una superficie englaciada de 7,12 km<sup>2</sup> (Figura 45). Por otro lado, Molina es la comuna con menor número de glaciares, apenas dos glaciaretos que abarcan una superficie de 0,04 km<sup>2</sup>. Destaca el caso de Curicó, que es la segunda comuna con menos glaciares, siendo superada solo por Molina, pero que, a la vez, es la segunda comuna con mayor superficie englaciada, siendo superada solo por San Clemente. Esto se debe a la presencia de los glaciares de montaña CL107102001A, CL107111009A, CL107111009B, CL107111010 y CL107111011, todos ellos de gran tamaño y ubicados en la ladera sur-suroeste del volcán Azufre, en el CVPPA.

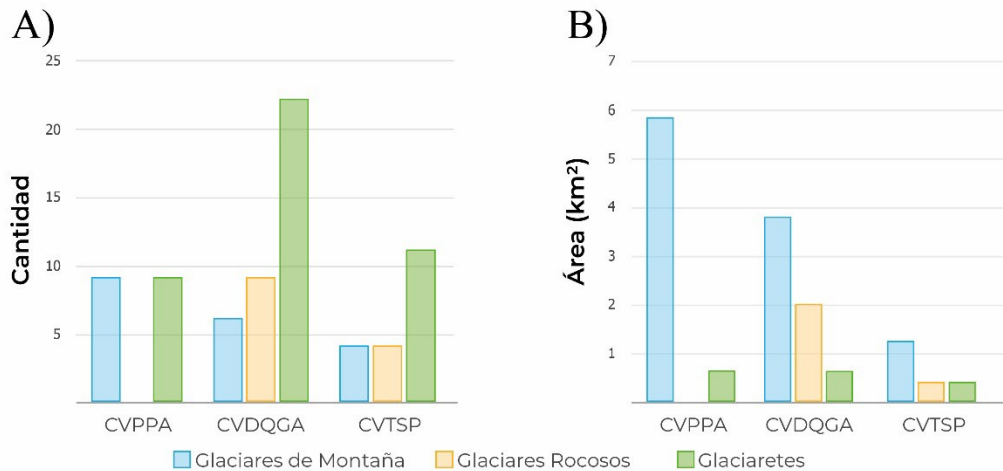


**Figura 44:** Número de glaciares y superficie englaciada total por comuna.



**Figura 45:** A) Número de glaciares en cada comuna separados por su clasificación primaria. B) Superficie englacada en cada comuna separada por su clasificación primaria.

De los 131 glaciares, un total de 74 glaciares, integrados por 19 glaciares de montaña, 42 glaciaretos y 13 glaciares rocosos se encuentran dentro de alguno de los complejos volcánicos presentes en la zona de estudio (Figura 46). Esto suma una superficie total de 14,82 km<sup>2</sup>, lo que representa el 75,6% de la superficie total englacada.

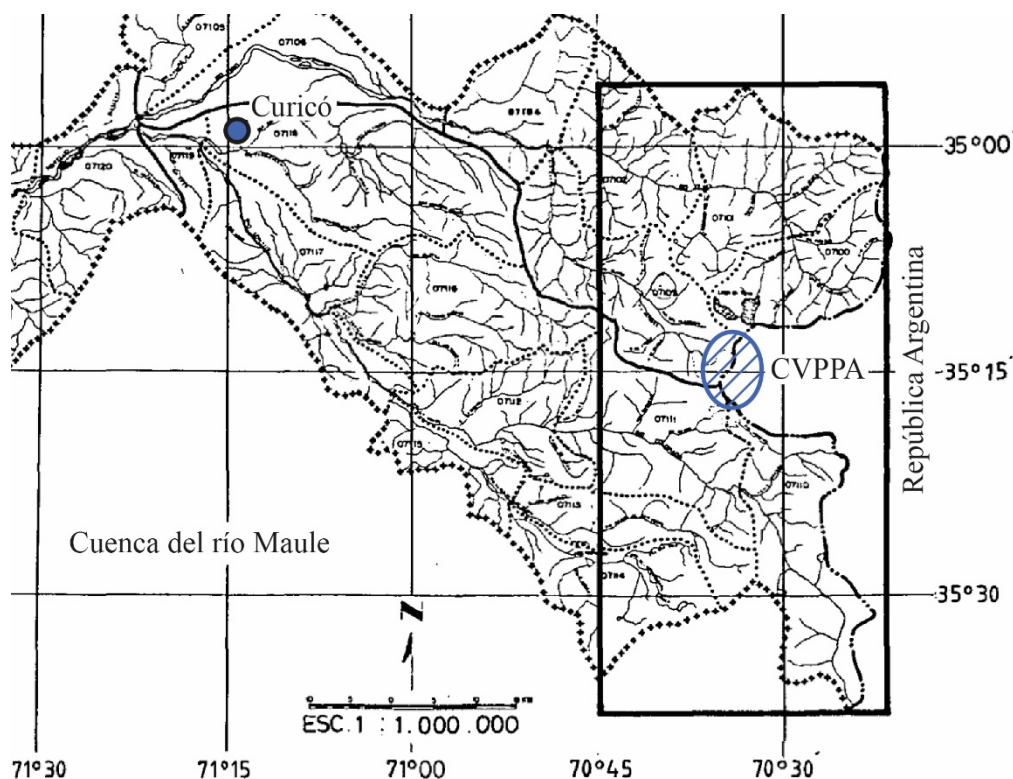


**Figura 46:** A) Número de glaciares en cada complejo volcánico separados por su clasificación primaria. B) Superficie englacada en cada complejo volcánico separada por su clasificación primaria.

## 5.2.2 Otros inventarios o trabajos

### 5.2.2.1 Inventario de la cuenca del Mataquito (Noveroy, 1987)

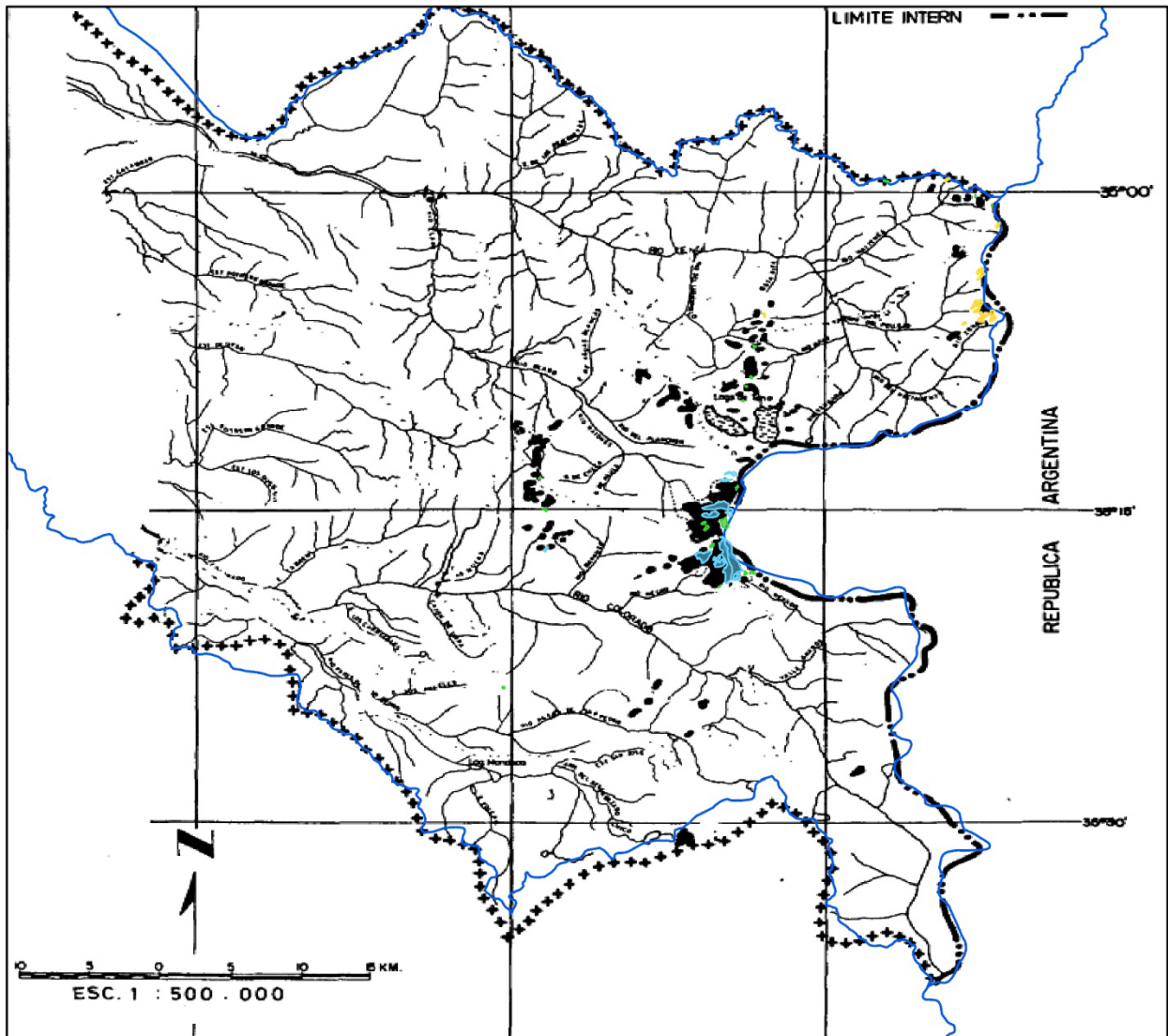
Este es el primer inventario de glaciares realizado en la cordillera maulina. Comprende exclusivamente la cuenca del río Mataquito, en particular su parte alta, que es donde se ubica la totalidad de los glaciares (Figura 47). Si bien la publicación data del 1987, las fotografías aéreas con las cuales se inventariaron los glaciares son las del vuelo vertical HYCON, tomadas en diciembre de 1954, enero de 1955 y febrero de 1956.



**Figura 47:** Zona de estudio (recuadro negro) para el inventariado de los glaciares de la cuenca del Mataquito (polígono delimitado por cruces). Modificado de Noveroy (1987).

El autor encontró un total de 81 glaciares (Figura 48), que suman 31,91 km<sup>2</sup> de superficie englaciada y 2,29 km<sup>3</sup> de volumen de hielo, equivalente a 1,83 km<sup>3</sup> de agua. De estos 81 glaciares, 18 corresponden a casquetes de hielo, 15 a glaciares de montaña y 48 a glaciaretos. La altura máxima y mínima promedio encontrada fue de 2.950 m y 2.700 m respectivamente, mientras que la altura media promedio es de 2.820 m.

Cabe destacar que para el estudio se omitieron glaciares de roca y solo se consideraron glaciares con superficies superiores a 0,01 km<sup>2</sup>. Además, se entiende por casquete de hielo a “una masa de hielo con forma de domo y flujo radial divergente”, es decir, el equivalente a lo que en este trabajo ha sido definido como un glaciar en calota.



**Figura 48:** Glaciares identificados por Noveroy (1987) (polígonos rellenos negros) y glaciares identificados en el presente trabajo (polígonos rellenos azules, amarillos y verdes correspondientes a glaciares de montaña, rocosos y glaciaretos respectivamente) de la cuenca del río Mataquito. El polígono delimitado por cruces marca el límite de la cuenca del río Mataquito según Noveroy (1987), mientras que el polígono azul marca el límite de la cuenca actual según la DGA. Modificado de Noveroy (1987).

En comparación, el inventario desarrollado en el presente trabajo indica la existencia de 42 glaciares en la cuenca del río Mataquito, de los cuales 10 corresponden a glaciares de montaña, 11 a glaciares rocosos y 20 a glaciaretos. Estos poseen una superficie de 5,89 km<sup>2</sup>, 1,37 km<sup>2</sup> y 0,81 km<sup>2</sup> respectivamente, sumando un total de 8,08 km<sup>2</sup> y un volumen total de 0,20 km<sup>3</sup>. Es decir, la cuenca del Mataquito habría perdido un 74,7% de la superficie total englaciada y un 91,3% del volumen total desde la captura de las fotografías HYCON hasta la actualidad. A su vez, las alturas máxima, media y mínima promedio son de 3.339 m, 3.113 m y 2.830 m respectivamente. Así, la altura máxima promedio aumentó 389 m, la altura media promedio aumentó 293 m y la altura mínima promedio aumentó 130 m. El aumento de la altura máxima promedio carece de sentido y probablemente se debe a la utilización de cartas topográficas antiguas para la estimación de alturas realizada por Noveroy (1987). De manera similar, cabe destacar que el límite de la cuenca del Mataquito utilizada por Noveroy (1987) difiere



ligeramente de la utilizada en el presente trabajo y, por lo mismo, existe un grupo de glaciares en el extremo sur de la cuenca que fueron omitidos en la comparación.

### 5.2.2.2 Osorio (2013)

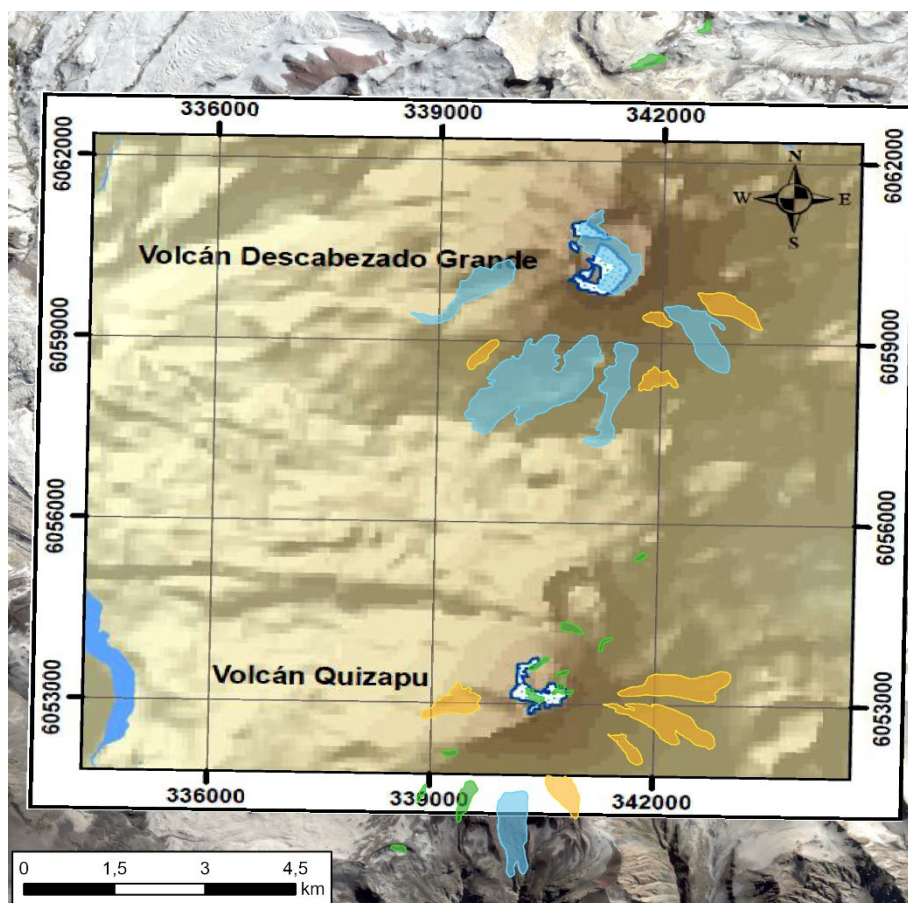
Este trabajo se centró exclusivamente en las zonas que concentran la mayor cantidad de glaciares de la cordillera maulina, omitiendo el resto. Así, se inventariaron glaciares de 5 zonas: i) CVPPA, ii) CVDGQA, iii) CVTSP, iv) Cerro Toro, y v) Volcán Nevado de Longaví. Este último sector queda fuera de los límites del proyecto Geoparque Pillanmapu y, por lo tanto, fue omitido en el análisis que se presenta a continuación. Además, en el sector del CVDGQA sólo inventarió los glaciares del edificio volcánico del Descabezado Grande y del volcán Cerro Azul, omitiendo el resto del complejo volcánico.

El autor no especifica el número ni el tipo de glaciares identificados, pero sí la superficie total para cada sector. Así, encontró una superficie englaciada de 8,91 km<sup>2</sup> en el CVPPA, 0,42 km<sup>2</sup> en el volcán Descabezado Grande y 0,25 km<sup>2</sup> en el volcán Cerro Azul, sumando 0,67 km<sup>2</sup> en el CVDGQA, 3,36 km<sup>2</sup> en el CVTSP y 7,29 km<sup>2</sup> en el sector del Cerro Toro. La superficie glaciar total identificada por el autor suma 20,23 km<sup>2</sup>.

En comparación, en el inventario realizado en el presente trabajo se encontraron 6,45 km<sup>2</sup> de superficie englaciada en el CVPPA, 5,96 km<sup>2</sup> en el volcán Descabezado Grande y el volcán Cerro Azul, 1,99 km<sup>2</sup> en el CVTSP y 2,34 km<sup>2</sup> en el Cerro Toro, sumando una superficie englaciada total de 16,74 km<sup>2</sup> (Tabla 13). Esto supone una disminución de 3,49 km<sup>2</sup> la cual es, probablemente, una subestimación de la pérdida real, ya que el inventario de Osorio (2013) no consideró glaciares rocosos ni algunos glaciares de montaña que presentan extensa cobertura por detritos. Así, y tal como se aprecia en la Figura 49, este inventario omitió numerosos glaciares de la cordillera maulina, demostrando no ser exhaustivo.

**Tabla 13:** Superficies englaciadas por sector según Osorio (2013) y según el inventario realizado en el presente trabajo. La diferencia positiva observada en el sector del CVDGQA se debe a la omisión de numerosos glaciares rocosos y de montaña en el inventario de Osorio (2013).

Inventario	CVPPA	CVDGQA		CVTSP	Cerro Toro	Total
		Descabezado Grande	Cerro Azul			
Osorio (2013)	8,91 km <sup>2</sup>	0,42 km <sup>2</sup>	0,25 km <sup>2</sup>	3,36 km <sup>2</sup>	7,29 km <sup>2</sup>	20,23 km <sup>2</sup>
		0,67 km <sup>2</sup>				
Propio	6,45 km <sup>2</sup>	5,96 km <sup>2</sup>		1,99 km <sup>2</sup>	2,34 km <sup>2</sup>	16,74 km <sup>2</sup>
Diferencia	-2,46 km <sup>2</sup>	+5,29 km <sup>2</sup>		-1,37 km <sup>2</sup>	-4,95 km <sup>2</sup>	3,49 km <sup>2</sup>



**Figura 49:** Glaciares identificados por Osorio (2013) (polígonos de borde azul y relleno blanco) y glaciares identificados en el presente trabajo (polígonos rellenos azules, amarillos y verdes correspondientes a glaciares de montaña, rocosos y glaciaretos respectivamente) en el sector de los volcanes Descabezado Grande y Cerro Azul. Se puede apreciar que el inventario de Osorio (2013) omitió glaciares de la zona de estudio, no solo rocosos si no también glaciares de montaña cubiertos y glaciaretos. Imagen base: Sentinel 2 con fecha 13 de abril del 2021. Modificado de Osorio (2013).

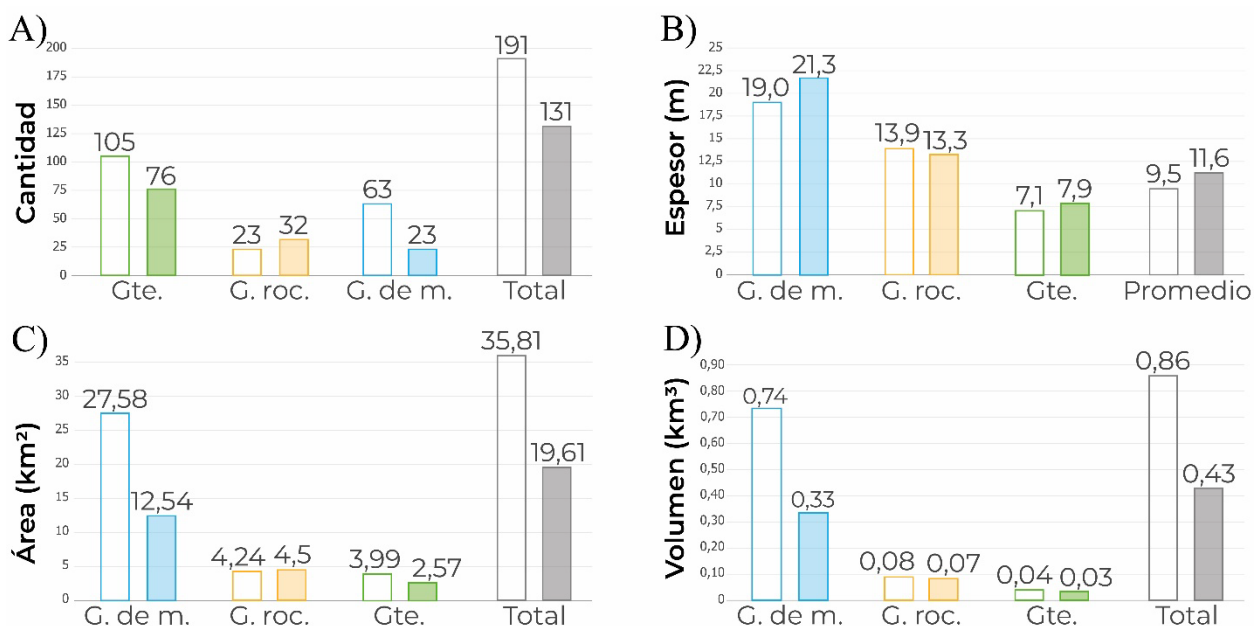
### 5.2.2.3 Inventario de glaciares de la Dirección General de Aguas 2014

Este inventario, a diferencia de su versión actualizada que se presenta más adelante, consideró exclusivamente cuerpos de hielo iguales o mayores a  $0,01 \text{ km}^2$ . Si bien el inventario tiene por fecha el 2014, la mayoría de las imágenes utilizadas para la delimitación de los polígonos datan del 2001 mientras que otras pocas datan del 2000, 2003, 2007, 2008 y 2009.

El inventario nacional de la Dirección General de Aguas del 2014 encontró un total de 191 glaciares dentro del territorio del proyecto Geoparque Pillanmapu, los cuales suman una superficie englaciada total de  $35,81 \text{ km}^2$ . De estos 191 glaciares, 63 corresponden a glaciares de montaña, 23 a glaciares rocosos y 105 a glaciaretos, los cuales poseen una superficie englaciada de  $27,58 \text{ km}^2$ ,  $4,24 \text{ km}^2$  y  $3,99 \text{ km}^2$  respectivamente. Los glaciares de montaña suman  $0,74 \text{ km}^3$  de volumen de hielo, los glaciares rocosos  $0,08 \text{ km}^3$  y los glaciaretos  $0,04 \text{ km}^3$ , teniéndose un volumen de hielo total de  $0,86 \text{ km}^3$ . Adicionalmente, se encontró un espesor promedio de 19,03 m en glaciares de montaña, 13,86 m en glaciares de roca y 8,47 m en glaciaretos.

En comparación, el inventario realizado en el presente trabajo cuenta con 131 glaciares, los cuales suman una superficie total de  $19,61 \text{ km}^2$  y un volumen total de  $0,43 \text{ km}^3$ . Así, entre el inventario de la DGA 2011 y el realizado en el presente trabajo se habrían perdido 45,2% de la

superficie total englaciada y  $0,43 \text{ km}^3$  o el 50,0% del volumen total de hielo. Esto se traduce en la pérdida de  $0,37 \text{ km}^3$  de agua.



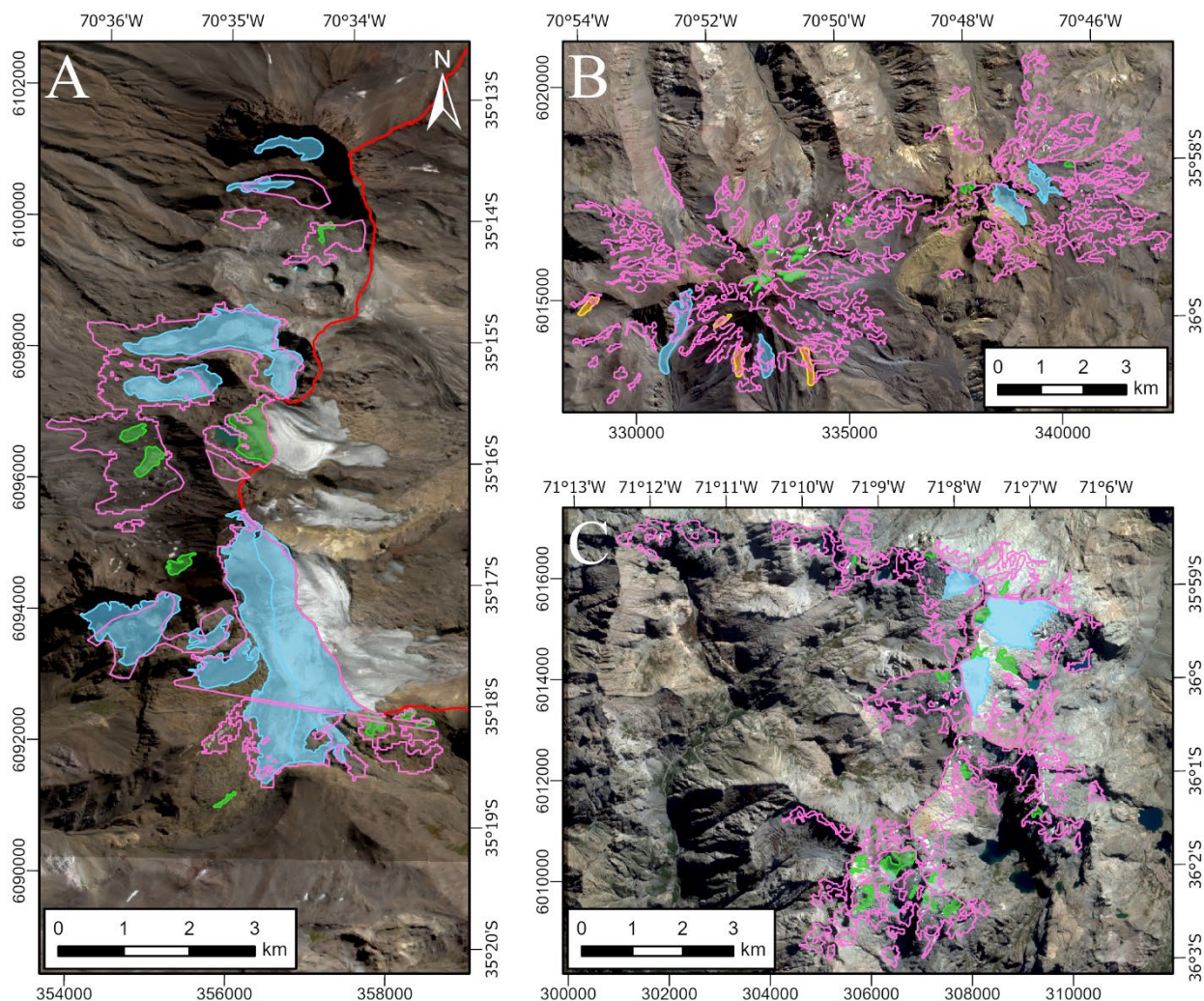
**Figura 50:** Diferencias entre el inventario de la DGA del 2014 (recuadros vacíos) y el propio (recuadros rellenos) separado por glaciares de montaña (G. de m.), glaciares rocosos (G. roc.) y glaciaretos (Gtes.). A) Cantidad de glaciares. B) Espesores promedio. C) Superficie glacial. D) Volumen.

#### 5.2.2.4 Randolph Glacier Inventory versión 6,0 (2017)

El Randolph Glacier Inventory (RGI) es una iniciativa internacional que nace a raíz de la sugerencia del Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC por sus siglas en inglés). Es un inventario global y, como tal, fue recortado al área del proyecto Geoparque Pillanmapu. Si bien su sexta versión fue publicada en 2017, la delimitación de los glaciares se realizó en base a imágenes satelitales que van desde el año 2000 hasta el 2003. No se consideraron cuerpos de hielo menores a  $0,01 \text{ km}^2$ .

Este inventario reconoce la existencia de 189 glaciares en el territorio del proyecto Geoparque Pillanmapu, los cuales abarcan una superficie total de  $54,51 \text{ km}^2$ . El inventario ocupa una clasificación simplificada de los distintos cuerpos de hielo. Así, clasificó la totalidad de estos como “glaciar o casquete de hielo”. Por otro lado, la altura máxima, media y mínima promedio es 2.888 m, 2.750 m y 2.622 m respectivamente.

Según esto y en comparación con el inventario realizado en el presente trabajo, donde se identificó una superficie total englaciada de  $19,61 \text{ km}^2$ , el territorio del proyecto Geoparque Pillanmapu ha perdido  $34,9 \text{ km}^2$  de superficie englaciada, equivalente una pérdida del ~64 %. Las mayores pérdidas se observan en los sectores del CVPPA, CVTSP y del Cerro Toro (Figura 51).

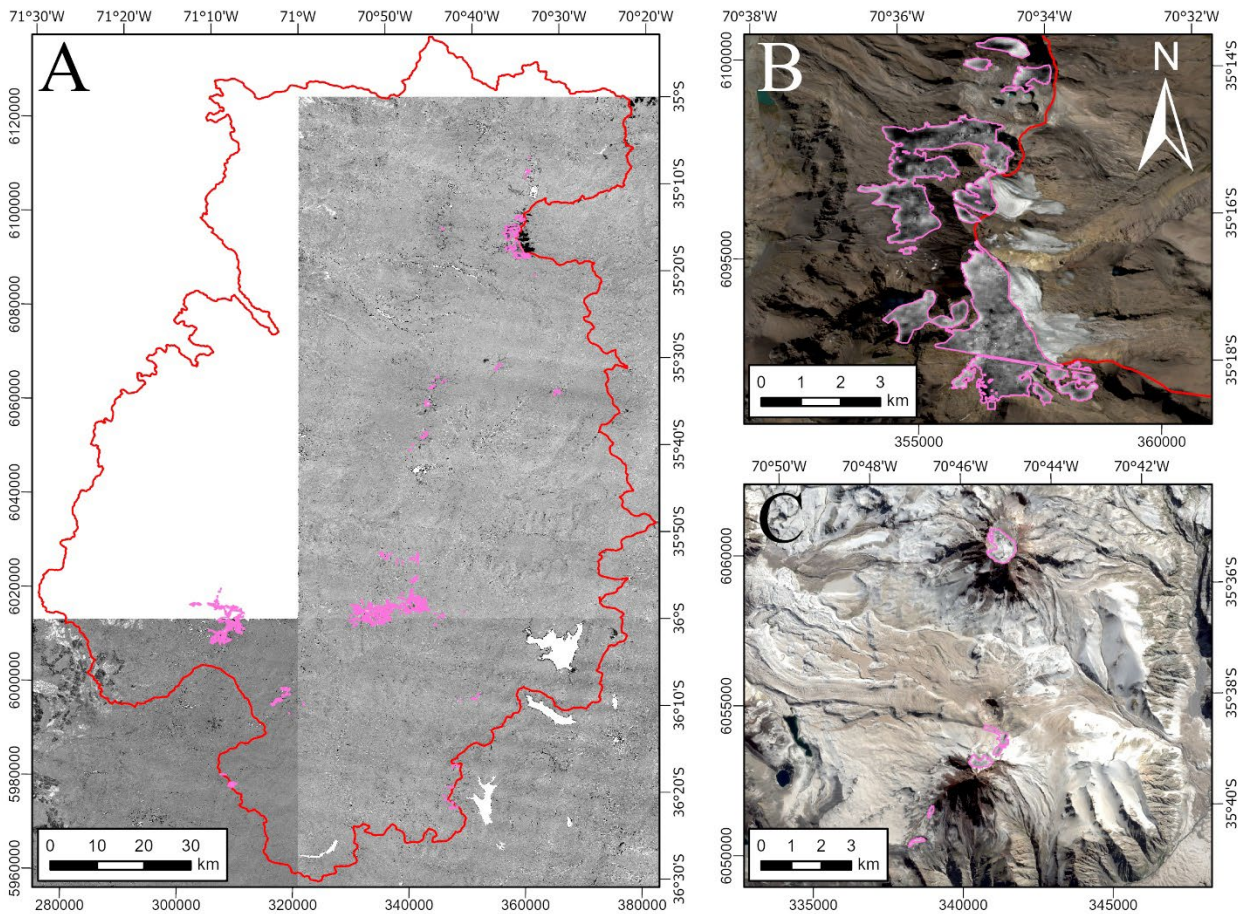


**Figura 51:** Glaciares identificados en el RGI (polígonos rosados) y glaciares identificados en el presente trabajo (polígonos rellenos azules, amarillos y verdes correspondientes a glaciares de montaña, rocosos y glaciaretos respectivamente). A) Sector del CVPPA. B) Sector del CVTSP. C) Sector del Cerro Toro. Se observa la considerable disminución de superficie englacada entre ambos inventarios. Imágenes base: Sentinel 2 con fecha 13 de abril 2021.

### 5.2.2.5 Dussailant et al. (2019)

Este trabajo presenta tasas de ablación para los glaciares de Sudamérica. Los datos vienen en archivos ráster cuadrados con dimensiones de  $1^\circ$  por  $1^\circ$ . Los autores omitieron aquellos ráster con superficies englacadas menores a  $10 \text{ km}^2$ , lo cual implicó que no se consideraran algunos glaciares del territorio del proyecto Geoparque Pillanmapu (Figura 52-A).

Para extraer los datos respectivos a la zona de estudio del presente trabajo, se recortaron dichos ráster con los polígonos del RGI 6.0 presentes dentro del territorio del proyecto Geoparque Pillanmapu (Figura 52-B). Así, se obtuvo una tasa de ablación máxima y promedio de  $3,1 \text{ m w.e.}$  y  $-0,6 \text{ m w.e.}$  anuales respectivamente. Cabe destacar que algunos de los glaciares de la zona de estudio no fueron considerados en el trabajo de Dussailant et al. (2019).



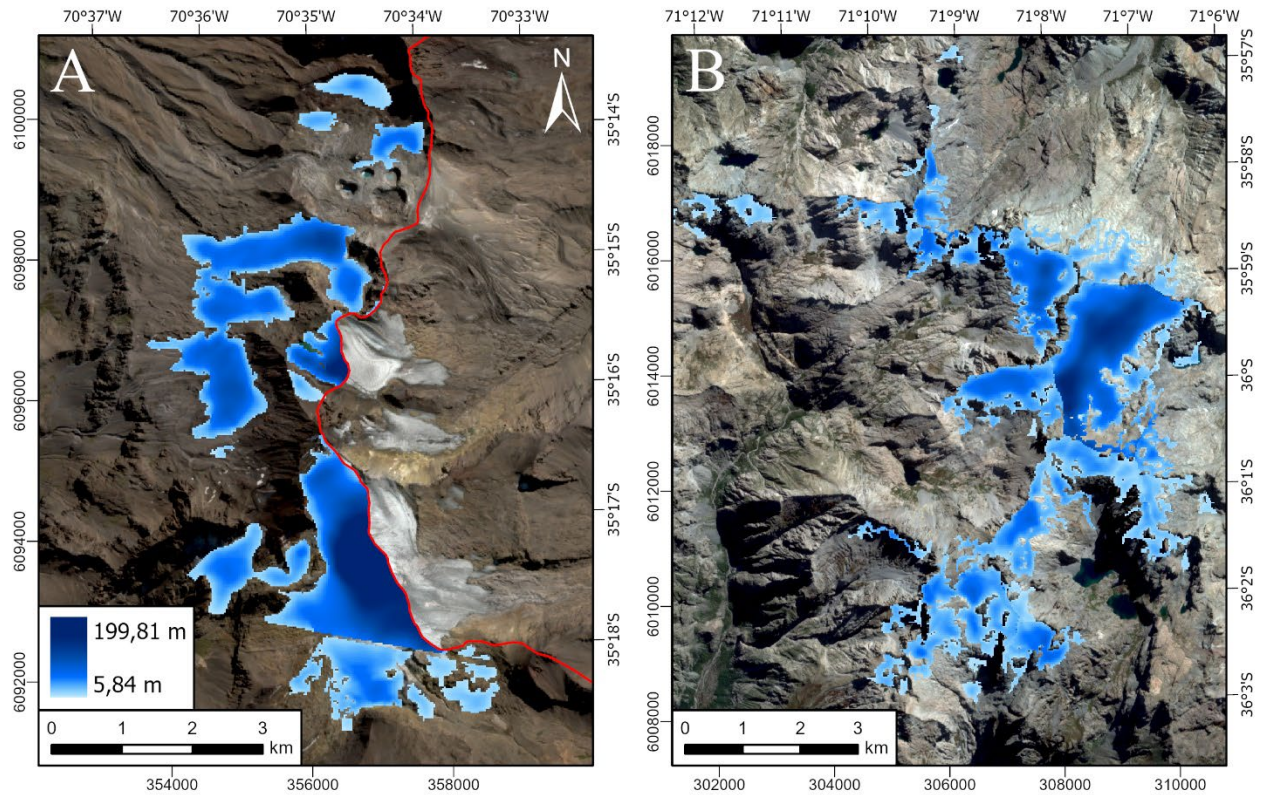
**Figura 52:** Archivos tipo ráster extraídos de Dussaillant et al. (2019). A) Datos sin recortar. Se observa que los datos no cubren la totalidad de la zona de estudio. Los acercamientos a la zona del CVPPA y del CVDGQA, recuadros B y C respectivamente, muestran los archivos tipo ráster recortados a la extensión de los glaciares según el RGI (polígonos rosados). La línea roja marca el límite del territorio del proyecto Geoparque Pillanmapu. Imágenes base: Sentinel 2 con fecha 13 de abril 2021.

### 5.2.2.6 Braun et al. (2019)

Braun et al. (2019) calcularon balances de masa para los glaciares de Sudamérica. Los polígonos fueron extraídos del RGI y, por lo tanto, el número de glaciares y superficie englaciada total es similar que la encontrada en dicho inventario, salvo por la omisión de algunos cuerpos de hielo menores. El cálculo de balance de masa fue aplicado entre los años 2000 y 2011/2015. Para dichos fines, los autores utilizaron InSAR. Así, dentro del territorio del proyecto Geoparque Pillanmapu se tiene una ablación promedio de  $-0,3$  m w.e. anuales en el periodo mencionado.

### 5.2.2.7 Farinotti et al. (2019)

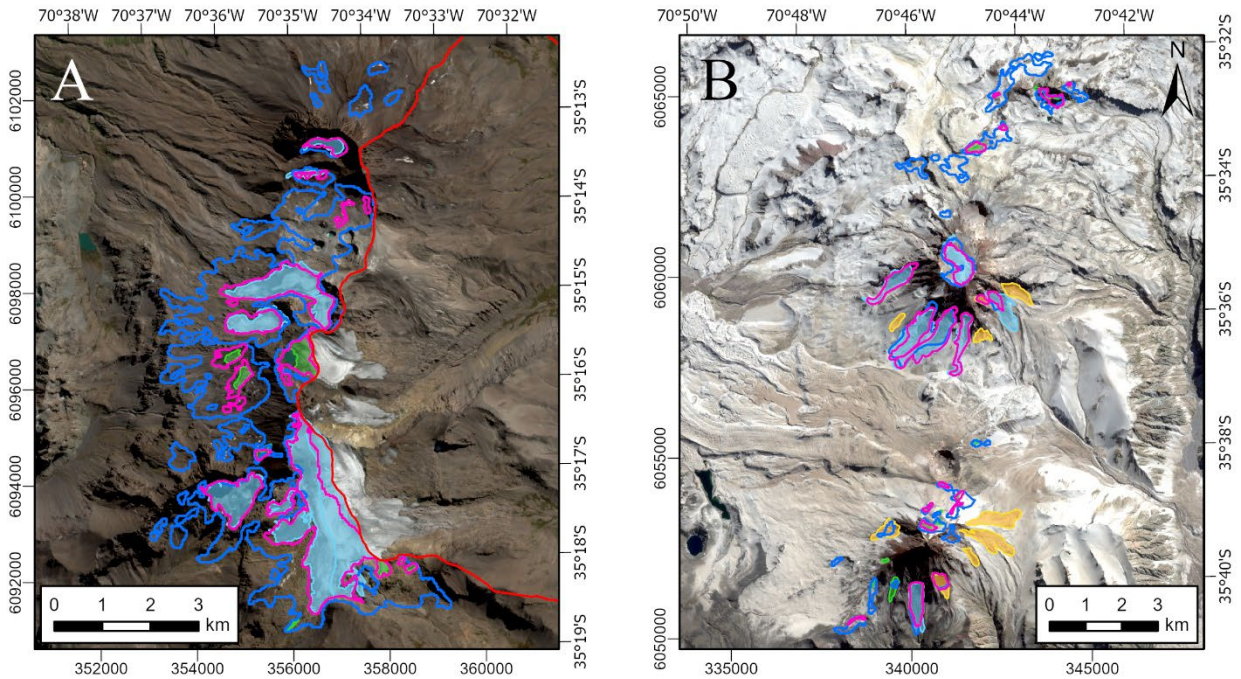
Este trabajo presenta los espesores de todos los glaciares del mundo según el RGI para el año 2000. Para efectos del presente trabajo, se consideraron exclusivamente los espesores dentro del territorio del proyecto Geoparque Pillanmapu. Dentro de este, los autores calcularon espesores para un total de 181 glaciares. No hay una distinción entre distintos tipos de glaciares. Se encontró un espesor máximo de 199,8 m, un espesor mínimo de 5,8 m y un espesor promedio de 37,0 m. Los mayores espesores se concentran en los glaciares del CVPPA y del sector del Cerro Toro (Figura 53).



**Figura 53:** Espesores glaciares según Farinotti et al. (2019). A) Sector del CVPPA. B) Sector del Cerro Toro. Imagen base: Sentinel 2 con fecha 13 de abril 2021.

### 5.2.2.8 Reinthaler et al. (2019)

Reinthaler et al. (2019) realizaron un análisis multitemporal de superficie para distintos glaciares emplazados en 59 complejos volcánicos o volcanes activos de Latinoamérica. Dentro del territorio del proyecto Geoparque Pillanmapu, estudiaron dos complejos volcánicos, el CVPPA y el CVDGQA. La publicación original consideró 3 fechas, 1986, 1999 y 2015 aproximadamente. No obstante, para el desarrollo de este trabajo solo se consiguieron los archivos vectoriales para las fechas 1986 y 2018 y, por lo tanto, el análisis presentado a continuación se centra exclusivamente en esas dos fechas (Figura 54).



**Figura 54:** Glaciares identificados en el inventario de Reinthaler et al. (2019) para los años 1986 (polígonos azules) y 2018 (polígonos rosados) y glaciares identificados en el presente trabajo (polígonos rellenos azules, amarillos y verdes correspondientes a glaciares de montaña, rocosos y glaciaretos respectivamente). A) Sector del CVPPA. B) Sector del CVDGQA. Imágenes base: Sentinel 2 con fecha 13 de abril 2021.

Los autores encontraron un total de 22 y 24 glaciares en el CVPPA para los periodos 1986 y 2018 respectivamente. A su vez, la superficie total englaciada para los mismos periodos fue de 20,15 km<sup>2</sup> y 7,43 km<sup>2</sup>. Por otro lado, en el CVDGQA se encontró un total de 30 glaciares para el periodo 1986 y 19 en 2018, sumando una superficie englaciada de 6,74 km<sup>2</sup> y 3,78 km<sup>2</sup> respectivamente.

En comparación, en el inventario propio se encontraron 18 glaciares en el CVPPA que suman una superficie englaciada total de 6,52 km<sup>2</sup> mientras que en el CVDGQA se encontraron 29 glaciares que cubren un total de 6,09 km<sup>2</sup>. De este modo, el CVPPA ha perdido un 67,64% de la superficie englaciada total desde 1986 al 2021 y un 12,25% desde 2018 al 2021. Por su lado, el CVDGQA habría perdido 9,64% entre 1986 y 2021 y habría ganado un 37,93% entre 2018 y 2021. Sin embargo, las pequeñas pérdidas o, incluso, ganancias encontradas en el CVDGQA son debido a que, en la zona, hay numerosos glaciares rocosos, así como también glaciares de montaña con un gran porcentaje de su superficie cubierta que no fueron analizados por los autores (Figura 54-B).

**Tabla 14:** Cantidad de glaciares y superficies englaciadas por sector según Reinthaler et al. (2019) y según el inventario realizado en el presente trabajo. El aumento en la cantidad de glaciares se debe a la fragmentación de estos.

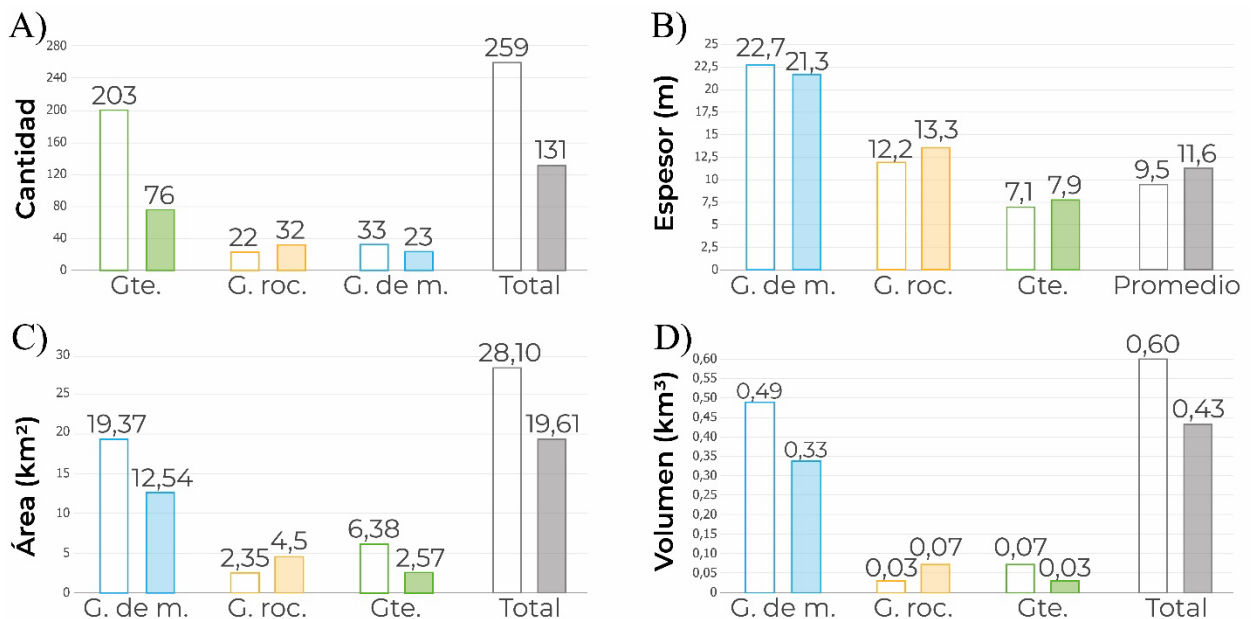
Inventario	CVPPA		CVDGQA		Total		
	Cantidad	Superficie	Cantidad	Superficie	Cantidad	Superficie	
Reinthaler et al. (2019)	1986	22	20,15 km <sup>2</sup>	30	6,74 km <sup>2</sup>	52	26,89 km <sup>2</sup>
	2018	24	7,43 km <sup>2</sup>	19	3,78 km <sup>2</sup>	43	11,21 km <sup>2</sup>
Propio		18	6,52 km <sup>2</sup>	29	6,09 km <sup>2</sup>	47	12,61 km <sup>2</sup>

### 5.2.2.9 Inventario de glaciares de la Dirección General de Aguas 2022

Si bien el inventario de la DGA fue publicado el 2022, la gran mayoría de los glaciares fueron digitalizados a partir de imágenes que datan del 2018 o del 2019, mientras que otras pocas datan del 2015, 2016 o 2020.

Según el inventario de la DGA 2022, el territorio del proyecto Geoparque Pillanmapu cuenta con 259 glaciares, de los cuales 33 corresponden a glaciares de montaña, 22 a glaciares rocosos y 203 a glaciaretos. Estos suman una superficie total de 28,10 km<sup>2</sup>, que se dividen en 19,37 km<sup>2</sup>, 2,35 km<sup>2</sup> y 6,38 km<sup>2</sup> respectivamente. Los glaciares de montaña tienen 0,49 km<sup>3</sup> de volumen de hielo, los glaciares rocosos 0,03 km<sup>3</sup> y los glaciaretos 0,07 km<sup>3</sup>, sumando un total de 0,60 km<sup>3</sup>. Esto equivale a 0,50 km<sup>3</sup> de agua o 5,0x10<sup>11</sup> L. Adicionalmente, este inventario indica un espesor promedio de 22,74 m para glaciares de montaña, 12,23 m para glaciares rocosos y 7,08 m para glaciaretos.

En comparación, el inventario realizado en el presente trabajo cuenta con 131 glaciares, los cuales suman una superficie total de 19,61 km<sup>2</sup> y un volumen un total de 0,43 km<sup>3</sup>. Así, entre el inventario de la DGA 2022 y el realizado en el presente trabajo se habrían perdido 8,49 km<sup>2</sup> o el 30,2% de la superficie total englaciada y 0,17 km<sup>3</sup> o el 28,3% del volumen total de hielo (Figura 55).



**Figura 55:** Diferencias entre el inventario de la DGA del 2022 (recuadros vacíos) y el propio (recuadros rellenos) separado por glaciares de montaña (G. de m.), glaciares rocosos (G. roc.) y glaciaretos (Gtes.). A) Cantidad de glaciares. B) Espesores promedio. C) Superficie glacial. D) Volumen.

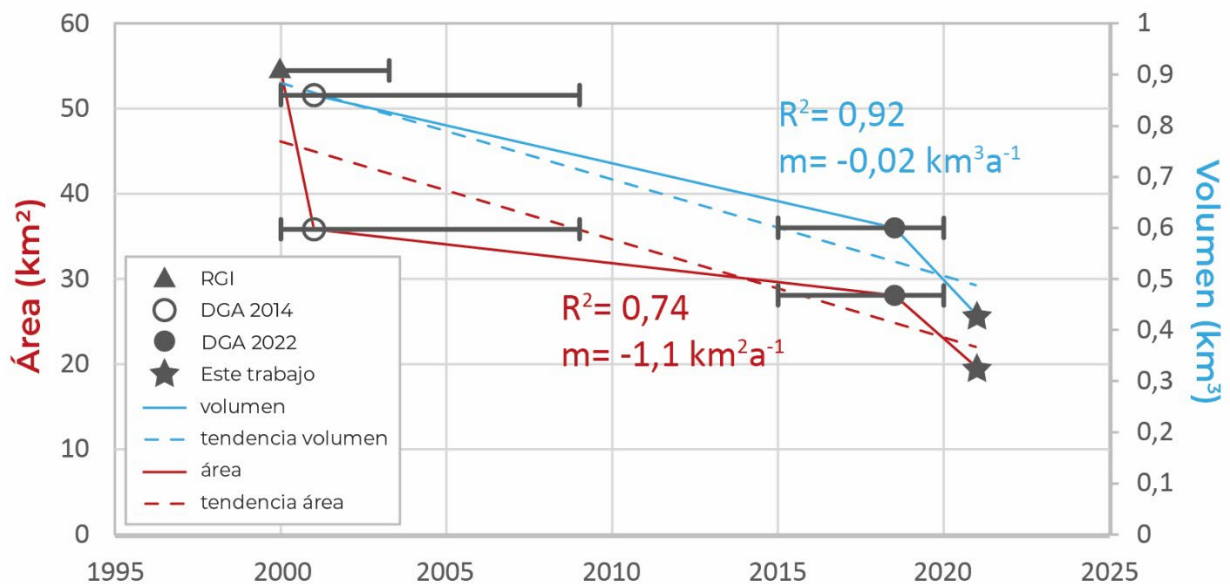
### 5.2.3 Síntesis de la línea base glaciológica y tendencias generales

En base al inventario realizado en el presente trabajo y a los trabajos e inventarios recién estudiados, se puede determinar que los glaciares del territorio del proyecto Geoparque Pillanmapu se ubican preferencialmente en los complejos volcánicos (CVPPA, CVDGQA y CVTSP) y en la localidad del Cerro Toro. Estos están representados exclusivamente por glaciares



de montaña, glaciaretos y glaciares rocosos. Los glaciares de montaña concentran la mayor parte de la superficie englaciada y del volumen de hielo.

Del mismo modo, se observa que los glaciares están retrocediendo de manera sostenida en el tiempo, al menos desde la década de 1950. A partir de algunos trabajos, como Dussaillant et al. (2019) y Braun et al. (2019), se obtienen tasas de ablación anuales de  $-0,57$  m w.e. y  $-0,33$  m w.e. respectivamente. Con miras a obtener las tendencias, se graficaron aquellos trabajos que cubriesen la totalidad de la zona de estudio, es decir, el inventario RGI, los inventarios de la DGA 2014 y 2022 y el inventario realizado en este trabajo (Figura 56). A partir de estos, se infiere una tasa de pérdida de superficie englaciada y de volumen de  $-1,1$  km<sup>2</sup> anuales y  $-0,02$  km<sup>3</sup> anuales respectivamente.



**Figura 56:** Variación de la superficie englaciada y volumen de hielo a partir de distintos inventarios. Las barras grises marcan el rango de fechas a partir de las cuales fueron construidos los inventarios. El elemento diferenciador (triángulo, círculos o estrellas) se ubica en la fecha que se repite con mayor frecuencia. Las líneas discontinuas corresponden a las tendencias lineales de las variaciones de área y volumen. Estas muestran una pendiente de  $-1,1$  km<sup>2</sup> anuales y  $-0,02$  km<sup>3</sup> anuales respectivamente.

### 5.3 Resultados del O.E.3: Aplicar la metodología en el territorio del proyecto Geoparque Pillanmapu

Los cuatro primeros puntos de la estructura metodológica (Figura 41), ya han sido abordados en capítulos o apartados anteriores. Por lo tanto, solo se detalla el procedimiento y resultados para los puntos 5 y 6, es decir, la Evaluación Cuantitativa y las Propuestas de Estrategias de Gestión respectivamente. Se muestran por separado los resultados para los glaciares VPPS y VPPN.

#### 5.3.1 Glaciar VPPS: cálculos y estimaciones de variables necesarias para la aplicación de la evaluación cuantitativa

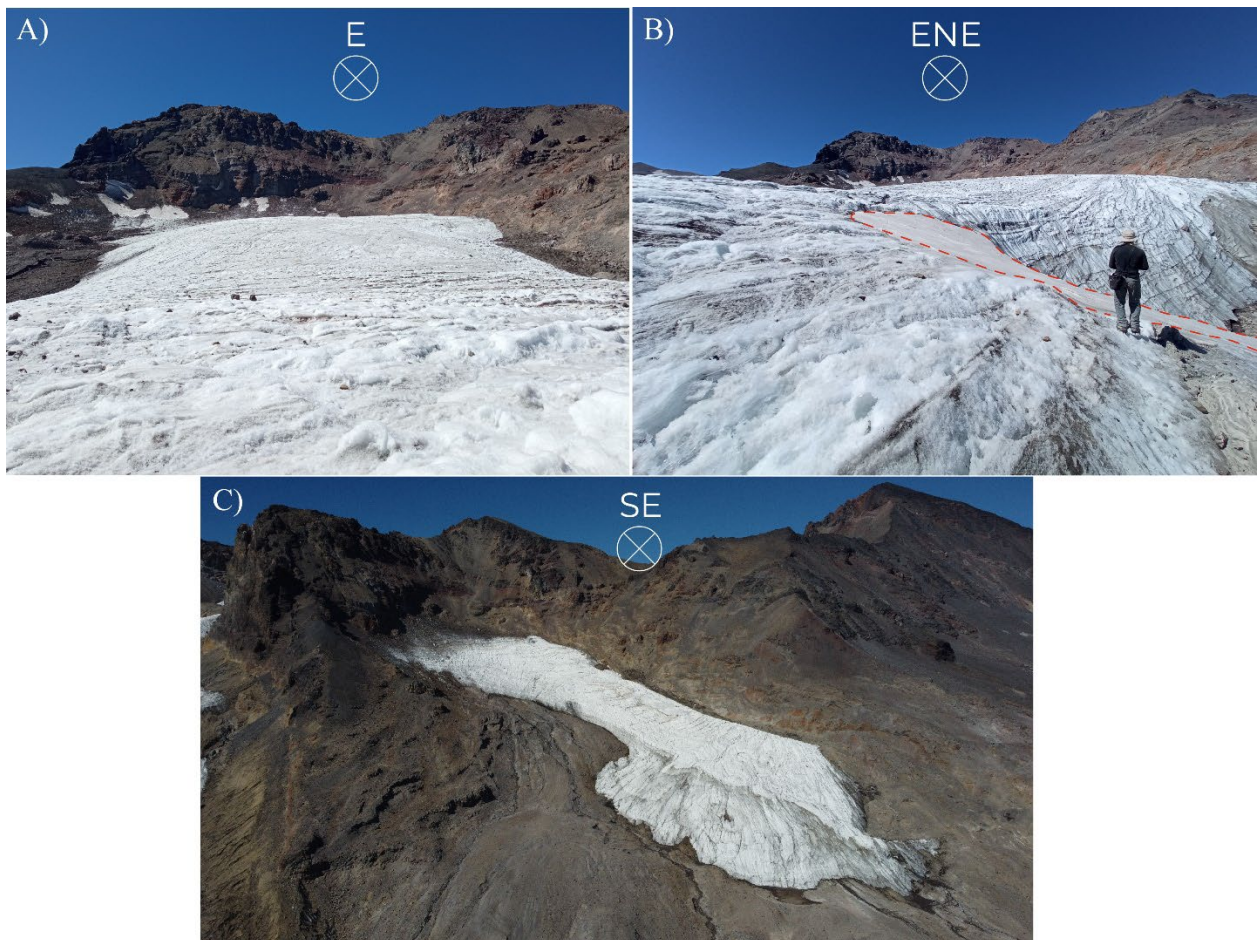
A continuación, se muestra la forma en que fueron calculadas algunas variables necesarias para la cuantificación de algunos parámetros. Sólo se detalla aquellas que requirieron de un análisis más acabado. La estimación de otros parámetros como “Contexto socioeconómico”, “Accesibilidad” o “Conocimiento científico”, no se encuentra detallada ya que no requieren de mayores

explicaciones. En la sección de anexos, es posible encontrar la explicación resumida de la elección del puntaje para todos los parámetros.

### 5.3.1.1 Variables para el cálculo del indicador “Riesgo de Degradación” del glaciar VPPS

#### 5.3.1.1.1 Parámetro “Hipsometría vs ELA”

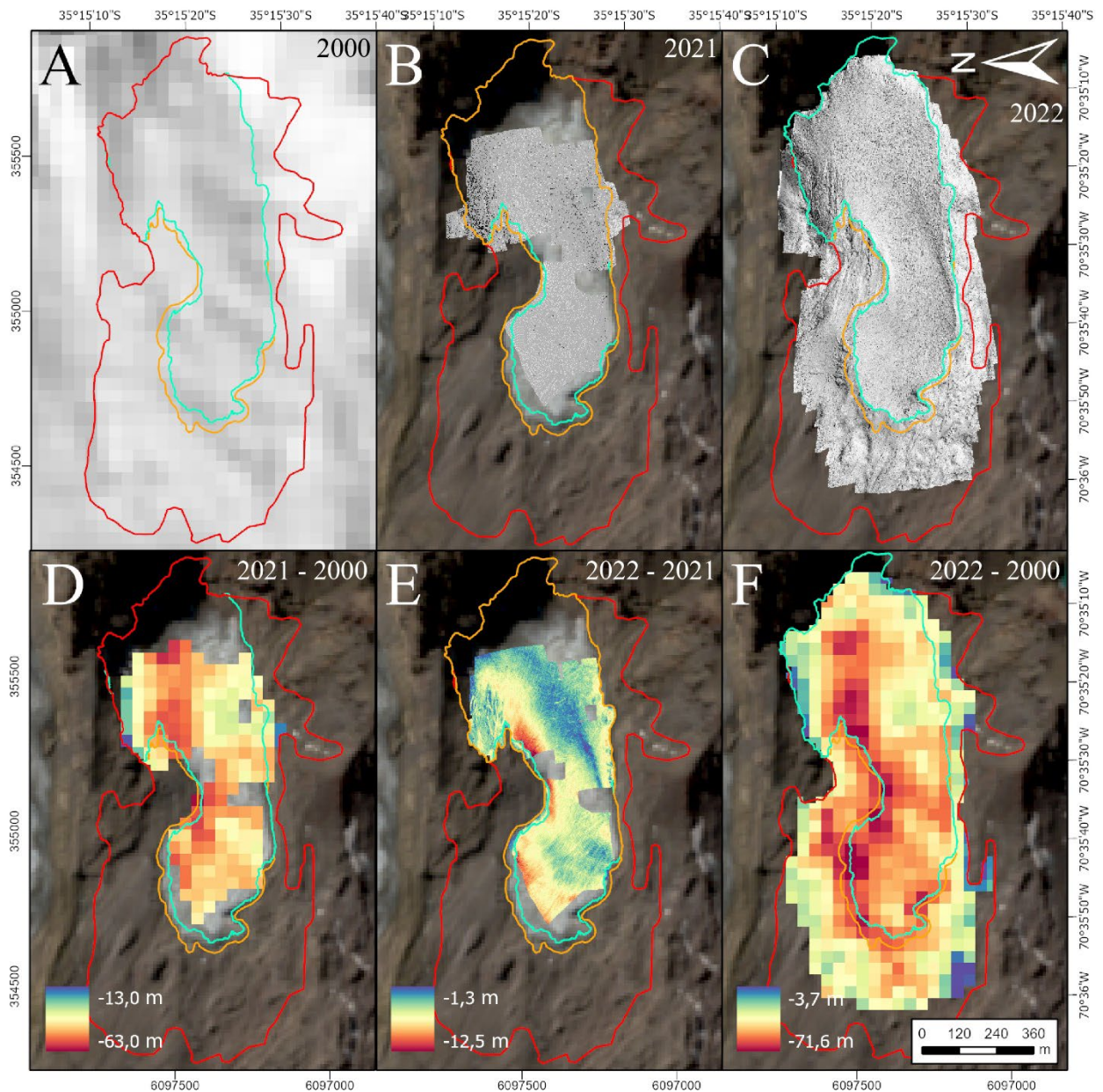
Basándose en las observaciones realizadas durante las campañas de campo de abril 2021 y abril 2022 y utilizando la altura de la línea de nieve como *proxy* de la ELA (ver apartado 3.1.1.2), se encontró que la ELA se ubica por encima del glaciar. En abril del 2021, casi la totalidad del glaciar estaba descubierto, salvo por la presencia de algunos sectores, pequeños y escasos, cubiertos de neviza (Figura 57). En abril del 2022, el glaciar estaba completamente descubierto. Por este motivo, se otorgó al parámetro “Hipsometría vs ELA”, la categoría más alta, i.e. 100 puntos.



**Figura 57:** A) Vista hacia la cabecera del glaciar VPPS en abril del 2021. Prácticamente la totalidad del glaciar estaba descubierto. B) Uno de los pocos y pequeños sectores cubiertos por neviza que se podían encontrar en la superficie del glaciar en el 2021 (línea discontinua roja). C) Vista aérea del glaciar VPPS en abril del 2022, ya completamente descubierto, sin la presencia de zonas con nieve o neviza. Fotografías de Felipe Ugalde.

### 5.3.1.1.2 Parámetro “Balance de masa”

Se utilizaron tres DEM, el SRTM del año 2000 transformado al geoido EGM08 (DEM<sub>2000</sub>) y los dos DEM generados mediante UAV en el 2021 y el 2022 (DEM<sub>2021</sub> y DEM<sub>2022</sub> respectivamente). Estos fueron restados unos con otros y posteriormente recortados a la extensión del glaciar para el año inicial del periodo considerado (Figura 58). Los archivos tipo ráster generados de este modo serán llamados, de ahora en adelante, como DEM<sub>2021-2000</sub>, para referirse a la diferencia entre del DEM<sub>2021</sub> y el DEM<sub>2000</sub>; DEM<sub>2022-2000</sub> para referirse a la diferencia entre del DEM<sub>2022</sub> y el DEM<sub>2000</sub> y DEM<sub>2022-2021</sub> para referirse a la diferencia entre del DEM<sub>2022</sub> y el DEM<sub>2021</sub>.



**Figura 58:** DEM's utilizados para los cálculos de balances de masa (A, B y C) y diferencias entre los distintos DEM's recortados a la extensión del glaciar del año inicial (D, E y F). A) DEM<sub>2000</sub>. B) DEM<sub>2021</sub>. C) DEM<sub>2022</sub>. D) DEM<sub>2021-2000</sub>. E) DEM<sub>2022-2021</sub>. F) DEM<sub>2022-2000</sub>. El polígono rojo, amarillo y celeste marca la extensión del glaciar para el año 2000, 2021 y 2022 respectivamente. Imagen base: Sentinel 2 con fecha 13 de abril 2021.

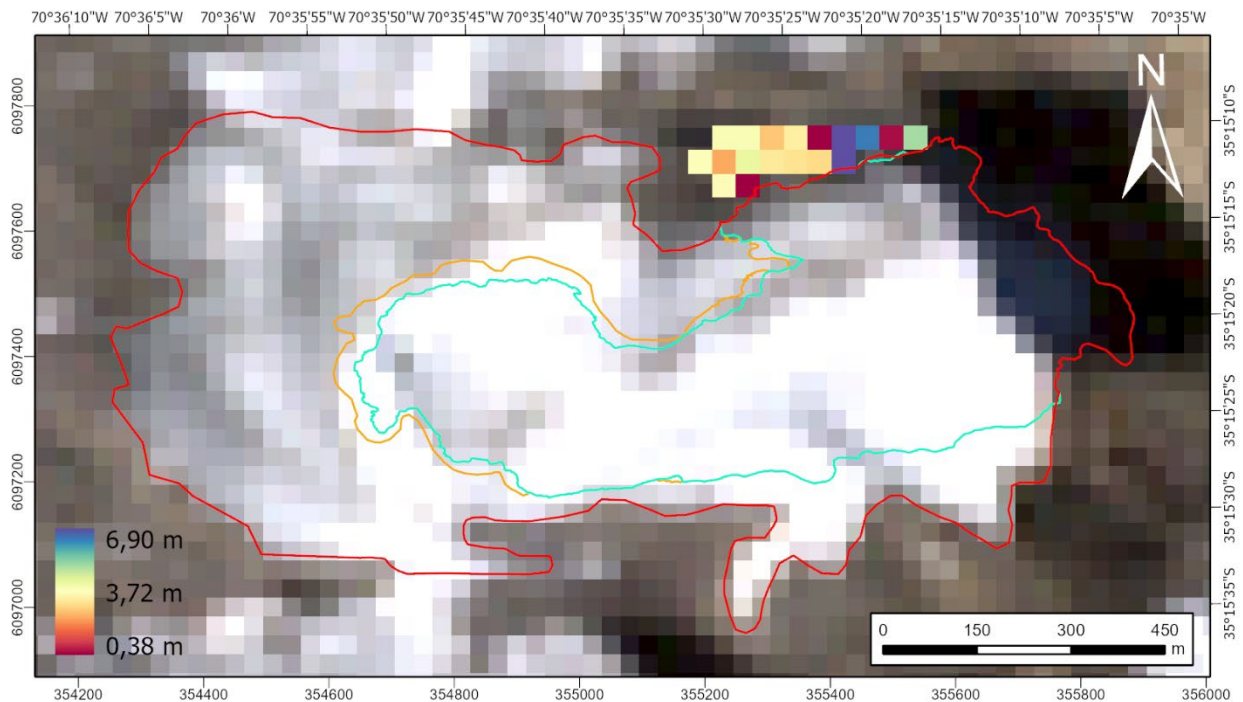
A partir de los rásters DEM<sub>2021-2000</sub>, DEM<sub>2022-2021</sub> y DEM<sub>2022-2000</sub> se desprenden diferencias de altura máximas, mínimas y promedio (Tabla 15).

**Tabla 15:** Diferencias de altura mínima, máxima y promedio ( $\Delta h_{\min}$ ,  $\Delta h_{\max}$  y  $\Delta h_{\text{mean}}$  respectivamente) obtenidas a partir de la diferencia entre los distintos DEM.

Parámetros	DEM <sub>2021-2000</sub>	DEM <sub>2022-2000</sub>	DEM <sub>2022-2021</sub>
$\Delta h_{\min}$ (m)	-63,0	-71,6	-12,5
$\Delta h_{\max}$ (m)	-13,0	-3,7	-1,3
$\Delta h_{\text{mean}}$ (m)	-44,1	-41,7	-5,8

Tal como se observa en la Tabla 15, se tiene una pérdida de altura promedio superior en el periodo 2021-2000 que en el periodo 2022-2000. Considerando que el glaciar sufrió pérdidas de volumen en toda su superficie entre el 2021 y el 2022 (Figura 58-E), esto último carece de sentido y probablemente, se explica por la escasa cobertura que tuvo el DEM<sub>2021</sub> producto de la falla en el UAV, de apenas un 59,9% de la superficie total del glaciar. Por lo mismo, a partir de ahora se omitirán los resultados de dicho DEM y se trabajará exclusivamente con el DEM<sub>2000</sub> y el DEM<sub>2022</sub>.

Para estimar el error entre el DEM<sub>2000</sub> y el DEM<sub>2022</sub>, se calculó la diferencia entre ambos en un sector descubierto de nieve o hielo (Figura 59). El error entre ambos DEM fue considerado como el promedio del valor absoluto de la diferencia en dicho sector, el cual resultó ser de  $\pm 3,7$  m.



**Figura 59:** Cálculo del error entre el DEM SRTM y el DEM 2022. Para estimar el error entre ambos DEM, se tomó el promedio del valor absoluto de la diferencia entre ellos en un sector sin cobertura glacial tanto al año 2000 como 2022. Este resultó ser de 3,7 m. El polígono rojo, amarillo y celeste marca la extensión del glaciar para el año 2000, 2021 y 2022 respectivamente. Imagen base: Landsat ETM+ *pansharpened*.con fecha 09 de abril del 2000.

Si bien el DEM<sub>2022</sub> cuenta con una resolución de 0,09 m, debido a la resolución del DEM<sub>2000</sub>, el ráster DEM<sub>2022-2000</sub> quedó con una resolución de 38,2 m. Multiplicando el área de píxel por la sumatoria total de valores de píxel (Ecuaciones 7, 8 y 9), se obtuvo la diferencia de volumen.

Finalmente, multiplicando dicho volumen por un factor de  $850 \text{ kg/m}^3$ , se obtuvo la diferencia total de masa (Tabla 16).

**Tabla 16:** Resultados del DEM<sub>2022-2000</sub>. Diferencia mínima, máxima, promedio y promedio equivalente en agua de altura ( $\Delta h_{\min}$ ,  $\Delta h_{\max}$  y  $\Delta h_{\text{mean}}$  respectivamente), resolución espacial ( $R_p$ ), área de píxel ( $A_p$ ), sumatoria total de valores de píxel ( $\sum p_i$ ), diferencia de volumen ( $\Delta V$ ) y diferencia de masa ( $\Delta M$ ).

Parámetros	DEM <sub>2022-2000</sub>
$\Delta h_{\min}$ (m)	-71,6
$\Delta h_{\max}$ (m)	-3,7
$\Delta h_{\text{mean}}$ (m)	-41,7
$\Delta h_{\text{mean}}$ anual (m)	-1,9
$\Delta h_{\text{mean}}$ (m w.e.)	-35,4
$\Delta h_{\text{mean}}$ anual (m w.e.)	-1,6
$R_p$ (m)	38,2
$A_p$ (m <sup>2</sup> )	1.459,2
$\sum p_i$	-19.997
$\Delta V$ (m <sup>3</sup> )	-29.179.622
$\Delta M$ (kg)	-24.802.678.700

Debido a que el DEM<sub>2022</sub> no abarca toda la extensión del glaciar para el año 2000, las pérdidas de la Tabla 16 son subestimaciones de la pérdida real. A pesar de ello, el DEM<sub>2022</sub> cubre gran parte de la superficie total del glaciar al año 2000 (el 78%), por lo que se considera que la ablación promedio indicada en la Tabla 16 es representativa de todo el glaciar. Así, y con miras a obtener una aproximación de la pérdida real, se extrapolaron los resultados. Para ello, se tomó la diferencia de altura promedio ( $\Delta h_{\text{mean}}$ ) y se multiplicó por la extensión completa del glaciar en el año 2000 (Tabla 18).

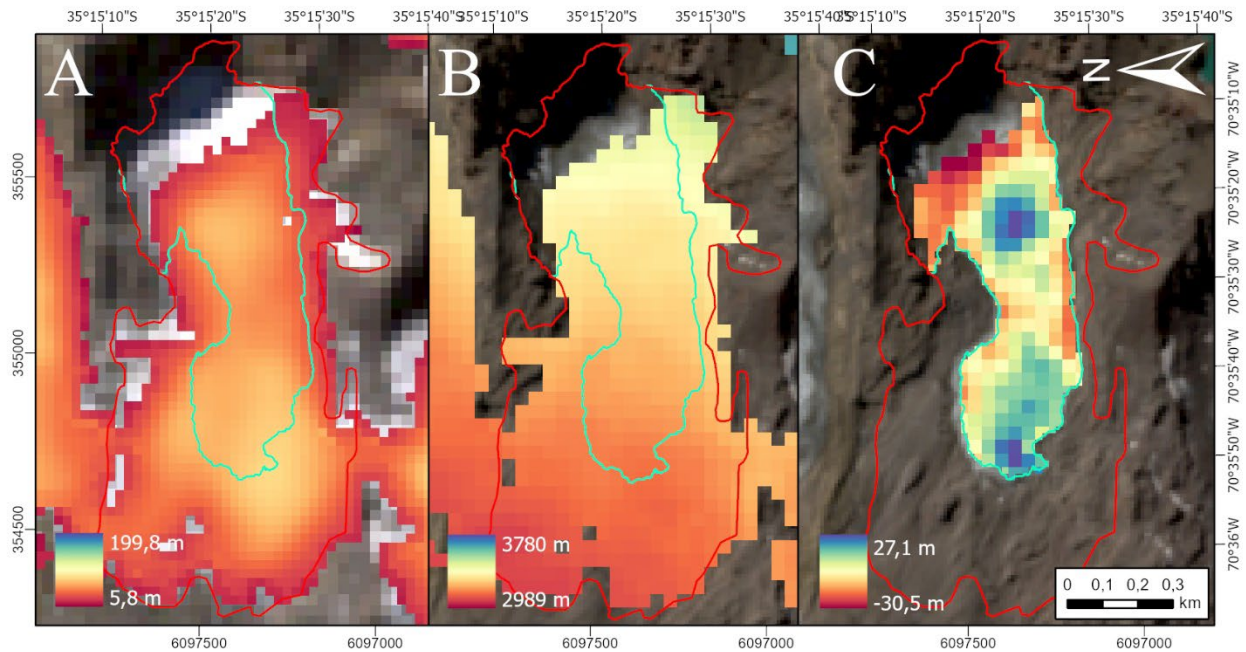
**Tabla 17:** Resultados extrapolados. Diferencia promedio de altura ( $\Delta h_{\text{mean}}$ ), superficie inicial del glaciar ( $S_i$ ), diferencia de volumen ( $\Delta V$ ), tasa de cambio de volumen anual ( $\Delta V_{\text{anual}}$ ) y diferencia de masa ( $\Delta M$ ) para el periodo 2022 – 2000.

Parámetros	DEM <sub>2022-2000</sub>
$\Delta h_{\text{mean}}$ (m)	-41,7
$S_i$ (m <sup>2</sup> )	881.372
$\Delta V$ (m <sup>3</sup> )	-36.753.212
$\Delta M$ (kg)	-31.240.230

Al tomar los resultados del DEM<sub>2022-2000</sub>, tenemos una tasa de cambio de altura  $-1,9 \pm 0,2 \text{ m}$  anuales,  $-1,6 \pm 0,2 \text{ m w.e.}$  anuales y una pérdida anual de volumen de hielo de  $1.670.601 \pm 148.230 \text{ m}^3$ .

Para estimar en cuanto tiempo desaparecerá el glaciar VPPS, se utilizaron los espesores glaciares calculados por Farinotti et al. (2019) al año 2000 para, en conjunto con el DEM<sub>2000</sub> y DEM<sub>2022</sub>, obtener el espesor máximo del glaciar para el año 2022 (Figura 60). A partir de este espesor máximo de hielo y de las pérdidas anuales de altura de hielo (Tabla 16), se calculó un tiempo estimado en el que desaparecería el glaciar VPPS. Cabe destacar que, mediante el método recién descrito, se encontraron espesores negativos en algunos sectores del glaciar para el año 2022. Evidentemente, esto carece de sentido y se explica porque, en algunos sectores, el modelo de

Farinotti et al. (2019) sugiere espesores muy reducidos. A pesar de ello y gracias a que solo fue necesario ocupar el espesor máximo del glaciar, esto no supuso mayores problemas.



**Figura 60:** A) Espesores calculados por Farinotti et al. (2019). B) Altura del lecho rocoso calculado a partir de la diferencia entre los espesores propuestos por Farinotti et al. (2019) y el DEM<sub>2000</sub>. C) Espesores del glaciar VPPS al año 2022 calculados a partir de la diferencia de la altura del lecho rocoso con el DEM<sub>2022</sub>. Nótese la existencia de espesores negativos. Gracias a que solo fue necesario utilizar el espesor máximo (27,1 m), esto no supuso problemas. Imágenes base: Landsat ETM+ *pansharpened*.con fecha 09 de abril del 2000 y Sentinel 2 con fecha 13 de abril 2021.

Considerando que se encontró un espesor máximo de 27,1 m para el año 2022 y que el glaciar ha perdido en promedio  $1,9 \pm 0,2$  m anuales desde el año 2000, se estima que el glaciar desaparecerá en  $14,3 \pm 2$  años de mantenerse la tendencia de los últimos 22 años. Para mayor precisión, puede considerarse exclusivamente la ablación del píxel que registra el mayor espesor, es decir aquel que registra los 27,1 m de espesor, donde se tiene una ablación de  $1,3 \pm 0,2$  m anuales. De considerarse dicha ablación y no la ablación promedio para toda la superficie del glaciar, se obtiene que este desaparecería en  $20,8 \pm 3$  años. Independiente del método, el glaciar VPPS cae en la segunda categoría de mayor puntaje, obteniendo 75 puntos en el parámetro “Balance de masa”.

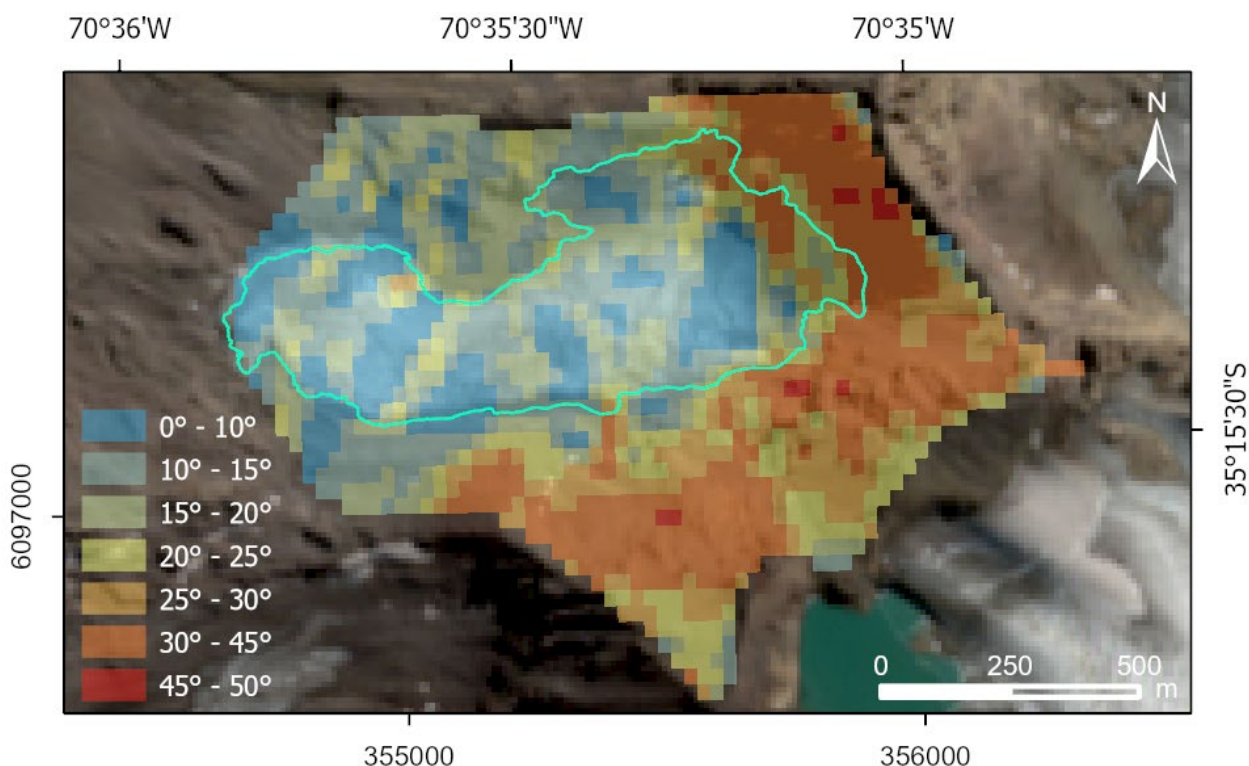
### 5.3.1.1.3 Parámetro “Tiempo de respuesta”

Aplicando la Ecuación 11 y utilizando el espesor promedio calculado para el año 2022 mediante el método de Chen & Ohmura (1990), 20,2 m, y la ablación anual observada para dicho periodo, -1,9 m anuales, se obtuvo un tiempo de respuesta de 10,6 años. Esto posiciona al glaciar VPPS en la segunda categoría más alta del parámetro “Tiempo de respuesta”, otorgándole 75 puntos.

### 5.3.1.2 Variables para el cálculo del indicador “Peligrosidad Asociada” del glaciar VPPS

#### 5.3.1.2.1 Parámetros “Avalanchas” y “Lahares”

Tal como se mencionó en el apartado 4.3.2.5, el DEM<sub>2000</sub> fue recortado a la extensión del valle donde se emplaza el glaciar VPPS para, posteriormente, generar un nuevo ráster que contiene los valores de pendiente (Figura 61). Gran parte de las laderas que bordean la cabecera del glaciar poseen pendientes superiores a los 30°, alcanzando un máximo de 47,6°. Por lo tanto, son laderas proclives para originar avalanchas cuando están cargadas de nieve. Durante ninguna de las campañas de campo, realizadas en meses estivales y comienzos del otoño, se observó nieve en dichas laderas (Figura 57). Por otro lado, la superficie englaciada tiene pendientes que oscilan entre los 0° y los 20°. La pendiente promedio es de 21,4°. Por lo mismo, se otorgó al glaciar la tercera categoría más alta en el parámetro “Avalancha” y cumple con el criterio que se refiere a la existencia de pendientes superiores a 25° para el parámetro “Lahares”.



**Figura 61:** Mapa de pendientes del glaciar VPPS y las laderas que lo rodean. Se observan pendientes altas predominantemente en las laderas que bordean la cabecera del glaciar, el resto no supera los 20°. El polígono celeste marca el límite del glaciar en el año 2022. Imagen base: Sentinel 2 con fecha 17 de abril 2022.

### 5.3.2 Evaluación cuantitativa del glaciar VPPS

En base a los resultados anteriores, se calculó el puntaje del glaciar VPPS. Las tablas siguientes muestran la puntuación para cada parámetro.

**Tabla 18:** Selección de criterios para el cálculo del indicador “Valor de Uso”.

<b>Valor de Uso</b>			
<b>Parámetro</b>		<b>Criterio</b>	<b>Pje</b>
Accesibilidad 13%	Accesibilidad de aproximación	Camino apto para todo vehículo, excluyendo buses.	50
	Accesibilidad de sendero	Dificultad media, para personas con buen estado físico y conocimientos básicos de montañismo.	50
	Accesibilidad estacional	Visitado solo durante dos estaciones del año.	50
Condiciones de observación 13%	Existen elementos que enmascaran el paisaje siendo necesario recorrer el lugar para observar el glaciar o su(s) elemento(s) de interés.		50
Potencial interpretativo 10%	El/los principal(es) elemento(s) de interés del glaciar ilustra(n) procesos que son fácilmente comprensibles por todo público.		100
Valor estético 9%	Cumple con uno de los cuatro atributos mencionados previamente (gran parte de su superficie está descubierta o, en su defecto, está cubierta, pero se observan claros indicios de flujo)		25
Limitaciones de uso 12%	Es posible realizar actividades de investigación (sondajes de hielo, instalación instrumentos, entre otros) y visitas al glaciar sin restricciones.		100
Seguridad 13%	Acercarse, subirse y recorrer el glaciar no supone mayores riesgos.		100
Proximidad a centros poblados 9%	Es necesario pernoctar una noche para llegar al glaciar desde el centro poblado más cercano.		50
Proximidad a centros turísticos 9%	Existen servicios turísticos, hoteles, restaurantes o cafeterías tal que es necesario pernoctar una noche para llegar al glaciar.		50
Número de habitantes en la comuna 6%	El glaciar se ubica en una comuna cuya densidad poblacional es menor a la mitad del promedio nacional.		0
Contexto socioeconómico 6%	El glaciar se ubica en una región con un ingreso per cápita menor al promedio nacional.		25

**Tabla 19:** Selección de criterios para el cálculo del indicador “Valor Científico”.

<b>Valor Científico</b>			
<b>Parámetro</b>	<b>Criterio</b>	<b>Pje</b>	
Representatividad 29%	Es un buen ejemplo a nivel regional para ilustrar o estudiar determinados procesos o rasgos glaciológicos, pero existen mejores opciones en la región.	25	
Rareza 23%	Los procesos o rasgos glaciológicos de interés científico que ilustra el glaciar son medianamente raros a nivel regional.	25	
Diversidad de elementos de interés 23%	El glaciar ilustra 2 procesos o rasgos de relevancia científica.	50	
Conocimiento científico 25%	No existen trabajos publicados del glaciar.	0	



**Tabla 20:** Selección de criterios para el cálculo del indicador “Riesgo de Degradación”. Nótese que se omitieron los parámetros de la categoría “Vulnerabilidad”, ya que ningún glaciar de la zona de estudio está bajo amenaza antrópica.

<b>Riesgo de Degradación</b>			
<b>Categoría</b>	<b>Parámetro</b>	<b>Criterio</b>	<b>Pje</b>
<b>Fragilidad 100%</b>	Hipsometría vs ELA 27%	La curva hipsométrica del glaciar en relación con la ubicación de la ELA es tal que un pequeño aumento de la ELA reduce significativamente la AAR o, en su defecto, la ELA se ubica por encima del glaciar.	100
	Balace de masa 29%	De mantenerse la tendencia del balance de masa de las últimas dos décadas, el glaciar desaparecería en más de 1 y menos de 5 décadas.	75
	Tiempo de respuesta 24%	El glaciar tiene un tiempo de respuesta de 1 a 2 décadas.	75
	Actividad volcánica 20%	El glaciar se ubica sobre o en las cercanías de una zona volcánica donde se han registrado erupciones en el último siglo.	100

**Tabla 21:** Selección de criterios para el cálculo del indicador “Peligrosidad Asociada”.

<b>Peligrosidad Asociada</b>			
<b>Categoría</b>	<b>Parámetro</b>	<b>Criterio</b>	<b>Pje</b>
<b>Peligros in situ 43%</b>	Grietas 30%	El glaciar solo posee grietas menores que no suponen mayor riesgo para la progresión.	0
	Desprendimientos de material 35%	Los desprendimientos de material son poco frecuentes, se dan solo en algunas zonas del glaciar y están acotados a momentos específicos del día o estación del año.	25
	Avalanchas 35%	El glaciar, o bien las laderas que lo rodean, poseen una pendiente de 20 a 30°.	50
<b>Peligros ex situ 57%</b>	Avalanchas de roca-hielo 26%	Cumple con dos de los cinco atributos mencionados previamente (es un sector donde pueden darse fuertes precipitaciones, o bien, anomalías térmicas importantes y se ubica en una zona sísmicamente activa).	25
	Surges 21%	No se han registrado eventos de tipo surge.	0
	GLOF's 28%	No hay lagos superiores a 0,01 km <sup>2</sup> asociados al glaciar (ni embalsado por el hielo ni por una morrena frontal).	0
	Lahares 25%	El glaciar se ubica sobre o en las cercanías de una zona volcánica donde, además, se cumple con dos de los cuatro atributos mencionados previamente (se han registrado erupciones en el último siglo y se tienen pendientes mayores a 25°).	50

Según los resultados recién expuestos, el glaciar VPPS posee los siguientes puntajes:

**Tabla 22:** Puntajes finales del glaciar VPPS para cada indicador.

Evaluación Cuantitativa Glaciar VPPS				
Indicador		Puntaje		Categoría
Valor de Uso		60,8		Alto
Valor Científico		24,5		Bajo
Riesgo de Degradación	Fragilidad (100%)	86,8	86,8	Muy Alto
	Vulnerabilidad (0%)			
Peligrosidad Asociada	Peligros in situ (43%)	26,3	22,1	Bajo
	Peligros ex situ (57%)	19,0		

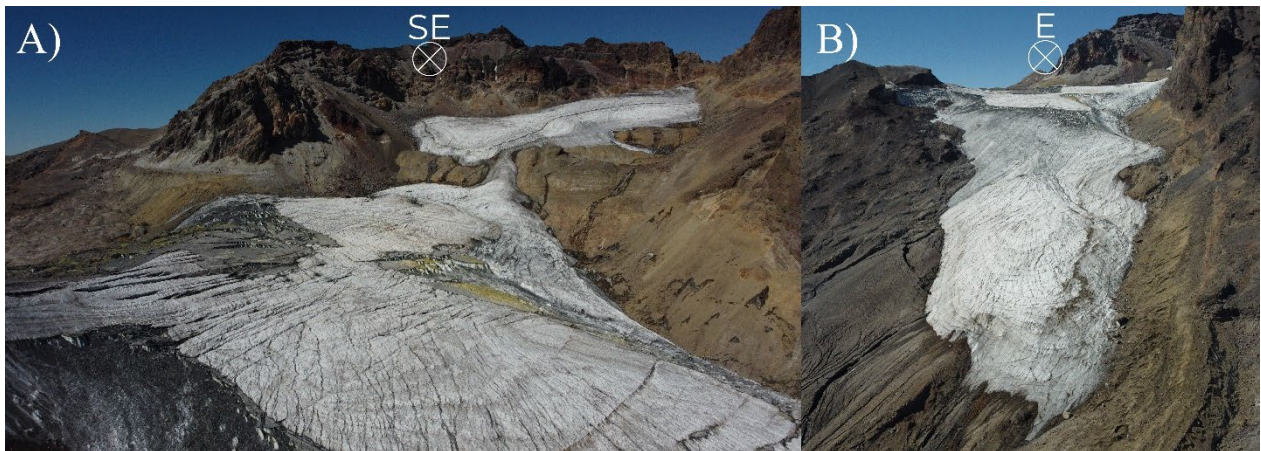
### 5.3.3 Glaciar VPPN: cálculos y estimaciones de variables necesarias para la aplicación de la evaluación cuantitativa

El glaciar VPPN, ubicado a menos de 300 m al norte del glaciar VPPS, posee características que lo asemejan y diferencian del glaciar VPPS. Para el glaciar VPPN no se cuenta con ortomosaicos ni DEM realizados con UAV, por lo tanto, sus parámetros se calculan casi exclusivamente de manera telemática, salvo por algunas observaciones directas menores. A continuación, se detalla el cálculo de los indicadores y sus respectivos parámetros.

#### 5.3.3.1 Variables para el cálculo del indicador “Riesgo de Degradación” del glaciar VPPN

##### 5.3.3.1.1 Parámetro “Hipsometría vs ELA”

A diferencia del glaciar VPPS, el glaciar VPPN no fue recorrido entero. Sin embargo, se voló el dron hasta la cabecera. Gracias a las fotografías capturadas (Figura 62), se sabe que, al igual que para el glaciar VPPS, la línea de nieve de este glaciar queda por sobre su cota máxima. Utilizando la línea de nieve como proxy de la ELA, se le otorga la categoría de máximo puntaje en el parámetro “Hipsometría vs ELA”.



**Figura 62:** A) Vista hacia la cabecera del glaciar VPPN. B) Vista del frente del glaciar VPPN. En ambas fotografías se aprecia la total falta de cobertura nival. Fotografía de Felipe Ugalde.

### 5.3.3.1.1 Parámetros “Balance de masa” y “Tiempo de respuesta”

Los parámetros de la Tabla 24 fueron calculados a partir de las superficies para el año 2000 y 2022 del glaciar VPPN, utilizando las mismas imágenes satelitales que las empleadas para el glaciar VPPS y la fórmula paramétrica de Chen & Ohmura (1990).

**Tabla 23:** Superficie del glaciar VPPN (S), espesor promedio según Chen & Ohmura (1990) ( $\bar{H}$ ), diferencia promedio de altura con respecto al periodo anterior en metros y en metros equivalente en agua ( $\Delta\bar{H}$ ), tasa de cambio anual de altura en metros equivalentes en agua ( $\Delta\bar{H}_{\text{anual}}$ ), volumen total según Chen & Ohmura (1990) (V), diferencia de volumen con respecto al periodo anterior ( $\Delta V$ ) y tasa de cambio anual de volumen ( $\Delta V_{\text{anual}}$ ).

Parámetro	2000	2022
S (m <sup>2</sup> )	1932400	903121
$\bar{H}$ (m)	36,6	27,5
$\Delta\bar{H}$ (m)		-9,1
$\Delta\bar{H}$ anual (m)		-0,4
$\Delta\bar{H}$ (m w.e.)		-7,7
$\Delta\bar{H}_{\text{anual}}$ (m w.e.)		-0,35
V (m <sup>3</sup> )	69.675.249	24.819.447
$\Delta V$ (m <sup>3</sup> )		-44.855.802
$\Delta V_{\text{anual}}$ (m <sup>3</sup> )		-2.038.900

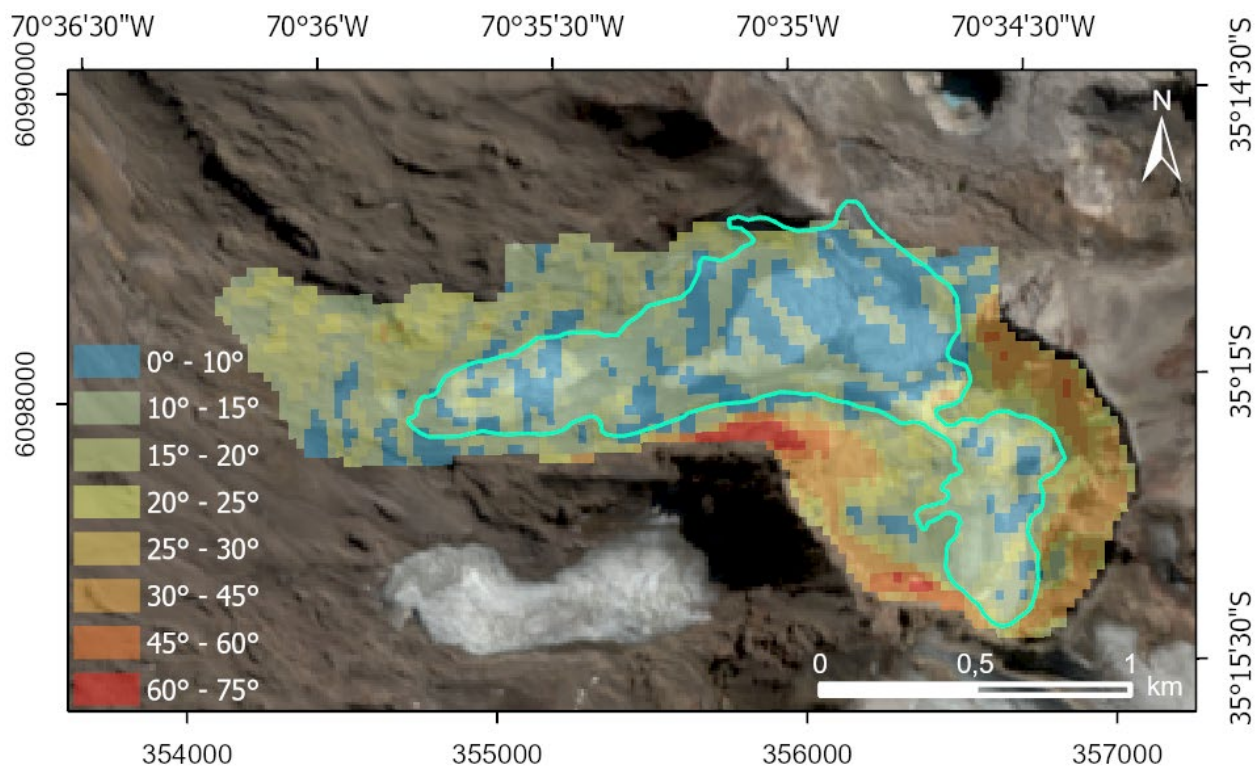
Según la tendencia del balance de masa entre el 2022 y el 2000, periodo en el cual el glaciar habría perdido 44.855.802 m<sup>3</sup> y, según su volumen total en el año 2022, el glaciar VPPN desaparecería en 12,2 años. Esto le otorga 75 puntos en el parámetro “Balance de masa”.

Tomando el espesor actual del glaciar, 27,5 m, y la ablación anual observada entre los años 2000 y 2022, 0,4 m, se obtiene un tiempo de respuesta de 68,8 años. En base a esto, el glaciar VPPN tiene 25 puntos en el parámetro “Tiempo de respuesta”.

### 5.3.3.2 Variables para el cálculo del indicador “Peligrosidad Asociada” del glaciar VPPN

#### 5.3.3.2.1 Parámetros “Avalanchas” y “Lahares”

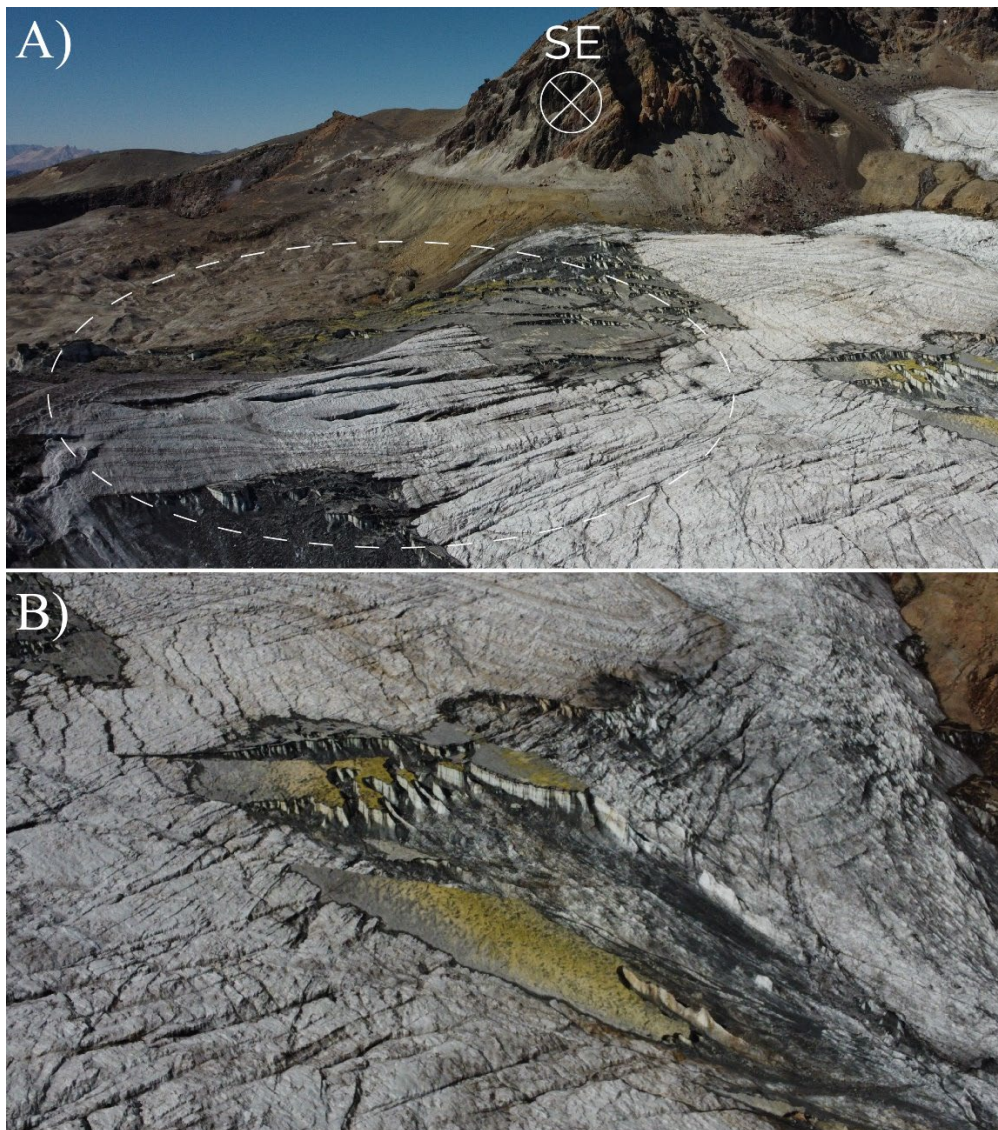
Con los mismos métodos empleados para calcular las pendientes del glaciar VPPS, se calcularon las pendientes del glaciar VPPN (Figura 63). De manera similar, se observa que gran parte de las laderas que bordean la cabecera del glaciar poseen pendientes superiores a los 30°, esta vez alcanzando un máximo de 73,1°. Por lo tanto, son laderas proclives para originar avalanchas cuando están cargadas de nieve. Al igual que para el glaciar VPPS, durante ninguna de las campañas de campo, realizadas en meses estivales y comienzos del otoño, se observó nieve en dichas laderas (Figura 62). Por otro lado, la superficie englaciada tienen pendientes que oscilan entre los 0° y los 20°. La pendiente promedio es de 17,2°, menor a la observada en el glaciar VPPS. Por lo mismo, se otorgó al glaciar la cuarta categoría más alta en el parámetro “Avalancha” y cumple con el criterio para el parámetro “Lahares” que se refiere a la existencia de pendientes superiores a 25°.



**Figura 63:** Mapa de pendientes del glaciar VPPN y las laderas que lo rodean. Al igual que para el glaciar VPPS, se observan pendientes sobre los 30° exclusivamente en las laderas que bordean la cabecera del glaciar. El polígono celeste marca el límite del glaciar en el año 2022. Imagen base: Sentinel 2 con fecha 17 de abril 2022.

### 5.3.3.2.2 Parámetro “Grietas”

A diferencia del glaciar VPPS, que prácticamente no posee grietas, salvo algunas de apenas decenas de centímetros de espesor, el glaciar VPPN si muestra grietas que pueden suponer un riesgo para la progresión (Figura 64). Esto es particularmente cierto durante los meses de invierno, cuando el glaciar queda completamente cubierto. A pesar de ello, las grietas son completamente identificables durante los meses de ablación y fácilmente sorteables. Producto de lo mismo, se le otorgó la tercera categoría de mayor puntaje al parámetro “Grietas”.



**Figura 64:** Vista aérea de la parte alta del glaciar VPPN, donde se pueden observar grietas de espesores métricos (A) y un terreno accidentado (B). Fotografía de Felipe Ugalde.

#### **5.3.4 Evaluación cuantitativa del glaciar VPPN**

En base a los resultados anteriores, se calculó el puntaje del glaciar VPPN. Las tablas siguientes muestran la puntuación para cada parámetro.

**Tabla 24:** Selección de criterios para el cálculo del indicador “Valor de Uso”.

<b>Valor de Uso</b>			
<b>Parámetro</b>		<b>Criterio</b>	<b>Pje</b>
Accesibilidad 13%	Accesibilidad de aproximación	Camino apto para todo vehículo, excluyendo buses.	50
	Accesibilidad de sendero	Dificultad media, para personas con buen estado físico y conocimientos básicos de montañismo.	50
	Accesibilidad estacional	Visitado solo durante dos estaciones del año.	50
Condiciones de observación 13%	Existen elementos que enmascaran el paisaje siendo necesario recorrer el lugar para observar el glaciar o su(s) elemento(s) de interés.		50
Potencial interpretativo 10%	El/los principal(es) elemento(s) de interés del glaciar ilustra(n) procesos que son comprensibles para público con base teórica en ciencias.		50
Valor estético 9%	Cumple con tres de los cuatro atributos mencionados previamente (gran parte de su superficie está descubierta o, en su defecto, está cubierto, pero se observan claros indicios de flujo, posee elementos de interés visibles y llamativos, como rimayas, grietas, seracs, nunataks, morrenas, entre otros y posee una forma o tamaño que lo hacen llamativo.)		75
Limitaciones de uso 12%	Es posible realizar actividades de investigación (sondajes de hielo, instalación instrumentos, entre otros) y visitas al glaciar sin restricciones.		100
Seguridad 13%	Acercarse y subirse al glaciar no supone mayores riesgos, pero existen riesgos al recorrerlo (grietas, desprendimientos, entre otros).		75
Proximidad a centros poblados 9%	Es necesario pernoctar una noche para llegar al glaciar desde el centro poblado más cercano.		50
Proximidad a centros turísticos 9%	Existen servicios turísticos, hoteles, restaurantes o cafeterías tal que es necesario pernoctar una noche para llegar al glaciar.		50
Número de habitantes en la comuna 6%	El glaciar se ubica en una comuna cuya densidad poblacional es menor a la mitad del promedio nacional.		0
Contexto socioeconómico 6%	El glaciar se ubica en una región con un ingreso per cápita menor al promedio nacional.		25

**Tabla 25:** Selección de criterios para el cálculo del indicador “Valor Científico”.

<b>Valor Científico</b>			
<b>Parámetro</b>	<b>Criterio</b>	<b>Pje</b>	
Representatividad 29%	Es un buen ejemplo a nivel nacional para ilustrar o estudiar determinados procesos o rasgos glaciológicos.	75	
Rareza 23%	Los procesos o rasgos glaciológicos de interés científico que ilustra el glaciar son muy raros a nivel regional.	50	
Diversidad de elementos de interés 23%	El glaciar ilustra 2 procesos o rasgos de relevancia científica.	50	
Conocimiento científico 25%	No existen trabajos publicados del glaciar.	0	

**Tabla 26:** Selección de criterios para el cálculo del indicador “Riesgo de Degradación”. Nótese que se omitieron los parámetros de la categoría “Vulnerabilidad”, ya que ningún glaciar de la zona de estudio está bajo amenaza antrópica.

<b>Riesgo de Degradación</b>			
<b>Categoría</b>	<b>Parámetro</b>	<b>Criterio</b>	<b>Pje</b>
<b>Fragilidad 100%</b>	Hipsometría vs ELA 27%	La curva hipsométrica del glaciar en relación con la ubicación de la ELA es tal que un pequeño aumento de la ELA reduce significativamente la AAR o, en su defecto, la ELA se ubica por encima del glaciar.	100
	Balance de masa 29%	De mantenerse la tendencia del balance de masa de las últimas dos décadas, el glaciar desaparecería en más de 1 y menos de 5 décadas.	75
	Tiempo de respuesta 24%	El glaciar tiene un tiempo de respuesta de 5 décadas a 1 siglo.	25
	Actividad volcánica 20%	El glaciar se ubica sobre o en las cercanías de una zona volcánica donde se han registrado erupciones en el último siglo.	100

**Tabla 27:** Selección de criterios para el cálculo del indicador “Peligrosidad Asociada”.

<b>Peligrosidad Asociada</b>			
<b>Categoría</b>	<b>Parámetro</b>	<b>Criterio</b>	<b>Pje</b>
<b>Peligros in situ 43%</b>	Grietas 30%	El glaciar posee grietas lo suficientemente profundas y anchas como para suponer riesgo para la progresión, pero que en su mayoría son identificables y sorteables.	50
	Desprendimientos de material 35%	Los desprendimientos de material son poco frecuentes, se dan solo en algunas zonas del glaciar y están acotados a momentos específicos del día o estación del año.	25
	Avalanchas 35%	El glaciar, o bien las laderas que lo rodean, poseen una pendiente de 10 a 20°.	25
<b>Peligros ex situ 57%</b>	Avalanchas de roca-hielo 26%	Cumple con dos de los cinco atributos mencionados previamente (es un sector donde pueden darse fuertes precipitaciones, o bien, anomalías térmicas importantes y se ubica en una zona sísmicamente activa).	25
	Surges 21%	No se han registrado eventos de tipo surge.	0
	GLOF's 28%	No hay lagos superiores a 0,01 km <sup>2</sup> asociados al glaciar (ni embalsado por el hielo ni por una morrena frontal).	0
	Lahares 25%	El glaciar se ubica sobre o en las cercanías de una zona volcánica donde, además, se cumple con dos de los cuatro atributos mencionados previamente (hay abundante disponibilidad de sedimentos no consolidados, se han registrado erupciones en el último siglo y se tienen pendientes mayores a 25°).	75

Según los resultados recién expuestos, el glaciar VPPN posee los siguientes puntajes:

**Tabla 28:** Puntajes finales del glaciar VPPN para cada indicador.

Evaluación Cuantitativa Glaciar VPPN				
Indicador		Puntaje		Categoría
Valor de Uso		57,0		Medio
Valor Científico		44,8		Medio
Riesgo de Degradación	Fragilidad (100%)	74,8	74,8	Alto
	Vulnerabilidad (0%)			
Peligrosidad Asociada	Peligros in situ (43%)	32,5	28,4	Bajo
	Peligros ex situ (57%)	25,3		

### 5.3.6 Propuestas de estrategias de gestión

En base a la evaluación cuantitativa, es posible generar propuestas de estrategias para la gestión de los glaciares VPPS y VPPN. Este corresponde al último paso de la estructura metodológica. Cabe destacar que el diseño de estrategias debe enfocarse según la definición del propósito del estudio, que corresponde al primer paso metodológico. En este caso, el propósito, tal como se mencionó en el apartado 1.1, es entregar una herramienta al proyecto Geoparque Pillanmapu que facilite la gestión territorial y una venidera postulación a la Red Global de Geoparques UNESCO. Por lo tanto, las estrategias aquí propuestas se alinean con lo recién mencionado.

Respecto del RD, de mantenerse la tendencia de las últimas décadas, es altamente probable que en la siguiente década el glaciar VPPS desaparezca. El glaciar VPPN se encuentra en una situación levemente menos riesgosa, pero sigue siendo probable que desaparezca en las siguientes décadas o que, al menos, vea su volumen importantemente reducido. Si bien es cierto que el RD fue calculado exclusivamente para dos glaciares, se puede asumir que los otros glaciares del CVPPA están en una situación similar. Debido a que el RD se compone exclusivamente de la componente “Fragilidad”, omitiéndose la “Vulnerabilidad” por la inexistencia de interés para la explotación en la zona, no existen medidas directas para mitigar el RD de los glaciares del CVPPA. En base a lo recién expuesto, se sugiere realizar un monitoreo periódico de los glaciares del CVPPA para conocer su evolución en los años venideros.

Por otro lado, los glaciares CVPPA alimentan el río Teno y el río Lontué. Esto, sumado al carácter silvoagrícola de las comunas de Romeral y Curicó y a la presencia de una ciudad con más de 100.000 habitantes aguas abajo (Curicó), les otorga una especial relevancia. La recomendación es, por un lado, sensibilizar a las autoridades y comunidades locales respecto de la fragilidad de los glaciares y de las consecuencias que esto puede traer y, por otro, realizar un estudio del aporte hídrico que generan los glaciares del CVPPA con miras a proyectar escenarios hídricos para las comunas afectadas.

El Valor de Uso resultó medio en el glaciar VPPN y alto en el VPPS. Sin embargo, este último estuvo muy cercano a caer en la categoría media. El VPPS tiene un alto potencial interpretativo pero un bajo valor estético mientras que lo contrario se da en el glaciar VPPN. Por otro lado, su accesibilidad y proximidad a centros poblados y turísticos es pobre. A pesar de ser glaciares seguros, se requiere de una larga aproximación para llegar a ellos. En base a esto, se descarta el



uso de ambos glaciares para fines educativos. No obstante, considerando que todos los glaciares de la región del Maule son de difícil acceso y que, de hecho, estos glaciares fueron escogidos precisamente por ser los que presentan menores dificultades de acceso, se sugiere el uso del glaciar VPPN para salidas turísticas guiadas. Estas visitas turísticas guiadas debiesen ser exclusivas para público afin a caminatas largas y en ambiente de montaña. Además, el glaciar VPPN, de subirse, lleva a la caldera del volcán Peteroa, donde es posible apreciar fumarolas, cráteres y cavernas de hielo. Según todo lo dicho, se sugiere descartar el glaciar VPPS como candidato a geositio del Geoparque Pillanmapu, pero si considerar el glaciar VPPN, el cual no solo es más llamativo, sino que también permite narrar mejor la historia de la interacción glacio – volcánica que se desarrolla en el sector. Esta última característica lo convierte, incluso, en un posible candidato para la lista de geositios de la SGCh.

La peligrosidad asociada in situ resultó ser baja, siendo el glaciar VPPN levemente más riesgoso producto de la presencia de grietas, sobre todo aquellas ubicadas en la zona alta del glaciar. A su vez, la peligrosidad ex situ resultó ser muy baja y baja para los glaciares VPPS y VPPN respectivamente. En particular, respecto a la peligrosidad in situ, se debe tener especial precaución con visitas invernales. Si bien ninguno de los glaciares posee pendientes elevadas, si lo poseen las laderas de sus cabeceras del glaciar y pueden gatillar avalanchas. También, las grietas del VPPN quedan cubiertas en invierno, aumentando la dificultad para identificarlas. Se sugiere, por lo tanto, tomar las medidas de seguridad necesarias para la progresión durante los meses de invierno.

En ambos glaciares la peligrosidad ex situ resultó ser baja y, de hecho, es muy poco probable que sean los responsables de generar eventos para la mayoría de los peligros evaluados. Sin embargo, no debe descartarse la probabilidad de ocurrencia de lahares que podrían potencialmente afectar las localidades ubicadas aguas abajo. Esto es particularmente cierto para el VPPN al estar ubicado más cerca de los centros eruptivos del Peteroa y tener un mayor tamaño que el VPPS. Por otro lado, el CVPPA fue el responsable de una gran avalancha de detritos que se desarrolló a comienzos del Holoceno y del cual se han encontrado depósitos asociados al evento al oeste de Curicó, habiendo recorrido ~95 km (Tormey, 2010). Su alta movilidad habría sido posible gracias a la presencia de agua proveniente del deshielo de los glaciares del CVPPA producto de la transición de la glaciación de Würm al periodo interglaciar actual. Tormey (2010) descarta la probabilidad de que se repita el evento en el mismo sector del CVPPA, simplemente por el hecho de que el edificio volcánico ya colapsó y aún no ha tenido tiempo de reconstruirse. Sin embargo, alerta sobre la posibilidad de un colapso del Vn. Azufre, inestable producto de una extensa alteración hidrotermal y con la presencia de 4 glaciares de montaña que suman una superficie total de 5,98 km<sup>2</sup>, capaces de aportar agua para otorgar movilidad al flujo. En base a lo recién expuesto, se sugiere, por un lado, realizar un estudio de peligro geológico para los glaciares ubicados en las laderas suroeste del Vn. Azufre y, por otro lado, sensibilizar a las autoridades y comunidades locales que podrían verse afectadas por un evento de este tipo, en particular a aquellas ubicadas en los valles del río Claro y Lontué.

## **6. DISCUSIONES**

### **6.1 Discusiones del O.E.1: Diseñar una metodología para la evaluación de glaciares**

#### **6.1.1 Encuestas**

Tal como se mencionó, las encuestas fueron realizadas entre especialistas en glaciología y geopatrimonio. Sin embargo, dado el carácter interdisciplinario que supone la gestión territorial, se recomienda ampliarlas a especialistas en áreas de las ciencias sociales, como sociología o políticas públicas. A su vez, podrían haberse incorporado especialistas de otras ciencias de la Tierra, como hidrólogos o, incluso, biólogos, dado el rol ecosistémico de los glaciares. Por lo mismo, los resultados de las encuestas tienen un grado de sesgo que puede ser mejorado a futuro.

#### **6.1.2 Definición de indicadores**

Como se mencionó en el capítulo de metodología, los 4 indicadores que integran la evaluación cuantitativa fueron definidos, principalmente, en base a los resultados de la primera encuesta. Sin embargo, algunas consideraciones fueron tomadas en cuenta.

##### **6.1.2.1 Indicador “Valor Ecosistémico”**

El indicador que resultó como el de mayor relevancia según la encuesta fue el Valor Ecosistémico (Figura 39). A pesar de ello, este no figura en la metodología que se propone en el presente trabajo. Esto responde a tres motivos:

- i. algunos de los servicios ecosistémicos que proveen los glaciares están representados dentro de los 4 indicadores propuestos: por ejemplo, servicios ecosistémicos culturales, como actividades turísticas o educativas, y servicios ecosistémicos de regulación, como los peligros geológicos, quedan cubiertos o parcialmente cubiertos por otros indicadores.
- ii. algunos de los servicios ecosistémicos que proveen los glaciares están estrechamente vinculados a las ciencias biológicas y, por lo tanto, requieren de un enfoque interdisciplinario para su evaluación: tal es el caso con servicios ecosistémicos de aprovisionamiento ligados a la producción de biomasa, como la liberación de nutrientes a partir de deshielos, la producción de microalgas o invertebrados que dependen de condiciones sostenidas por la presencia de glaciares y que afectan al resto de la cadena trófica, el vínculo existente entre ríos abastecidos por deshielos y algunos salmónidos o el rol de los deshielos en la sostenibilidad de humedales (Milner et al., 2017).
- iii. algunos de los servicios ecosistémicos que proveen los glaciares son de difícil medición y/o han sido medidos en pocos glaciares, dificultando su evaluación: tal es el caso con servicios ecosistémicos de aprovisionamiento, como determinar el aporte hídrico proveniente de un determinado glaciar en una determinada cuenca, o de regulación, como aportes de sedimentos o contaminantes provenientes de los deshielos (Milner et al., 2017).

A pesar de lo recién mencionado, dada su relevancia y los resultados de la encuesta, se propone a futuro evaluar la factibilidad de incluir un indicador exclusivo para medir el Valor Ecosistémico de los glaciares. Esta evaluación debería incluir a un profesional del área de la biología, idealmente especialista en ecología y/o limnología.

### **6.1.2.2 Indicadores “Potencial de Uso Turístico” y “Potencial de uso Educativo”**

Algunas metodologías para la evaluación del geopatrimonio separan el valor de uso en uso educativo y turístico (Fassoulas et al., 2011; García-Cortéz, 2014; Brilha, 2016; Reynard, 2016; Suzuki & Takagi, 2018; Santos, 2020) mientras que otras se refieren exclusivamente a un valor de uso generalizado (Pereira et al., 2007; Martínez, 2008; Bruschi et al., 2011; Alfaro & Sepúlveda, 2015). Buscando tener una mejor comprensión de la relevancia de cada indicador, para la realización de la encuesta se decidió separar estos indicadores en potencial de uso turístico y educativo. Luego, y a pesar de que el potencial de uso turístico resultó tener un bajo puntaje (Figura 39), se agruparon ambos en un único indicador, el Valor de Uso. Esto responde a un intento por reducir el número de indicadores, a la vez que evitar perder información útil para la gestión turística de los glaciares. Así, en un único indicador se reúne información referente al uso educativo y turístico.

### **6.1.3 Subjetividad de la metodología**

El proceso de diseñado de la metodología no estuvo exento de subjetividad. Esta radica, en parte, en decisiones como las mencionadas en el apartado anterior y, en particular, en la definición de los parámetros, los cuales son parte de la propuesta del autor de este trabajo y, como tal, no fueron consultados a especialistas. Los parámetros para el cálculo del Valor de Uso y del Valor Científico fueron extraídos y modificados a partir de otras metodologías para la evaluación del geopatrimonio (ver apartado 3.4.4.2). Sin embargo, al no existir metodologías para la evaluación del geopatrimonio específicas para glaciares, algunos parámetros usados en el cálculo de los indicadores Riesgo de Degradación y Peligrosidad Asociada son propuestos y definidos por el autor de este trabajo. A continuación, se observan los parámetros con las respectivas fuentes a partir de las cuales fueron diseñados. Muchas de las publicaciones referidas no son trabajos que buscasen el diseño de una evaluación cuantitativa. En dicho caso, estas fueron utilizadas principalmente como marco teórico para la definición del parámetro.

**Tabla 29:** publicaciones a partir de las cuales se seleccionaron y/o diseñaron los distintos parámetros.

Indicador	Parámetro	Referencias
Valor uso	Accesibilidad	Alfaro & Sepúlveda (2015)
	Condiciones de observación	Pereira et al (2007)
	Potencial interpretativo	Brilha (2016)
	Valor Estético	García-Cortés (2014)
	Limitaciones de uso	Brilha (2016)
	Seguridad	Brilha (2016)
	Proximidad a centro poblados	Alfaro & Sepúlveda (2015)
	Proximidad a centros turísticos	García-Cortés (2014); Brilha (2016); Suzuki & Takagi (2018).
	Número de habitantes comuna	Alfaro & Sepúlveda (2015); Pérez (2022)
	Contexto socioeconómico comuna	Alfaro & Sepúlveda (2015); Pérez (2022)
Valor científico	Representatividad	García-Cortés (2014); Brilha (2016); Reynard et al. (2016); Santos et al. (2020).
	Rareza	García-Cortés (2014); Brilha (2016); Reynard et al. (2016); Suzuki & Takagi (2018); Santos et al. (2020).
	Diversidad de elementos de interés	García-Cortés (2014), Santos et al. (2020).
	Conocimiento científico	García-Cortés (2014)
Riesgo de degradación	Hipsometría	Furbish & Andrews (1984); Raper & Braithwaite (2009); Rivera et al. (2011)
	Tiempo de respuesta	Johannesson et al. (1989); Bahr et al. (1998); Harrison et al. (2001); Pelto and Hedlund (2001); Raper and Braithwaite (2009)
	Balance de masa	Propuesta del autor
	Actividad volcánica	Propuesta del autor
	Interés para la explotación	García-Cortés, 2014
	Tipo de actividad antrópica	Propuesta del autor
Peligrosidad asociada	Grietas	Propuesta del autor
	Desprendimientos de material	Propuesta del autor
	Avalanchas	Schweizer et al. (2003)
	Avalanchas roca – hielo	Hauser, A. (2002); Huggel et al. (2005); Evans et al. (2009)
	GLOF's	Worni et al. (2013); Mohanty & Maiti (2021); (Rivera, comunicación personal, 2022)
	Lahares	Vallance & Iverson (2015)
	Surges	Propuesta del autor

### 6.1.4 Representatividad de la Evaluación Cuantitativa

Como se mencionó en la sección de Resultados, idealmente deben seleccionarse la mayor cantidad posible de glaciares para ser evaluados cuantitativamente. Sin embargo, los proyectos SLM o gobernanzas locales suelen tener limitaciones de presupuesto y/o de personal que dificultan evaluar más de uno. En dicho caso, basta con evaluar un solo glaciar, seleccionado mediante los criterios ya mencionados. No obstante, se debe tener en consideración que el puntaje que emerja de la evaluación y, por ende, la estrategia de gestión, serán de mayor utilidad

para ese glaciar en particular y sucesivamente menos representativa para glaciares de distinto tamaño, con distinta orientación, de distinta clasificación, ubicados en otro lugar, etc.

En parte buscando evaluar cuan representativa es la evaluación cuantitativa entre distintos glaciares, en el presente trabajo se evaluaron dos glaciares, el VPPS y el VPPN. Estos glaciares poseen rasgos que los asemejan y que los diferencian. Son similares por su localización y clasificación primaria, ambos glaciares de montaña ubicados en la ladera poniente del CVPPA, y diferentes por su tamaño y forma.

**Tabla 30:** Puntajes para los glaciares VPPS y VPPN y sus diferencias porcentuales para cada indicador y promedio.

Indicador		Puntaje VPPS		Puntaje VPPN		Diferencia porcentual	Diferencia porcentual promedio
Valor de Uso		60,8		57		6,5%	26,3%
Valor Científico		24,5		44,8		58,6%	
Riesgo de Degradación	Fragilidad (100%)	86,8	86,8	74,8	74,8	14,9%	
	Vulnerabilidad (0%)						
Peligrosidad Asociada	Peligros in situ (43%)	26,3	22,1	32,5	28,4	25,0%	
	Peligros ex situ (57%)	19,0		25,3			

Según los valores calculados para cada indicador, los glaciares VPPS y VPPN difieren en un 26,3% en promedio. Debería esperarse brechas aún mayores entre glaciares más diferenciados. En base a esto, se reitera la necesidad de actuar con cautela al momento de utilizar la evaluación cuantitativa de un glaciar para el diseño de estrategias de otro y se sugiere, siempre que sea posible, evaluar cuantitativamente cada glaciar para el que se desee diseñar estrategias de gestión.

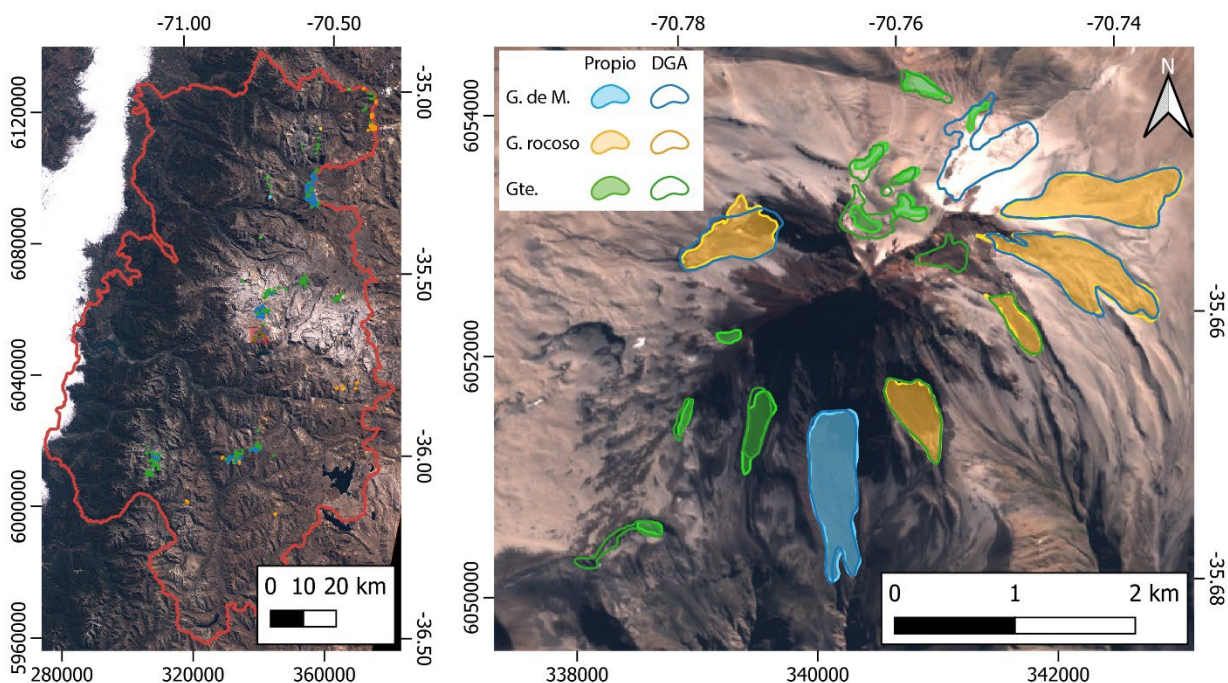
## 6.2 Discusiones del O.E.2: Levantar la línea base glaciológica en el territorio del proyecto Geoparque Pillanmapu

### 6.2.1 Inventario de glaciares de la Dirección General de Aguas 2022

El inventario de la DGA difiere del realizado en el presente trabajo (Figura 42). El mayor número de glaciares se explica, en un 99,2%, debido a que en el inventario de la DGA se decidió mapear glaciares menores a 0,01 km<sup>2</sup>, siempre y cuando estos provengan de la fragmentación de un glaciar mayor a 0,01 km<sup>2</sup> identificado en el inventario anterior, mientras que en el inventario propio se descartó cualquier glaciar menor a dicha superficie.

Otra diferencia importante entre ambos inventarios es que en el propio se identificaron menos glaciares de montaña y más glaciares rocosos. Al revisar ambos inventarios, se constató que algunos de los glaciares de montaña del inventario de la DGA fueron mapeados como rocosos en el propio (Figura 65). Esto se explica porque, si bien el inventario de la DGA es del 2022, los glaciares fueron digitalizados a partir de imágenes del 2020 o anteriores. Así, glaciares que anteriormente tenían pequeñas porciones descubiertas identificables en imágenes satelitales, ya

no las poseen en las imágenes utilizadas en el presente trabajo y, por lo tanto, fueron clasificados como glaciares rocosos. De todas formas, se sugiere realizar campañas de campo para dilucidar la verdadera naturaleza de dichos glaciares.



**Figura 65:** A la izquierda, mapa del territorio del proyecto Geoparque Pillanmapu mostrando el inventario de la DGA año 2022 y el propio. El recuadro en rojo, ubicado aproximadamente al centro de la zona de estudio, indica la ubicación del mapa de la derecha. A la derecha, acercamiento del volcán Cerro Azul. Los polígonos rellenos corresponden a aquellos del inventario propio mientras que los vacíos a aquellos del inventario de la DGA. Se puede observar como algunos glaciares tienen distinta clasificación.

### 6.2.2 Tendencias generales en los glaciares del territorio del proyecto Geoparque Pillanmapu

Tal como se mostró en los resultados de la línea base glaciológica, se consultaron 9 trabajos adicionales, entre ellos inventarios y análisis multitemporales, los cuales fueron comparados con el inventario generado en el presente trabajo. A partir de este análisis, fue posible extraer tendencias generales de reducción de superficie y volumen,  $-1,1 \text{ km}^2$  anuales y  $-0,02 \text{ km}^3$  anuales respectivamente. Tres de los cuatro inventarios utilizados para su cálculo fueron construidos a partir de múltiples fechas. Por ejemplo, el inventario de la DGA 2014 identificó la superficie de los glaciares a partir de imágenes satelitales tomadas en 2000, 2001, 2003, 2007, 2008 y 2009. Para poder graficar los resultados y calcular las regresiones lineales, se asignó a todo el inventario una única fecha, correspondiente a la que se repite con mayor frecuencia. Estas fechas resultaron ser 2000, 2001 y 2018 para el RGI, el inventario de la DGA 2014 y el inventario de la DGA 2022 respectivamente. El único inventario que fue realizado a partir de una única fecha fue el realizado en el presente trabajo, para el cual se utilizaron imágenes Sentinel 2 del 13 de abril 2021.

Producto de lo recién mencionado, las tendencias calculadas son aproximaciones, útiles para entender la situación glaciológica de las últimas décadas, pero no para conocer de manera precisa el retroceso glacial en la zona de estudio.

### **6.3 Discusiones del O.E.3: Aplicar la metodología en el territorio del proyecto Geoparque Pillanmapu**

#### **6.3.1 Respecto a la subjetividad al aplicar la metodología**

Gracias a la aplicación de la metodología en el territorio del proyecto Geoparque Pillanmapu, se pudo constatar que se debe incurrir en algunas decisiones subjetivas al momento de aplicarla. Un ejemplo de ello fueron los criterios utilizados para asignar puntaje al parámetro “Avalanchas”, donde se requiere conocer las pendientes las cuales resultaron ser, en promedio, de 21,4° y 17,2°, asignándosele 50 y 25 puntos a los glaciares VPPS y VPPN respectivamente. Sin embargo, y tal como se observa en las Figuras 61 y 63, las laderas que bordean las cabeceras de los glaciares poseen, en general, pendientes superiores a los 30°. Según ello, podría asignarsele 75 puntos al mismo parámetro. Otro ejemplo es el cálculo del parámetro “Conocimiento científico”. A ambos glaciares se les asignó 0 puntos en dicha categoría, a pesar de que existen trabajos que si los incluyen (algunos ejemplos son Osorio, 2013; Trombotto et al., 2014; Braun et al., 2019; Reinthaler et al., 2019). Tres de ellos fueron publicados en revistas internacionales y, por ende, podría haberseles asignado 100 puntos. Sin embargo, se decidió omitir estos trabajos ya que se trata de publicaciones que incluyen múltiples glaciares en su estudio. Se aconseja por lo tanto considerar solo aquellas publicaciones donde el glaciar en cuestión tenga un rol preponderante.

El problema de la subjetividad en la evaluación del geopatrimonio no es único a esta metodología. Numerosos autores han reportado encontrarse con la misma dificultad (Pereira et al., 2007; Reynard et al., 2007; Brilha, 2016; Mucivuna et al., 2019; Santos et al., 2020; entre otros). Frente a este problema, se sugiere:

- i. No modificar los resultados para aumentar o disminuir el puntaje de un glaciar en particular.
- ii. Evaluar en base a datos duros siempre que sea posible.
- iii. Aplicar los mismos criterios para todos los glaciares de la zona de estudio que se evalúen. Esto permite que los puntajes sean comparables entre los distintos glaciares.

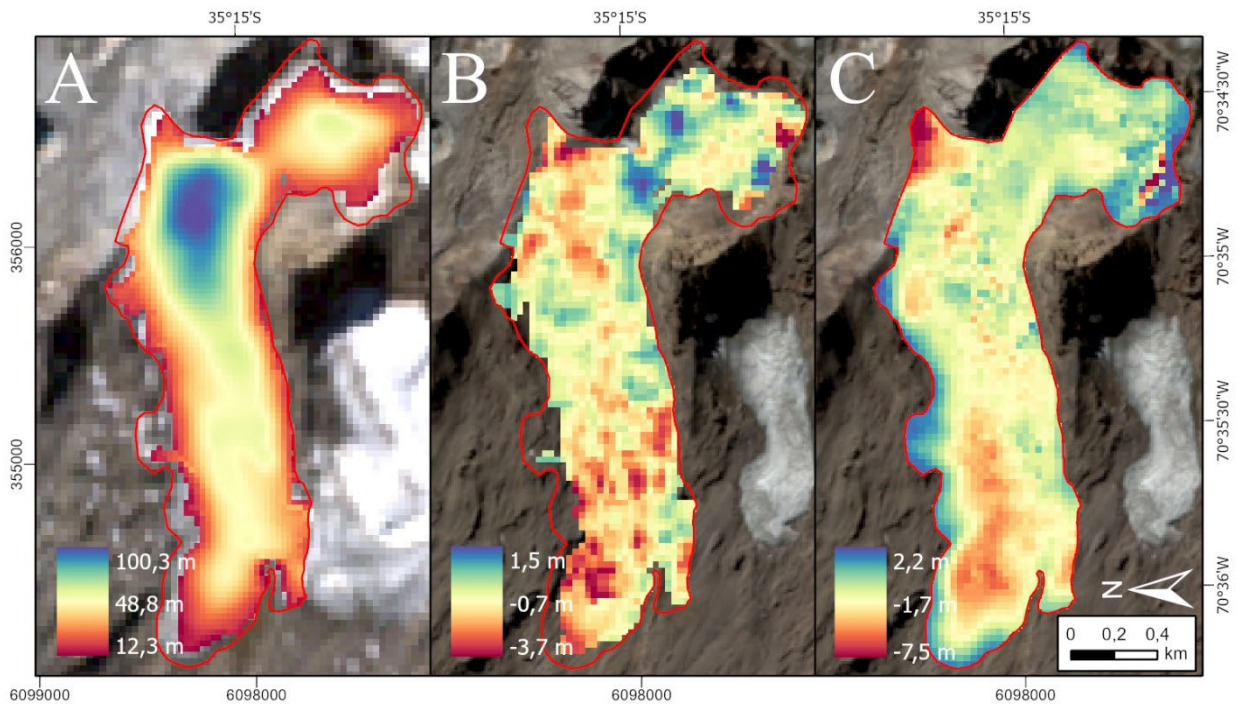
#### **6.3.2 Cálculos de volumen**

Según los resultados presentados, el glaciar VPPS desaparecerá en un tiempo mayor ( $14,3 \pm 3$  años), que el glaciar VPPN (12,2 años). Considerando que el glaciar VPPN es más grande que el glaciar VPPS, este resultado levanta ciertas dudas e indica que, posiblemente, los cálculos de volumen mediante la fórmula paramétrica de Chen & Ohmura (1990) están subestimando el volumen real.

Con miras a corroborar lo recién expuesto, se consultaron los trabajos de Farinotti et al. (2019), Braun et al. (2019) y Dussaillant et al. (2019) (Figura 66). A partir del primer trabajo, se encuentra un espesor promedio de 48,8 m en el año 2000, superior a los 36,6 m encontrados utilizando la ecuación de Chen & Ohmura (1990). Del mismo modo, Braun et al. (2019) encontraron una tasa de ablación promedio de -0,7 m w.e. anuales para el periodo 2000 – 2011/2014, mientras que Dussaillant et al. (2019) encontraron -1,7 m w.e. para el periodo 2000 – 2018. Ambos trabajos indicarían una tasa de ablación superior a la encontrada utilizando el método de Chen & Ohmura (1990) (-0,4 m w.e.), incluso el de Braun et al. (2019), que abarca solo el comienzo de la megasequía. Esto también indicaría que los cálculos de espesores mediante la ecuación propuesta por dichos autores serían subestimaciones del espesor real.

Según esto, es de esperar que el glaciar VPPN desaparecerá en un tiempo mayor que los 12,2 años indicados en la sección de resultados, lo cual podría afectar el resultado del RD. Sin embargo, es necesario mencionar que la fórmula paramétrica propuesta por Chen & Ohmura (1990) no fue diseñada para estimar balances de masa y el único motivo por el cual se utilizó para dichos fines en el presente trabajo es debido a la inexistencia de DEM's recientes del glaciar VPPN.

Del mismo modo, es probable que los volúmenes totales extraídos del inventario, los cuales fueron calculados a partir de la misma ecuación, también sean subestimaciones de los volúmenes reales.



**Figura 66:** A) Espesor en el año 2000 según Farinotti et al. (2019). B) Cambio de elevación anual para el periodo 2000 – 2011/2014 según Braun et al. (2019). C) Cambio de elevación anual para el periodo 2000 – 2018 según Dussailant et al. (2019). El polígono rojo marca la extensión del glaciar en el año 2000. Imágenes base: Landsat ETM+ *pansharpened*.con fecha 09 de abril del 2000 y Sentinel 2 con fecha 17 de abril 2022.

### 6.3.3 Relevancia del análisis del especialista

Tal como se mencionó en el apartado 5.1.4.1, los resultados de la evaluación cuantitativa deben ser analizados por el especialista que condujo el estudio y no pueden basarse únicamente en los resultados de la evaluación cuantitativa. Esto producto de que esta última ha sido diseñada para ser considerada como un apoyo para la propuesta de estrategias y no como un indicador absoluto. Un buen ejemplo respecto a la relevancia del análisis del especialista se da en las propuestas de uso que se dieron para el VPPS y VPPN. Dado que el VPPS tuvo un Valor de Uso mayor que el VPPN, de basarse únicamente en la evaluación cuantitativa deberían haberse sugerido más o mayores usos para el glaciar VPPS. No obstante, para el primero se descartó cualquier tipo de uso, mientras que para el VPPN se sugirió el desarrollo de actividades turísticas. Es solo gracias al análisis cualitativo realizado por el especialista que se sabe que, si bien el glaciar VPPN posee grietas y es menos seguro para su progresión, estas se ubican únicamente en una porción acotada



del glaciar y pueden ser fácilmente evadidas. O que, a pesar de tener menor potencial interpretativo, tiene un mayor valor estético y, por lo mismo, mejor capacidad para atraer turistas.

Otro ejemplo importante reside en la Peligrosidad Asociada Ex Situ, que para ambos glaciares resultó ser baja. Si bien los dos glaciares arrojaron elevados puntajes en el parámetro “lahares”, esto no se ve reflejado en la métrica final de peligrosidad producto de la ponderación de los distintos parámetros. A pesar de ello, la probabilidad de que se genere un lahar en la ladera poniente del CVPPA no es despreciable y puede afectar localidades ubicadas aguas abajo, en particular la localidad de Los Queñes.

Lo recién mencionado vuelve a dar énfasis a la sugerencia de aplicar la metodología habiendo visitado el o los glaciares que se deseen evaluar, ya que este análisis cualitativo del especialista se ve facilitado por observaciones y percepciones que son solo posibles de adquirir mediante observaciones directas.

## 7. CONCLUSIONES

Fue posible diseñar una metodología para la evaluación de glaciares basándose en metodologías para la evaluación del patrimonio geológico. La metodología es una herramienta que permite el diseño de estrategias de gestión que, a su vez, facilitan la gestión y planificación territorial.

La metodología puede ser aplicada de manera remota, sin embargo, se debe incurrir en aproximaciones que disminuyen considerablemente la precisión de los resultados. Por ello, se sugiere realizar campañas de campo en caso de ser posible.

La evaluación cuantitativa de un glaciar es representativa de ese glaciar y sucesivamente menos representativa para glaciares de distinto tamaño, con distinta orientación, de distinta clasificación, ubicados en otro lugar, etc. En base a esto, se sugiere evaluar cuantitativamente tantos glaciares como sea necesario o, al menos, evaluar todos los glaciares para los cuales se busca generar estrategias de gestión.

El territorio del Geoparque Pillanmapu cuenta con 131 glaciares superiores a 0,01 km<sup>2</sup> de superficie, de los cuales 76 corresponden a glaciaretos, 32 a glaciares rocosos y 23 a glaciares de montaña. Estos suman una superficie total de 19,61 km<sup>2</sup>, que se dividen en 2,57 km<sup>2</sup>, 4,5 km<sup>2</sup> y 12,54 km<sup>2</sup> respectivamente. De los 131 glaciares, 20 glaciaretos y 3 glaciares de montaña se encuentran bajo protección al estar dentro del polígono del Santuario de la Naturaleza “Cajón del Río Achibueno”. Estos 23 glaciares suman una superficie total de 2,34 km<sup>2</sup>, lo que representa un 11,9% de la superficie englaciada total. A su vez, 74 glaciares, integrados por 19 glaciares de montaña, 42 glaciaretos y 13 glaciares rocosos se encuentran dentro de alguno de los complejos volcánicos presentes en la zona de estudio. Esto suma una superficie total de 14,82 km<sup>2</sup>, lo que representa el 75,6% de la superficie total englaciada. Los glaciares del territorio del Geoparque Pillanmapu han retrocedido de manera sostenida desde, al menos, la década de los años 50. Se infiere una tasa de pérdida de superficie englaciada y de volumen de -1,1 km<sup>2</sup> anuales y -0,02 km<sup>3</sup> anuales respectivamente.

Tanto el glaciar VPPS como el VPPN tienen un Valor de Uso (VU) alto, sin embargo, se descarta realizar visitas educativas en ninguno de los dos y se sugiere realizar visitas turísticas guiadas exclusivamente en el VPPN. Este último es un mejor candidato por tener un mayor valor estético,

por ilustrar mejor la interacción glacio-volcánica que se da en el sector y por conducir, de manera relativamente segura, a la caldera del Vn. Peteroa, donde es posible apreciar fumarolas, cráteres, cuevas de hielo, entre otros. Se debe tomar los resguardos necesarios en visitas invernales, cuando las grietas de la cabecera están cubiertas por nieve.

El glaciar VPPS tiene un Valor Científico (VC) bajo, mientras que el VPPN tiene un VC medio y, dada su ubicación, puede ser un buen candidato para estudios que busquen comprender mejor las interacciones glacio – volcánicas de los Andes Centrales.

Ninguno de los glaciares posee una Peligrosidad Asociada (PA) que sea fuente de preocupación para las comunidades ubicadas aguas abajo. El glaciar VPPS tampoco posee mayores riesgos para visitas. El glaciar VPPN debe ser visitado tomando los resguardos necesarios, sobre todo en invierno, cuando las laderas empinadas que lo rodean pueden ser propensas a generar avalanchas y cuando las grietas de su cabecera pueden estar cubiertas por nieve.

Ambos glaciares tienen elevados Riesgos de Degradación (RD). El glaciar VPPS ha perdido, en promedio,  $-1,6 \pm 0,2$  m w.e. anuales desde el año 2000 al año 2022. De mantenerse las tendencias actuales, es probable que este desaparezca durante el transcurso de la siguiente década. Ninguno de los glaciares de la región del Maule está bajo amenazas de origen antrópico y, por lo tanto, no existen medidas directas para mitigar su RD. Se sugiere realizar estudios de aportes hídricos que generan los glaciares del CVPPA con miras a proyectar escenarios hídricos para las comunas afectadas.

En base a las evaluaciones cuantitativas y posterior análisis, se sugiere considerar exclusivamente al glaciar VPPN como geosítio del proyecto Geoparque Pillanmapu, dejando de lado al glaciar VPPS. A su vez, dado el marcado carácter glacio – volcánico que se desarrolla en el sector, se sugiere integrar al glaciar VPPN a la lista oficial de geosítios de la Sociedad Geológica de Chile.

## BIBLIOGRAFÍA

- Aguilera, F., Benavente, Ó., Gutiérrez, F., Romero, J., Saltori, O., González, R., Agosto, M., Caselli, A., & Pizarro, M. (2016). Actividad eruptiva del volcán Planchón-Peteroa durante el período 2010-2011, Zona Volcánica de los Andes del Sur, Chile. *Andean Geology*, 43(1), 20–46. <https://doi.org/10.5027/andgeoV43n1-a02>
- Aguirre, L., Calderón, S., Vergara, M., Oliveros, V., Morata, D., & Belmar, M. (2009). Edades isotópicas de rocas de los valles Volcán y Tinguiririca, Chile central. *En actas del XII Congreso Geológico Chileno*. Actas S8-001 (digital) (4 p).
- Alfaro, A. & Sepúlveda, N. (2015). Síntesis metodológica para la evaluación de sitios con interés geológico-patrimonial en Chile. *En actas del XIV Congreso Geológico Chileno*, AT4, SIM5.
- Andrasanu, A. (2006). Basic concepts in geoconservation. *Mesozoic and Cenozoic vertebrates and Paleoenvironments*. 10, 37–41.
- Arcos, R. (1987). Geología del cuadrángulo Termas del Flaco, provincia de Colchagua, VI región, Chile. Memoria de Título, Universidad de Chile, Departamento de Geología.
- Arellano, P. (2019). Petrogénesis del magmatismo Eoceno-Mioceno en Chile entre los 34°45'-35°15'S: implicancias en la configuración y evolución paleogeográfica de la región. Tesis de Magíster, Universidad de Chile, Departamento de Geología.
- Astaburuaga, D. (2014). Evolución Estructural Del Límite Mesozoico-Cenozoico de la cordillera principal entre 35°30' y 36°S, Región del Maule, Chile. Memoria de Título, Universidad de Chile, Departamento de Geología.
- Bahr, D., Pfeffer, W., Sassolas, C., & Meier, M. (1998). Response time of glaciers as a function of size and mass balance: 1. Theory. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 103(B5), 9777-9782. <https://doi.org/10.1029/98JB00507>
- Bamber, J. & Rivera, A. (2007). A review of remote sensing methods for glacier mass balance determination. *Global and Planetary Change*, 59(1–4), 138–148. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2006.11.031>
- Benado, J., Hervé, F., Schilling, M., & Brilha, J. (2019). Geoconservation in Chile: State of the Art and Analysis. *Geoheritage*, 11(3), 793–807. <https://doi.org/10.1007/s12371-018-0330-z>
- Braun, M., Malz, P., Sommer, C., Fariás-Barahona, D., Sauter, T., Casassa, G., Soruco, A., Skvarca, P., & Seehaus, T. (2019). Constraining glacier elevation and mass changes in South America. *Nature Climate Change*, 9(2), 130–136. <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0375-7>
- Brilha, J. (2016). Inventory and Quantitative Assessment of Geosites and Geodiversity Sites: a Review. *Geoheritage*, 8(2), 119–134. <https://doi.org/10.1007/s12371-014-0139-3>
- Bruschi, V., Cendrero, A., & Albertos, J. (2011). A statistical approach to the validation and optimisation of geoheritage assessment procedures. *Geoheritage*, 3(3), 131–149. <https://doi.org/10.1007/s12371-011-0038-9>
- Carcavilla, L. (2007). Patrimonio geológico y geodiversidad: investigación, conservación, gestión y relación con los espacios naturales protegidos. Tesis Doctoral, Universidad Autónoma de Madrid, Departamento de Química Agrícola.

- Urquí, L. (2014). Guía Práctica para entender el patrimonio geológico. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 22(1), 5-5.
- Carey, M. (2005). Living and dying with glaciers: People's historical vulnerability to avalanches and outburst floods in Peru. *Global and Planetary Change*, 47(2-4), 122–134. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2004.10.007>
- Charrier, R., Baeza, O., Elgueta, S., Flynn, J., Gans, P., Kay, S., Muñoz, N., Wyss, A., & Zurita, E. (2002). Evidence for Cenozoic extensional basin development and tectonic inversion south of the flat-slab segment, southern Central Andes, Chile (33°-36°S.L.). *Journal of South American Earth Sciences*, 15(1), 117–139. [https://doi.org/10.1016/S0895-9811\(02\)00009-3](https://doi.org/10.1016/S0895-9811(02)00009-3)
- Charrier, R., Farías, M., & MaksaeV, V. (2009). Evolución tectónica, paleogeográfica y metalogénica durante el Cenozoico en los Andes de Chile norte y central e implicaciones para las regiones adyacentes de Bolivia y Argentina. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 65(1), 5-35.
- Charrier, R., Pinto, L., & Rodríguez, M. P. (2007). Tectonostratigraphic evolution of the Andean Orogen in Chile. *The Geology of Chile*, 21-114. <https://doi.org/10.1144/GOCH.3>
- Charrier, R., Wyss, A., Flynn, J., Swisher, C., Norell, M., Zapatta, F., McKenna, M., & Novacek, M. (1996). New evidence for Late Mesozoic-Early Cenozoic evolution of the Chilean Andes in the Upper Tinguiririca Valley (35°s), central Chile. *Journal of South American Earth Sciences*, 9(5–6), 393–422. [https://doi.org/10.1016/s0895-9811\(96\)00035-1](https://doi.org/10.1016/s0895-9811(96)00035-1)
- Cuffey, K., & Paterson, W. (2010). *The physics of glaciers*. Academic Press.
- Dall'Asta, E., Forlani, G., Roncella, R., Santise, M., Diotri, F., & Morra di Cella, U. (2016). Unmanned Aerial Systems and DSM matching for rock glacier monitoring. *Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 127, 102–114. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2016.10.003>
- Davidson, J., & Vicente, J. (1973). Características paleogeográficas y estructurales del área fronteriza de las nacientes del Teno (Chile) y Santa Elena (Argentina) (Cordillera Principal, 35° a 35° 15' latitud sur). *En actas del V Congreso Geológico Argentino*, 11-55.
- Drake, R. (1976). Chronology of cenozoic igneous and tectonic events in the central Chilean Andes - latitudes 35° 30' to 36°S. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 1(3), 265–284. [https://doi.org/10.1016/0377-0273\(76\)90011-1](https://doi.org/10.1016/0377-0273(76)90011-1)
- Dungan, M., Wulff, A., & Thompson, R. (2001). Eruptive stratigraphy of the Tatara-San Pedro complex, 36°S, Southern Volcanic Zone, Chilean Andes: Reconstruction Method and Implications for Magma Evolution at Long-lived Arc Volcanic Centers. *Journal of Petrology*, 42(3), 555–626. <https://doi.org/10.1093/petrology/42.3.555>
- Durán, J., Cuenca, J. y López-Martínez, J. (1996). Un ejemplo de sistematización e inventario del patrimonio geológico: el patrimonio kárstico de la provincia de Málaga. *Geogaceta*, 19, 224-227.
- Dussaillant, I., Berthier, E., Brun, F., Masiokas, M., Hugonnet, R., Favier, V., Rabatel, A., Pitte, P., & Ruiz, L. (2019). Two decades of glacier mass loss along the Andes. *Nature Geoscience*, 12(10), 802–808. <https://doi.org/10.1038/s41561-019-0432-5>

- Evans, S., Bishop, N., Smoll, L., Murillo, P., Delaney, K., & Oliver-Smith, A. (2009). A re-examination of the mechanism and human impact of catastrophic mass flows originating on Nevado Huascarán, Cordillera Blanca, Peru in 1962 and 1970. *Engineering Geology*, 108(1-2), 96-118.
- Espizua, L., & Pitte, P. (2009). The little ice age glacier advance in the Central Andes (35 S), Argentina. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 281(3-4), 345-350.
- Farías-Barahona, D., Ayala, Á., Bravo, C., Vivero, S., Seehaus, T., Vijay, S., Schaefer, M., Buglio, F., Casassa, G., & Braun, M. (2020). 60 years of glacier elevation and mass changes in the Maipo River Basin, central Andes of Chile. *Remote Sensing*, 12(10). <https://doi.org/10.3390/rs12101658>
- Farinotti, D., Huss, M., Fürst, 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(3), 168–173. <https://doi.org/10.1038/s41561-019-0300-3>
- Fassoulas, C., Mouriki, D., Dimitriou-Nikolakis, P., & Iliopoulos, G. (2011). Quantitative Assessment of Geotopes as an Effective Tool for Geoheritage Management. *Geoheritage*, 4(3), 177–193. <https://doi.org/10.1007/s12371-011-0046-9>
- Fock, A. (2005). Cronología y tectónica de la exhumación en el neógeno de los Andes de Chile central entre los 33° y los 34°S. Tesis de Magister, Universidad de Chile, Departamento de Geología.
- Fugazza, D., Scaioni, M., Corti, M., D'Agata, C., Azzoni, R., Cernuschi, M., Smiraglia, C., & Diolaiuti, G. A. (2017). Combination of UAV and terrestrial photogrammetry to assess rapid glacier evolution and conditions of glacier hazards. *Natural Hazards and Earth System Sciences Discussions*, 1–61. <https://doi.org/10.5194/nhess-2017-198>
- Furbish, D., & Andrews, J. (1984). The use of hypsometry to indicate long-term stability and response of valley glaciers to changes in mass transfer. *Journal of glaciology*, 30(105), 199-211. <https://doi.org/10.3189/S0022143000005931>
- Gallego, E. y García Cortés, A. 1996. Patrimonio geológico y espacios naturales protegidos. *Geogaceta*, 19, 202-206.
- Gana, P., & Wall, R. (1997). Evidencias geocronológicas  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  y K-Ar de un hiatus cretácico superior-eoceno en Chile central (33-33° 30'S). *Revista Geológica de Chile*, 24(2), 145-163.
- Gao, J., & Liu, Y. (2001). Applications of remote sensing, GIS and GPS in glaciology: A review. *Progress in Physical Geography*, 25(4), 520–540. <https://doi.org/10.1177/030913330102500404>
- García-Cortés, Á., Carcavilla, L., Díaz-Martínez, E., & Vegas, J. (2013). *Documento metodológico para la elaboración del Inventario Español de Lugares de Interés Geológico (IELIG)*. Instituto Geológico y Minero de España.
- García-Cortés, Á., Carcavilla, L., Díaz-Martínez, E., & Vegas, J. (2014). *Documento metodológico para la elaboración del Inventario Español de Lugares de Interés Geológico (IELIG)*. Instituto Geológico y Minero de España.

- Gentle, P., & Maraseni, T. (2012). Climate change, poverty and livelihoods: Adaptation practices by rural mountain communities in Nepal. *Environmental Science and Policy*, 21, 24–34. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2012.03.007>
- González, A. 2008. Análisis estructural entre los valles del Río Tinguiririca y Teno, Cordillera Principal de Chile Central: Microsismicidad y Geología Superficial. Memoria de título, Universidad de Chile, Departamento de Geología.
- González, O., & Vergara, M. (1962). Reconocimiento geológico de la Cordillera de los Andes entre los paralelos 35 y 38 sur. *Anales de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas*, 19, 19.
- Hall, D., Riggs, G., & Salomonson, V. (1995). Development of methods for mapping global snow cover using moderate resolution imaging spectroradiometer data. *Remote sensing of Environment*, 54(2), 127-140. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(95\)00137-P](https://doi.org/10.1016/0034-4257(95)00137-P)
- Harrison, W., Elsberg, D., Echelmeyer, K., & Krimmel, R. (2001). On the characterization of glacier response by a single time-scale. *Journal of Glaciology*, 47(159), 659-664.
- Hauser, A. (2002). Rock avalanche and resulting debris flow in Estero Parraguire and Rio Colorado, Regio'n Metropolitana, Chile. Catastrophic landslides: effects, occurrence and mechanisms. *Engineering Geology*, 15, 135-148.
- Henry, P. (2019). Evolución geomorfológica del valle del indio, región del maule, chile: procesos glaciales y volcánicos. Memoria de título, Universidad de Concepción, Departamento de Ciencias de la Tierra.
- Hernández, R. (2020). Estado actual proyecto de Ley sobre Protección de Glaciares – Boletín N°11876-12. Fundación Glaciares Chilenos. <https://www.glaciareschilenos.org/ley-glaciar/estado-actual-proyecto-de-ley-sobre-proteccion-de-glaciares-boletin-n11876-12/>.
- Herr, L. (2014). Los Glaciares y su Protección Jurídica en Chile. Memoria de título, Universidad de Chile, Facultad de Derecho.
- Hevia, A. (2014). Evolución tectono-estratigráfica de depósitos cenozoicos en la cuenca del río Teno, vertiente occidental de la Cordillera Principal. Memoria de título, Universidad de Chile, Departamento de Geología.
- Hildreth, W., & Drake, R. (1992). Volcán Quizapu, Chilean Andes. *Bulletin of Volcanology*, 54(2), 93–125. <https://doi.org/10.1007/BF00278002>
- Hildreth, W., Godoy, E., Fierstein, J., & Singer, B. (2009). Laguna del Maule Volcanic Field: Eruptive history of a Quaternary basalt-to-rhyolite distributed volcanic field on the Andean rangecrest in central Chile. Servicio Nacional de Geología y Minería, Boletín 63.
- Huggel, C., Zraggen-Oswald, S., Haeberli, W., Käab, A., Polkvoj, A., Galushkin, I., & Evans, S. G. (2005). The 2002 rock/ice avalanche at Kolka/Karmadon, Russian Caucasus: assessment of extraordinary avalanche formation and mobility, and application of QuickBird satellite imagery. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 5(2), 173-187. <https://doi.org/10.5194/nhess-5-173-2005>
- Huss, M. (2013). Density assumptions for converting geodetic glacier volume change to mass change. *The Cryosphere*, 7(3), 877–887. <https://doi.org/10.5194/tc-7-877-2013>

- IPCC, 2022: Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press. In Press.
- Jóhannesson, T., Raymond, C., & Waddington, E. (1989). A simple method for determining the response time of glaciers. *Glacier fluctuations and climatic change*, 343-352. [https://doi.org/10.1007/978-94-015-7823-3\\_22](https://doi.org/10.1007/978-94-015-7823-3_22)
- Junkin, W., & Gans, P. (2019). Stratigraphy and geochronology of the Nacientes del Teno and Río Damas Formations: Insights into Middle to Late Jurassic Andean volcanism. *Geosphere*, 15(2), 450–479. <https://doi.org/10.1130/GES01698.1>
- Kääb, A., Reynolds, J., & Haeberli, W. (2005). Glacier and Permafrost Hazards in High Mountains. *Global Change and Mountain Regions*, 23, 225–234. [https://doi.org/10.1007/1-4020-3508-x\\_23](https://doi.org/10.1007/1-4020-3508-x_23)
- Kargel, J., Leonard, G., & Bishop, M. (2014). Global Land Ice Measurements from Space. *Global Land Ice Measurements from Space*. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-79818-7>
- Klohn, C. (1960). Geología de la Cordillera de los Andes de Chile Central, provincias de Santiago, O'Higgins, Colchagua y Curicó. Instituto de Investigaciones Geológicas, Boletín 8, 98.
- Larson, R. (1991). Geological consequences of superplumes. *Geology*, 19(10), 963-966. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1991\)019<0963:GCOS>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1991)019<0963:GCOS>2.3.CO;2)
- Ley de protección de glaciares – Los principales hitos que han marcado su tramitación (2020). Centro de Estudios de Montaña (CEM). <https://www.cem-fundacion.cl/ley-de-proteccion-de-glaciares-los-principales-hitos-que-han-marcado-su-tramitacion/>
- Marangunic, C., Marangunic, P., & González, P. (2008). Manual de Glaciología. Dirección General de Aguas.
- Martínez, O. (2008). Patrimonio Geológico. Identificación, Valoración y Gestión de Sitios de Interés Geológico. [http://www.fuentesmemoria.fahce.unlp.edu.ar/art\\_revistas/pr.3748/pr.3748.pdf](http://www.fuentesmemoria.fahce.unlp.edu.ar/art_revistas/pr.3748/pr.3748.pdf)
- Martinez, R., & Osorio, R. (1963). Consideraciones preliminares sobre la presencia de carófitas fósiles en la Formación Colimapu. *Minerales*, 82, 27-42.
- Menzies, J. (1995), Modern Glacial Environments: Processes, Dynamics and Sediments: Glacial Environments, Butterworth-Heinemann, Oxford, UK. <https://doi.org/10.1029/96EO00096>
- Milner, A., Khamis, K., Battin, T., Brittain, J., Barrand, N., Füreder, L., ... & Brown, L. (2017). Glacier shrinkage driving global changes in downstream systems. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 114(37), 9770-9778. <https://doi.org/10.1073/pnas.1619807114>
- Mohanty, L., & Maiti, S. (2021). Probability of glacial lake outburst flooding in the Himalaya. *Resources, Environment and Sustainability*, 5. <https://doi.org/10.1016/j.resenv.2021.100031>

- Mosolf, J., Gans, P., Wyss, A., & Cottle, J. (2011). Detailed geologic field mapping and radiometric dating of the Abanico Formation in the Principal Cordillera, central Chile: Evidence of protracted volcanism and implications for Cenozoic tectonics. *AGU Fall Meeting Abstracts* (Vol. 2011, pp. V13C-2623).
- Mourgues, F., Schilling, M., & Castro, C. (2012). Propuesta de definición de los Contextos Geológicos Chilenos para la caracterización del patrimonio geológico nacional. *XIII Congreso Geológico Chileno*, 890–892.
- Mpodozis, C., & Mahlburg, S. (1990). Provincias magmaticas acidas y evolucion tectonica de Gondwana: Andes Chilenos (28-31°S). *Servicio Nacional de Geología y Minería*, 17(2), 153–180. <https://doi.org/10.5027/andgeoV17n2-a03>
- Mucivuna, V., Reynard, E., & Garcia, M. (2019). Geomorphosites Assessment Methods: Comparative Analysis and Typology. *Geoheritage*, 11(4), 1799–1815. <https://doi.org/10.1007/s12371-019-00394-x>
- Muñoz, M., Tapia, F., Persico, M., Benoit, M., Charrier, R., Farías, M., & Rojas, A. (2018). Extensional tectonics during Late Cretaceous evolution of the Southern Central Andes: Evidence from the Chilean main range at ~35°S. *Tectonophysics*, 744, 93–117. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2018.06.009>
- Noveroy, C. (1987) Chile. Inventario de glaciares de la hoya del río Mataquito. Dirección General de Aguas. <https://bibliotecadigital.ciren.cl/handle/20.500.13082/32669>
- Nye, J. (1960). The response of glaciers and ice-sheets to seasonal and climatic changes. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences*, 256(1287), 559-584. <https://doi.org/10.1098/rspa.1960.0127>
- Nyström, J., Vergara, M., Morata, D., & Levi, B. (2003). Tertiary volcanism during extension in the Andean foothills of central Chile (33 15'–33 45' S). *Geological Society of America Bulletin*, 115(12), 1523-1537. <https://doi.org/10.1130/B25099.1>
- Ohmura, A. & Chen, J. (1990). Estimation of Alpine glacier water resources and their change since the 1870s (Issue 193). *IAHS publ*, 193, 127-135.
- Osorio, E. (2013). Análisis multitemporal de glaciares descubiertos en la región del Maule, Chile. Tesis de magíster, Universidad de Talca, Facultad de Ciencias Forestales.
- Palomo, I. (2017). Climate Change Impacts on Ecosystem Services in High Mountain Areas: A Literature Review. *Mountain Research and Development*, 37(2), 179–187. <https://doi.org/10.1659/MRD-JOURNAL-D-16-00110.1>
- Pardo-Casas, F., & Molnar, P. (1987). Relative motion of the Nazca (Farallon) and South American plates since Late Cretaceous time. *Tectonics*, 6(3), 233-248.
- Pelto, M. S., & Hedlund, C. (2001). Terminus behavior and response time of North Cascade glaciers, Washington, USA. *Journal of Glaciology*, 47(158), 497-506. <https://doi.org/10.3189/172756501781832098>
- Pereira, P., Pereira, D., & Caetano Alves, M. (2007). Geomorphosite assessment in Montesinho Natural Park (Portugal). *Geographica Helvetica*, 62(3), 159–168. <https://doi.org/10.5194/gh-62-159-2007>



- Pérez, R. (2022). Zonificación de lugares de interés geológico de la Reserva Nacional Altos de Lircay y sus alrededores, región del Maule (35°30'S – 35°45'S): Una propuesta para el desarrollo del geoturismo maulino. Tesis de Magíster, Universidad Autónoma de Chile, Facultad de Arquitectura, Construcción y Medio Ambiente.
- Protección de Glaciares pasa a Comisión de Medio Ambiente. (2021). Senado. <https://www.senado.cl/noticias/glaciares/proteccion-de-glaciares-pasa-a-comision-de-medio-ambiente>
- Puratich, J. (2010). Influencia en el Desarrollo Glaciar en la Evolución Morfológica de la Alta Cordillera de los Andes en la Parte Norte de la Región del Maule. Memoria de título, Universidad de Chile, Departamento de Geología.
- Purdie, H. (2013). Glacier retreat and tourism: Insights from New Zealand. *Mountain Research and Development*, 33(4), 463–472. <https://doi.org/10.1659/MRD-JOURNAL-D-12-00073.1>
- Qin, D., Zhou, B., & Xiao, C. (2014). Progress in Studies of Cryospheric Changes and Their Impacts on Climate of China. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 53(9), 1689–1699. <https://doi.org/10.1007/s13351-014-4029-z>
- Quiroga, R. (2013). Análisis estructural de los depósitos cenozoicos de la cordillera Principal entre el cerro Provincia y el cordón el Quempo, Región Metropolitana, Chile (33°18' y 33°25'S). Memoria de título, Universidad de Chile, Departamento de Geología.
- Ramos, V. (1994). Terranes of Southern Gondwanaland and Their Control in the Andean Structure (30°–33°S Latitude). *Tectonics of the Southern Central Andes*, 249–261. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-77353-2\\_18](https://doi.org/10.1007/978-3-642-77353-2_18)
- Ramos, V., Cegarra, M. & Cristallini, E. (1996). Cenozoic tectonics of the High Andes of west-central Argentina (30-36°S latitude). *Tectonophysics* 259(1-3): 185-200.
- Rapalini, A. (2005). The accretionary history of southern South America from the latest Proterozoic to the Late Palaeozoic: Some palaeomagnetic constraints. *Geological Society Special Publication*, 246, 305–328. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.2005.246.01.12>
- Raper, S., & Braithwaite, R. (2009). Glacier volume response time and its links to climate and topography based on a conceptual model of glacier hypsometry. *The Cryosphere*, 3(2), 183-194. <https://doi.org/10.5194/tc-3-183-2009>
- Reinthal, J., Paul, F., Granados, H., Rivera, A., & Huggel, C. (2019). Area changes of glaciers on active volcanoes in Latin America between 1986 and 2015 observed from multi-temporal satellite imagery. *Journal of Glaciology*, 65(252), 542–556. <https://doi.org/10.1017/jog.2019.30>
- Reynard, E., Fontana, G., Kozlik, L., & Pozza, C. (2007). A method for assessing «scientific» and «additional values» of geomorphosites. *Geographica Helvetica*, 62(3), 148–158. <https://doi.org/10.5194/gh-62-148-2007>
- Reynard, E., Perret, A., Bussard, J., Grangier, L., & Martin, S. (2016). Integrated Approach for the Inventory and Management of Geomorphological Heritage at the Regional Scale. *Geoheritage*, 8(1), 43–60. <https://doi.org/10.1007/s12371-015-0153-0>

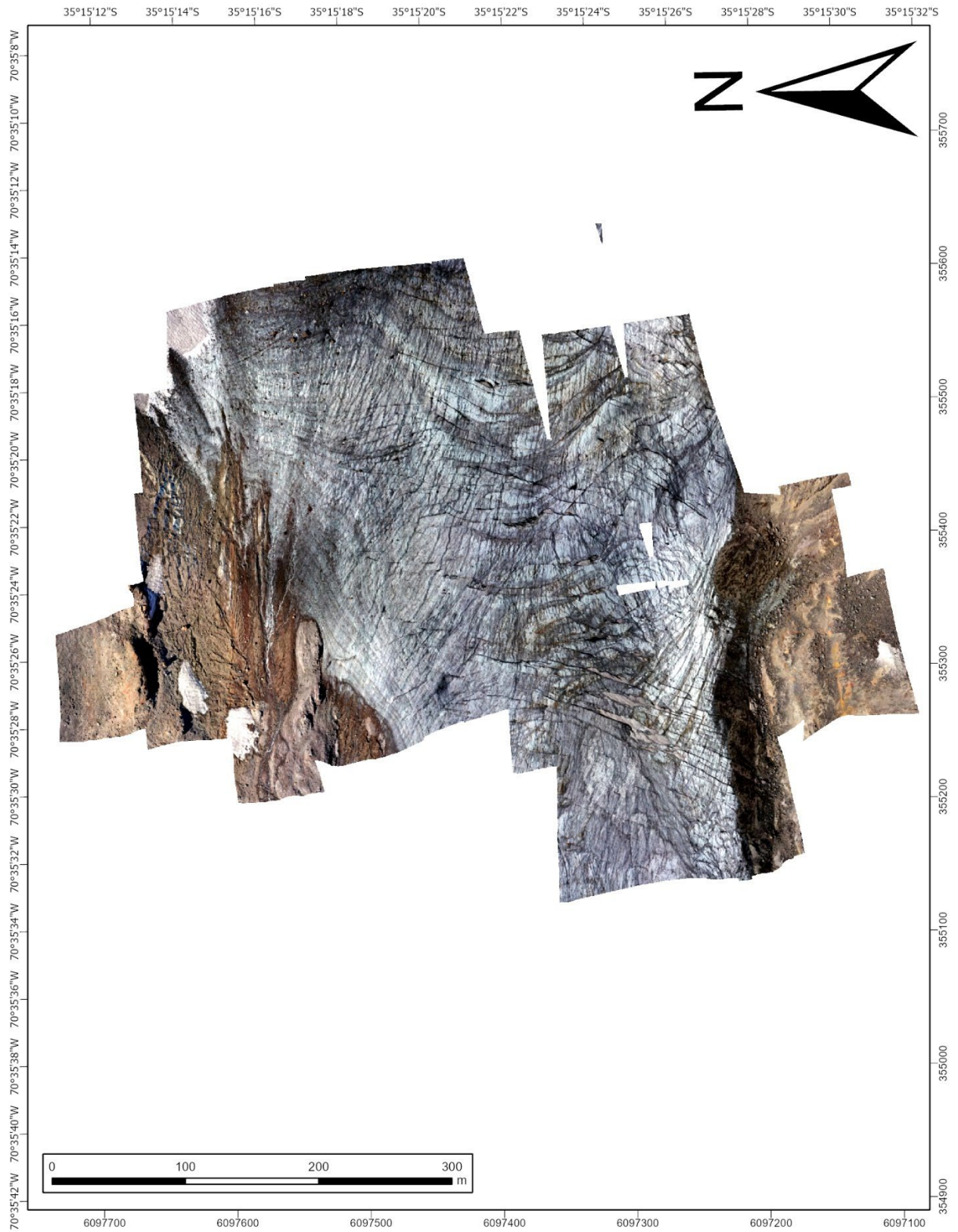
- RGI Consortium, 2017. Randolph Glacier Inventory - A Dataset of Global Glacier Outlines, Version 6. Boulder, Colorado USA. NSIDC: National Snow and Ice Data Center. doi: <https://doi.org/10.7265/4m1f-gd79>
- Ring, M., Lindner, D., Cross, E., & Schlesinger, M. (2012). Causes of the global warming observed since the 19th century. *Atmospheric and Climate sciences*, 2(04), 401. <http://dx.doi.org/10.4236/acs.2012.24035>
- Rivera, A., Bown, F., Bravo, C., Carrión, D., Casassa, G., Flores, C., López, P., Rada, C., Vivero, S., & Zenteno, P. (2009). Estrategia Nacional de Glaciares. Informe para Dirección General de Aguas -MOP.
- Rivera, A., Bown, F., Napoleoni, F., Muñoz, C., & Vuille, M. (2017). Manual Balance de Masa Glaciar. *Journal of Visual Languages & Computing*, 11(3), 207.
- Rivera, A., Cawkwell, F., Rada, C., & Bravo, C. (2011). Hypsometry. *Encyclopedia of Earth Sciences Series, Part 3*, 551–554. [https://doi.org/10.1007/978-90-481-2642-2\\_251](https://doi.org/10.1007/978-90-481-2642-2_251)
- Romero, J., Aguilera, F., Delgado, F., Guzmán, D., Van Eaton, A., Luengo, N., Caro, J., Bustillos, J., Guevara, A., Holbik, S., Tormey, D., & Zegarra, I. (2020). Combining ash analyses with remote sensing to identify juvenile magma involvement and fragmentation mechanisms during the 2018/19 small eruption of Peteroa volcano (Southern Andes). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 402. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2020.106984>
- Rossini, M., Di Mauro, B., Garzonio, R., Baccolo, G., Cavallini, G., Mattavelli, M., De Amicis, M., & Colombo, R. (2018). Rapid melting dynamics of an alpine glacier with repeated UAV photogrammetry. *Geomorphology*, 304(2018), 159–172. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2017.12.039>
- Salazar, C., & Stinnesbeck, W. (2016). Tithonian-Berriasian ammonites from the Baños del Flaco Formation, central Chile. *Journal of Systematic Palaeontology*, 14(2), 149–182. <https://doi.org/10.1080/14772019.2015.1027310>
- Santos, D., Mansur, K., Seoane, J., Mucivuna, V., & Reynard, E. (2020). Methodological Proposal for the Inventory and Assessment of Geomorphosites: An Integrated Approach focused on Territorial Management and Geoconservation. *Environmental Management*, 66(3), 476–497. <https://doi.org/10.1007/s00267-020-01324-2>
- Selles, D., & Hinojosa, L. (1997). Niveles sedimentarios y paleofloras del Oligoceno superior-Mioceno inferior en la Formación Abanico, noreste de Santiago. *VIII Congreso Geológico Chileno*, 80-584.
- Schilling, M., Mourgues, A., Contreras, K., Benado, J., & Partarrieu, D. (2015). Patrimonio geológico y su conservación en Chile: avances y perspectivas. *XIV Congreso Geológico Chileno*, 2011–2014.
- Schweizer, J., Bruce Jamieson, J., & Schneebeli, M. (2003). Snow avalanche formation. *Reviews of Geophysics*, 41(4). <https://doi.org/10.1029/2002RG000123>
- Sernageomin, S. (2003). Mapa Geológico de Chile: versión digital. Servicio Nacional de Geología y Minería, Publicación Geológica Digital, 4.

- Shakun, J., Clark, P., He, F., Lifton, N., Liu, Z., & Otto-Bliesner, B. (2015). Regional and global forcing of glacier retreat during the last deglaciation. *Nature Communications*, 6. <https://doi.org/10.1038/ncomms9059>
- Singer, B. S., Thompson, R. A., Dungan, M. A., Feeley, T. C., Nelson, S. T., Pickens, J. C., ... & Metzger, J. (1997). Volcanism and erosion during the past 930 ky at the Tatara–San Pedro complex, Chilean Andes. *Geological Society of America Bulletin*, 109(2), 127-142.
- Singh, V., Singh, P., & Haritashya, U. (2011). Encyclopedia Snow, Ice and Glaciers. *Journal of Visual Languages & Computing*, 11(3).
- Somoza, R. (1998). Updated Nazca (Farallon)-South America relative motions during the last 40 My: implications for mountain building in the central Andean region. *Journal of South American Earth Sciences*, 11(3), 211–215. [https://doi.org/10.1016/S0895-9811\(98\)00012-1](https://doi.org/10.1016/S0895-9811(98)00012-1)
- Sun, M., Ma, W., Yao, X., Zhao, L., Li, Z., & Qin, D. (2020). Evaluation and spatiotemporal characteristics of glacier service value in the Qilian Mountains. *Journal of Geographical Sciences*, 30(8), 1233–1248. <https://doi.org/10.1007/s11442-020-1779-7>
- Suzuki, D., & Takagi, H. (2018). Evaluation of Geosite for Sustainable Planning and Management in Geotourism. *Geoheritage*, 10(1), 123–135. <https://doi.org/10.1007/s12371-017-0225-4>
- Tapia, F. (2010). Análisis estructural del sector occidental de la faja plegada y corrida de Malargüe en el curso superior del Río Colorado de Lontué (35°18' y 35°23'S), Región del Maule, Chile. Memoria de título, Universidad de Chile, Departamento de Geología.
- Tapia, F. (2015). Evolución tectónica y configuración actual de los Andes Centrales del sur (34 45'-35 30'S). Tesis doctoral, Universidad de Chile, Departamento de Geología.
- Thiele, R. (1980). Carta Geológica de Chile: Hoja Santiago. Instituto de Investigaciones geológicas, (39), 51.
- Tormey, D. (2010). Managing the effects of accelerated glacial melting on volcanic collapse and debris flows: Planchon-Peteroa Volcano, Southern Andes. *Global and Planetary Change*, 74(2), 82–90. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2010.08.003>
- Trombotto, D. T., Penas, P., & Aloy, G. (2014). Impact of volcanic processes on the cryospheric system of the Peteroa Volcano, Andes of southern Mendoza, Argentina. *Geomorphology*, 208, 74-87. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2013.11.016>
- Ulloa, G. (2020). Evolución temporal de albedo en función de la variabilidad climática en glaciares de Los Andes semiáridos, zona Central de Chile. Memoria de Universidad de Chile, Departamento de Geología.
- USGS Landsat Program. (s.d.). Consultado el 12/15/2017, en USGS Landsat Program: <https://twitter.com/usgslandsat/status/837696716417687553>
- Vallance, J., & Iverson, R. (2015). Lahars and their deposits. *The encyclopedia of volcanoes*, 2, 649-664. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-385938-9.00037-7>
- Vergara, M. & Muñoz, B. 1982. La Formación Cola de Zorro en la alta Cordillera Andina chilena (36°-39° Lat. S), sus características petrográficas y petrológicas: una revisión. *Andean geology* 9(3).

- Vergara, M. & Munizaga, F. (1974). Age and evolution of the Upper Cenozoic andesitic volcanism in central-south Chile. *Geological Society of America Bulletin* 85(4), 603-606. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1974\)85<603:AAEOTU>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1974)85<603:AAEOTU>2.0.CO;2)
- Worni, R., Huggel, C., & Stoffel, M. (2013). Glacial lakes in the Indian Himalayas—From an area-wide glacial lake inventory to on-site and modeling based risk assessment of critical glacial lakes. *Science of the Total Environment*, 468, 71-84. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.11.043>
- Wyss, A., Flynn, J., Norell, M., Swisher, C., Novacek, M., McKenna, M., & Charrier, R. (1994). Paleogene mammals from the Andes of central Chile: a preliminary taxonomic, biostratigraphic, and geochronologic assessment. *American Museum of Natural History*. 3098, 31.
- Zhang, L., Wu, F., & Wang, Y. (2013). Quantitative evaluation of Geheritages in Bayan nur National Geopark. *Advanced Materials Research*, 726–731, 1162–1168. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.726-731.1162>

# ANEXOS

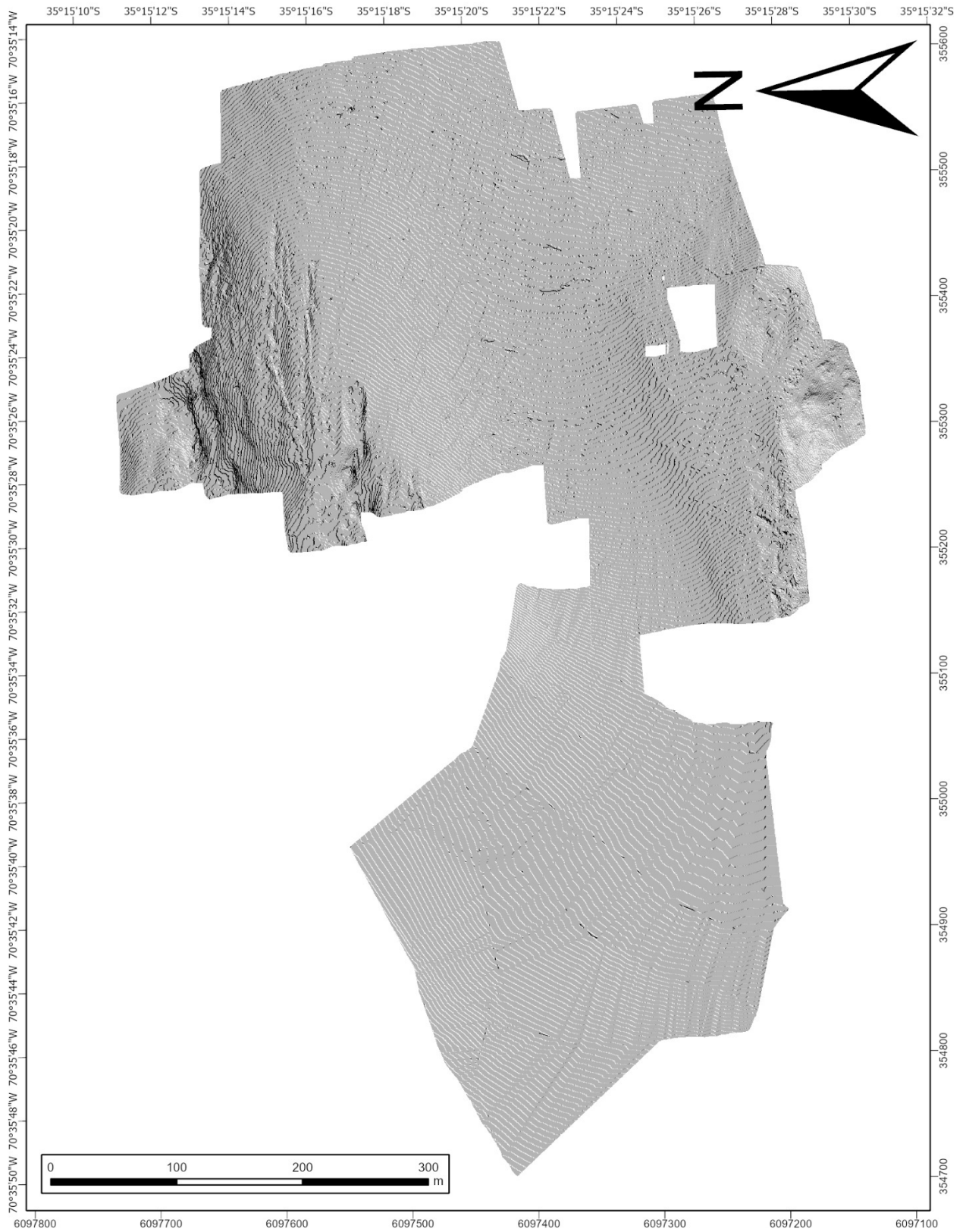
## Anexo A - Ortomosaico del glaciar VPPS 2021



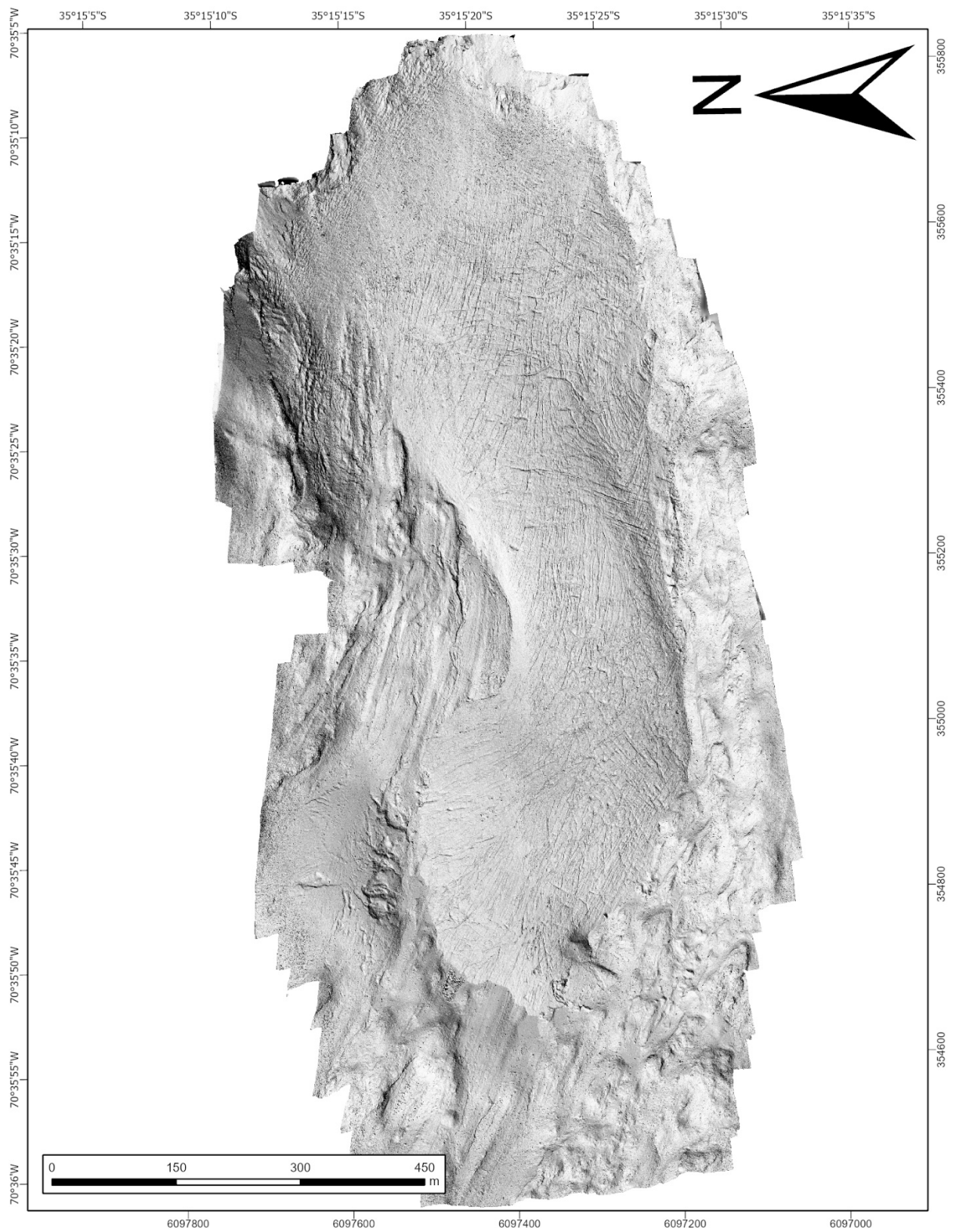
## Anexo B - Ortomosaico del glaciar VPPS 2022



## Anexo C - Modelo Digital de Elevación Sombreado del glaciar VPPS 2021



## Anexo D - Modelo Digital de Elevación Sombreado del glaciar VPPS 2022





## Anexo E - Decisiones para la cuantificación de los parámetros del glaciar VPPS

Valor de Uso			
Parámetro	Criterio	Explicación	
Accesibilidad 13%	Accesibilidad de aproximación	Camino apto para todo vehículo, excluyendo buses.	Se han observado todo tipo de vehículos, ascendiendo por la ruta J-585 (observaciones directas), sin embargo, algunos vehículos tienen dificultades para llegar hasta las lagunas. Curvas cerradas, pendientes y camino en mal estado no permiten el tránsito de buses.
	Accesibilidad de sendero	Dificultad media, para personas con buen estado físico y conocimientos básicos de montañismo.	La caminata hasta los glaciares es cansadora y larga. En planta son ~15 km y el desnivel acumulado es alto producto de un terreno sumamente ondulante. Antes del llegar a los glaciares hay unas pasadas complejas por la presencia de hielo, barro y roca en mal estado.
	Accesibilidad estacional	Visible solo durante dos estaciones del año.	Visible durante todo el verano, comienzos del otoño y fines de la primavera. El resto del año, la nieve dificulta la progresión y, además, tapa los glaciares.
Condiciones de observación 13%	Existen elementos que enmascaran el paisaje siendo necesario recorrer el lugar para observar el glaciar o su(s) elemento(s) de interés.	Determinado mediante observaciones directas en terreno.	
Potencial interpretativo 10%	El/los principal(es) elemento(s) de interés del glaciar ilustra(n) procesos que son fácilmente comprensibles por todo público.	Se consideró como elemento de interés la fuerte ablación que sufre el glaciar y el marcado retroceso que ha sufrido en las últimas décadas, lo cual se consideró como un concepto relativamente sencillo de entender que no requiere base teórica en ciencias.	
Valor estético 9%	Cumple con uno de los cuatro atributos mencionados previamente (gran parte de su superficie está descubierta o, en su defecto, está cubierto, pero se observan claros indicios de flujo)	El glaciar no posee ningún rasgo que lo haga atractivo estéticamente aparte de estar completamente descubierta.	
Limitaciones de uso 12%	Es posible realizar actividades de investigación (sondajes de hielo, instalación instrumentos, entre otros) y visitas al glaciar sin restricciones.	No hay limitaciones para realizar visitas o actividades de investigación.	
Seguridad 13%	Acercarse, subirse y recorrer el glaciar no supone mayores riesgos.	El glaciar no posee grietas grandes y la caída de material se restringe al sector de la cabecera.	
Proximidad a centros poblados 9%	Es necesario pernoctar una noche para llegar al glaciar desde el centro poblado más cercano.	El centro poblado más cercano es la localidad de Los Queñes, ubicada a 2 horas en automóvil de las Lagunas del Tenó. Desde ese punto se debe caminar hasta los glaciares y es necesario pernoctar una noche para llegar a ellos.	
Proximidad a centros turísticos 9%	Existen servicios turísticos, hoteles, restaurantes o cafeterías tal que es necesario pernoctar una noche para llegar al glaciar.	El centro turístico más cercano es la localidad de Los Queñes, ubicada a 2 horas en automóvil de las Lagunas del Tenó. Desde ese punto se debe caminar hasta los glaciares y es necesario pernoctar una noche para llegar a ellos.	
Número de habitantes en la comuna 6%	El glaciar se ubica en una comuna cuya densidad poblacional es menor a la mitad del promedio nacional.	Según el informe "Características demográficas y socioeconómicas comuna de Romeral", emitido por el Centro de Información de Recursos Naturales (CIREN), la comuna de Romeral tuvo una población de 16.370 el año 2021. Según el plan regulador emitido por el Gobierno Regional (GORE), la comuna de Romeral tiene una superficie de 1.597 km <sup>2</sup> . Esto entrega una densidad poblacional de 10,25 hab/km <sup>2</sup> . La densidad poblacional de Chile es de 25 hab/km <sup>2</sup> .	
Contexto socioeconómico 6%	El glaciar se ubica en una región con un ingreso per cápita menor al promedio nacional.	Según el Observatorio del Sistema Nacional de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación, el ingreso per capita de la región del Maule fue de 7,4 millones de pesos (última fecha disponible). Según el mismo instituto, el ingreso per capita de Chile fue de 12,2 millones de pesos para el mismo periodo.	

<b>Valor Científico</b>		
<b>Parámetro</b>	<b>Criterio</b>	<b>Explicación</b>
Representatividad 29%	Es un buen ejemplo a nivel regional para ilustrar o estudiar determinados procesos o rasgos glaciológicos, pero existen mejores opciones en la región.	Es un buen ejemplo para estudiar interacciones glacio - volcánicas, pero, debido a su ubicación, los glaciares que habitan la caldera del Vn. Peteroa o el glaciar VPPN son una mejor opción.
Rareza 23%	Los procesos o rasgos glaciológicos de interés científico que ilustra el glaciar son medianamente raros a nivel regional.	El CVPPA es el complejo volcánico más activo de la región entre aquellos que tienen glaciares. Sin embargo, existen otros glaciares en el mismo CVPPA que ilustran los mismos procesos.
Diversidad de elementos de interés 23%	El glaciar ilustra 2 procesos o rasgos de relevancia científica.	Fuerte retroceso glacial y tenue interacción glacio – volcánica.
Conocimiento científico 25%	No existen trabajos publicados del glaciar.	Existen algunos trabajos que lo mencionan (Osorio, 2013; Trombotto et al. 2014; Reinthaler et al., 2019), pero al ser trabajos incluyeron numerosos glaciares y donde el glaciar en cuestión no tuvo un rol preponderante, no fueron considerados.

<b>Riesgo de Degradación</b>			
<b>Categoría</b>	<b>Parámetro</b>	<b>Criterio</b>	<b>Explicación</b>
<b>Fragilidad 100%</b>	Hipsometría vs ELA 27%	La curva hipsométrica del glaciar en relación con la ubicación de la ELA es tal que un pequeño aumento de la ELA reduce significativamente la AAR o, en su defecto, la ELA se ubica por encima del glaciar.	Utilizando la línea de nieve como proxy de la ELA, se encontró, mediante observaciones directas en terreno, que esta última queda por encima del glaciar.
	Balace de masa 29%	De mantenerse la tendencia del balance de masa de las últimas dos décadas, el glaciar desaparecería en más de 1 y menos de 5 décadas.	De mantenerse la tendencia del balance de masa de las últimas dos décadas, el glaciar desaparecería en $14,3 \pm 3$ años.
	Tiempo de respuesta 24%	El glaciar tiene un tiempo de respuesta de 1 a 2 décadas.	El glaciar tiene un tiempo de respuesta de 10,6 años.
	Actividad volcánica 20%	El glaciar se ubica sobre o en las cercanías de una zona volcánica donde se han registrado erupciones en el último siglo.	El glaciar se ubica sobre el CVPPA, que hizo erupción por última vez en el 2018/2019.

<b>Peligrosidad Asociada</b>			
<b>Categoría</b>	<b>Parámetro</b>	<b>Criterio</b>	<b>Explicación</b>
<b>Peligros in situ</b> 43%	Grietas 30%	El glaciar solo posee grietas menores que no suponen mayor riesgo para la progresión.	Determinado mediante observaciones directas en terreno.
	Desprendimientos de material 35%	Los desprendimientos de material son poco frecuentes, se dan solo en algunas zonas del glaciar y están acotados a momentos específicos del día o estación del año.	El glaciar y las laderas que lo rodean tienen bajas pendientes, a excepción de las laderas de la cabecera.
	Avalanchas 35%	El glaciar, o bien las laderas que lo rodean, poseen una pendiente de 20 a 30°.	Se consideró la pendiente promedio, 21,4°. Si bien las laderas que rodean la cabecera tienen pendientes sobre los 30°, la mayor parte del glaciar tiene poca pendiente. Además, las laderas de la cabecera solo tienen nieve en los meses invernales.
<b>Peligros ex situ</b> 57%	Avalanchas de roca-hielo 26%	Cumple con dos de los cinco atributos mencionados previamente (es un sector donde pueden darse fuertes precipitaciones, o bien, anomalías térmicas importantes y se ubica en una zona sísmicamente activa).	Dada su ubicación, sobre un complejo volcánico con signos importantes de actividad como la erupción del 2018/2019, se consideró que pueden darse anomalías térmicas importantes que contribuyan a eventos de fuerte derretimiento de hielo.
	Surges 21%	No se han registrado eventos de tipo surge.	No existen registros de este tipo de eventos para el glaciar VPPS.
	GLOF's 28%	No hay lagos superiores a 0,01 km <sup>2</sup> asociados al glaciar (ni embalsado por el hielo ni por una morrena frontal).	El glaciar VPPS tiene una pequeña laguna proglacial que posee 1010 m <sup>2</sup> de extensión, muy por debajo del mínimo requerido.
	Lahares 25%	El glaciar se ubica sobre o en las cercanías de una zona volcánica donde, además, se cumple con dos de los cuatro atributos mencionados previamente (se han registrado erupciones en el último siglo y se tienen pendientes mayores a 25°).	La última erupción del CVPPA fue el 2018/2019 y se tienen pendientes superiores a 25° en algunos sectores de la cabecera del glaciar.

## Anexo F - Decisiones para la cuantificación de los parámetros del glaciar VPPN

Valor de Uso			
Parámetro	Criterio	Explicación	
Accesibilidad 13%	Accesibilidad de aproximación	Camino apto para todo vehículo, excluyendo buses.	Se han observado todo tipo de vehículos, ascendiendo por la ruta J-585 (observaciones directas), sin embargo, algunos vehículos tienen dificultades para llegar hasta las lagunas. Curvas cerradas, pendientes y camino en mal estado no permiten el tránsito de buses.
	Accesibilidad de sendero	Dificultad media, para personas con buen estado físico y conocimientos básicos de montañismo.	La caminata hasta los glaciares es cansadora y larga. En planta son ~15 km y el desnivel acumulado es alto producto de un terreno sumamente ondulante. Antes del llegar a los glaciares hay unas pasadas complejas por la presencia de hielo, barro y roca en mal estado.
	Accesibilidad estacional	Visible solo durante dos estaciones del año.	Visible durante todo el verano, comienzos del otoño y fines de la primavera. El resto del año, la nieve dificulta la progresión y, además, tapa los glaciares.
Condiciones de observación 13%	Existen elementos que enmascaran el paisaje siendo necesario recorrer el lugar para observar el glaciar o su(s) elemento(s) de interés.	Determinado mediante observaciones directas en terreno.	
Potencial interpretativo 10%	El/los principal(es) elemento(s) de interés del glaciar ilustra(n) procesos que son comprensibles para público con base teórica en ciencias.	Se consideró como elementos de interés la fuerte ablación que sufre el glaciar y su proximidad a un centro eruptivo activo. Se considera la ablación como un concepto relativamente sencillo de comprender, sin embargo, se consideró que los efectos de la interacción glacio – volcánica, como la potencial disminución del albedo producto de la cobertura por azufre y tefra, el aumento en la ablación producto de un mayor gradiente geotermal o las implicancias en el estilo eruptivo que pueden provocar la disponibilidad de agua en estado líquido, son conceptos que requieren de una base teórica en ciencias.	
Valor estético 9%	Cumple con tres de los cuatro atributos mencionados previamente (gran parte de su superficie está descubierta o, en su defecto, está cubierto, pero se observan claros indicios de flujo, posee elementos de interés visibles y llamativos, como rimayas, grietas, seracs, nunataks, morrenas, entre otros y posee una forma o tamaño que lo hacen llamativo.)	El glaciar está completamente descubierto. Posee grietas de tamaños métricos y está parcialmente cubierto por azufre. Es uno de los glaciares más grandes del sector, además de poseer una forma que suscita interés producto de la ablación que está ad portas de fragmentar la porción más elevada del glaciar del resto del cuerpo.	
Limitaciones de uso 12%	Es posible realizar actividades de investigación (sondajes de hielo, instalación instrumentos, entre otros) y visitas al glaciar sin restricciones.	No hay limitaciones para realizar visitas o actividades de investigación.	
Seguridad 13%	Acercarse y subirse al glaciar no supone mayores riesgos, pero existen riesgos al recorrerlo (grietas, desprendimientos, entre otros).	El glaciar posee grietas de tamaños métricos, localizadas principalmente en la cabecera, que pueden suponer riesgos para su progresión.	
Proximidad a centros poblados 9%	Es necesario pernoctar una noche para llegar al glaciar desde el centro poblado más cercano.	El centro poblado más cercano es la localidad de Los Queñes, ubicada a 2 horas en automóvil de las Lagunas del Tenó. Desde ese punto se debe caminar hasta los glaciares y es necesario pernoctar una noche para llegar a ellos.	
Proximidad a centros turísticos 9%	Existen servicios turísticos, hoteles, restaurantes o cafeterías tal que es necesario pernoctar una noche para llegar al glaciar.	El centro turístico más cercano es la localidad de Los Queñes, ubicada a 2 horas en automóvil de las Lagunas del Tenó. Desde ese punto se debe caminar hasta los glaciares y es necesario pernoctar una noche para llegar a ellos.	
Número de habitantes en la comuna 6%	El glaciar se ubica en una comuna cuya densidad poblacional es menor a la mitad del promedio nacional.	Según el informe “Características demográficas y socioeconómicas comuna de Romeral”, emitido por el Centro de Información de Recursos Naturales (CIREN), la comuna de Romeral tuvo una población de 16.370 el año 2021. Según el plan regulador emitido por el Gobierno Regional (GORE), la comuna de Romeral tiene una superficie de 1.597 km <sup>2</sup> . Esto entrega una densidad poblacional de 10,25 hab/km <sup>2</sup> . La densidad poblacional de Chile es de 25 hab/km <sup>2</sup> .	
Contexto socioeconómico 6%	El glaciar se ubica en una región con un ingreso per cápita menor al promedio nacional.	Según el Observatorio del Sistema Nacional de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación, el ingreso per capita de la región del Maule fue de 7,4 millones de pesos (última fecha disponible). Según el mismo instituto, el ingreso per capita de Chile fue de 12,2 millones de pesos para el mismo periodo.	

<b>Valor Científico</b>		
<b>Parámetro</b>	<b>Criterio</b>	<b>Explicación</b>
Representatividad 29%	Es un buen ejemplo a nivel nacional para ilustrar o estudiar determinados procesos o rasgos glaciológicos.	Producto de su cercanía a uno de los volcanes más activos del país (Peteroa) y debido a su ubicación de relativo fácil acceso, se consideró que es un buen ejemplo a nivel nacional para estudiar las interacciones glacio – volcánicas.
Rareza 23%	Los procesos o rasgos glaciológicos de interés científico que ilustra el glaciar son muy raros a nivel regional.	El CVPPA es el complejo volcánico más activo de la región entre aquellos que tienen glaciares. De los glaciares que se ubican en este complejo volcánico, el VPPN es uno de los más cercanos al centro eruptivo que ha mostrado la mayor actividad en los últimos años.
Diversidad de elementos de interés 23%	El glaciar ilustra 2 procesos o rasgos de relevancia científica.	Fuerte retroceso glacial y marcada interacción glacio – volcánica.
Conocimiento científico 25%	No existen trabajos publicados del glaciar.	Existen algunos trabajos que lo mencionan (Osorio, 2013; Trombotto et al. 2014; Reinthaler et al., 2019), pero al ser trabajos incluyeron numerosos glaciares y donde el glaciar en cuestión no tuvo un rol preponderante, no fueron considerados.

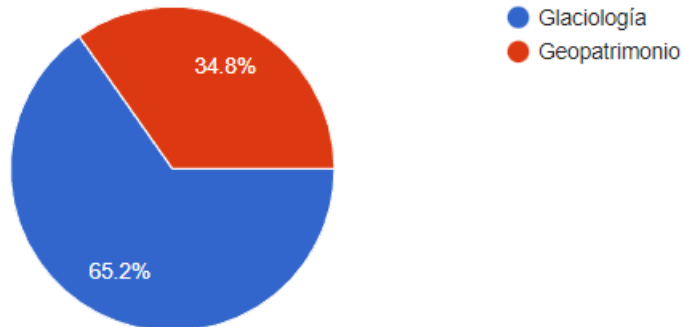
<b>Riesgo de Degradación</b>			
<b>Categoría</b>	<b>Parámetro</b>	<b>Criterio</b>	<b>Explicación</b>
<b>Fragilidad 100%</b>	Hipsometría vs ELA 27%	La curva hipsométrica del glaciar en relación con la ubicación de la ELA es tal que un pequeño aumento de la ELA reduce significativamente la AAR o, en su defecto, la ELA se ubica por encima del glaciar.	Utilizando la línea de nieve como proxy de la ELA, se encontró, mediante observaciones directas en terreno, que esta última queda por encima del glaciar.
	Balace de masa 29%	De mantenerse la tendencia del balance de masa de las últimas dos décadas, el glaciar desaparecería en más de 1 y menos de 5 décadas.	De mantenerse la tendencia del balance de masa de las últimas dos décadas, el glaciar desaparecería en 12,2 años.
	Tiempo de respuesta 24%	El glaciar tiene un tiempo de respuesta de 5 décadas a 1 siglo.	El glaciar tiene un tiempo de respuesta de 68,8 años.
	Actividad volcánica 20%	El glaciar se ubica sobre o en las cercanías de una zona volcánica donde se han registrado erupciones en el último siglo.	El glaciar se ubica sobre el CVPPA, que hizo erupción por última vez en el 2018/2019.

<b>Peligrosidad Asociada</b>			
<b>Categoría</b>	<b>Parámetro</b>	<b>Criterio</b>	<b>Explicación</b>
<b>Peligros in situ</b> 43%	Grietas 30%	El glaciar posee grietas lo suficientemente profundas y anchas como para suponer riesgo para la progresión, pero que en su mayoría son identificables y sorteables.	Determinado mediante observaciones directas en terreno.
	Desprendimientos de material 35%	Los desprendimientos de material son poco frecuentes, se dan solo en algunas zonas del glaciar y están acotados a momentos específicos del día o estación del año.	El glaciar y las laderas que lo rodean tienen bajas pendientes, a excepción de las laderas de la cabecera.
	Avalanchas 35%	El glaciar, o bien las laderas que lo rodean, poseen una pendiente de 10 a 20°.	Se consideró la pendiente promedio, 17,2°. Si bien las laderas que rodean la cabecera tienen pendientes sobre los 30°, la mayor parte del glaciar tiene poca pendiente. Además, las laderas de la cabecera solo tienen nieve en los meses invernales.
<b>Peligros ex situ</b> 57%	Avalanchas de roca-hielo 26%	Cumple con dos de los cinco atributos mencionados previamente (es un sector donde pueden darse fuertes precipitaciones, o bien, anomalías térmicas importantes y se ubica en una zona sísmicamente activa).	Dada su ubicación, sobre un complejo volcánico con signos importantes de actividad como la erupción del 2018/2019, se consideró que pueden darse anomalías térmicas importantes que contribuyan a eventos de fuerte derretimiento de hielo.
	Surges 21%	No se han registrado eventos de tipo surge.	No existen registros de este tipo de eventos para el glaciar VPPS.
	GLOF's 28%	No hay lagos superiores a 0,01 km <sup>2</sup> asociados al glaciar (ni embalsado por el hielo ni por una morrena frontal).	No hay existencia de lagunas asociadas al glaciar.
	Lahares 25%	El glaciar se ubica sobre o en las cercanías de una zona volcánica donde, además, se cumple con dos de los cuatro atributos mencionados previamente (se han registrado erupciones en el último siglo y se tienen pendientes mayores a 25°).	La última erupción del CVPPA fue el 2018/2019 y se tienen pendientes superiores a 25° en algunos sectores de la cabecera del glaciar.

## Anexo G - Respuestas de la primera encuesta

Seleccione la especialidad que mejor lo representa.

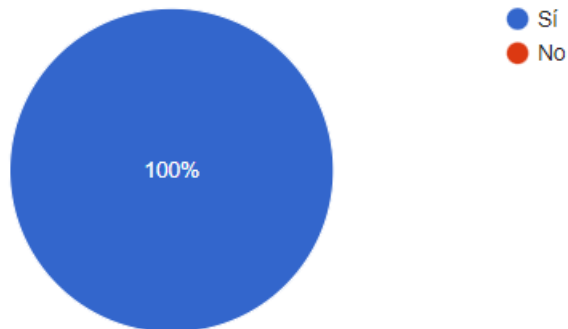
23 responses



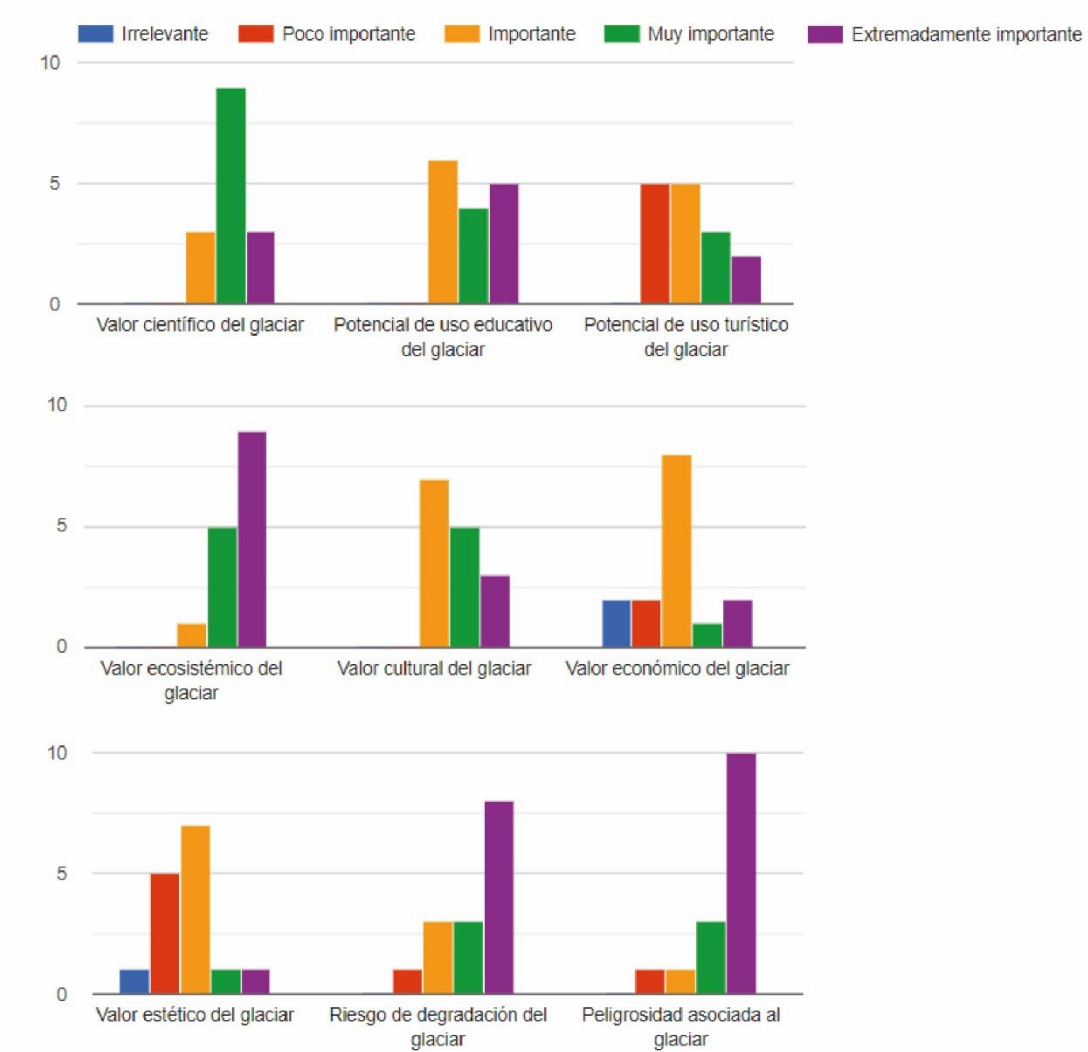
### Especialistas en glaciología

¿Considera importante evaluar el patrimonio glaciológico y los glaciares en general como insumo para la gestión y planificación territorial?

15 responses



La metodología incluirá una evaluación cuantitativa basada en el cálculo de distintos índices. Por favor, categorice los índices propuestos a continuación según la importancia que usted considere oportuna.





En relación con la pregunta anterior, indique métodos o técnicas que permitan medir, en alguna medida, los índices que catalogó como "extremadamente importante". En caso de que no haya catalogado ninguno como tal, puede proceder con aquellos catalogados como "muy importante".

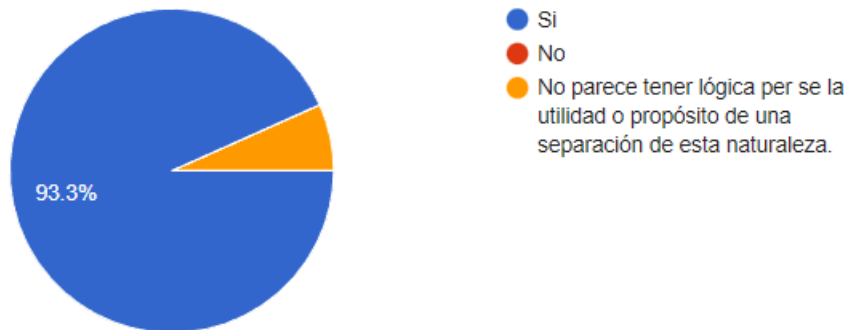
15 responses

Usando metodos de analisis de imagenes satelitales por cambios de superficie de los glaciares y tambien las geofomas que fueron y siguen formandose alrededor del glaciar para evaluar el impacto de cambios medioambientales en el sistema glaciologico. Eso puede generar informacion sobre riesgos etc. en el futuro.
Análisis integrado caso a caso y del sistema: variabilidad anual, estacional y por períodos.
Análisis de variaciones areales y modelos de estabilidad mecánica a partir de levantamientos topográficos y mediciones de espesor.
Investigación, monitoreo continuo multidisciplinario a nivel de cuenca y no sólo por único glaciar.
Referencias científicas (papers, reportes, etc). Fotografías e Imágenes satelitales, relatos de los conocedores del terreno.
cada especialista puede determinarlo. Incluso una encuesta a los habitantes cercanos es importante
Evaluación de peligros y riesgos geológicos asociados a glaciares, la especificidad de los items dependerán del tipo de glaciar a estudiar.
Determinación de balance de masa, balance de energía, modelos digitales de terreno, modelos de hidrología glaciar, uso de los recursos hídricos aguas abajo, historia de variaciones glaciares, procesos de colonización primaria, procesos de calving, biota asociada, cambios en el ambiente marino asociado cuando corresponda, etc. Todo a través de mediciones in situ y sensoramiento remoto.
Desconozco metodologías para evaluar esos criterios.
Sin respuesta
Sensores remotos satelitales, aerotransportados y terrestres, métodos geofísicos de prospección, mediciones directas

Quiero clarificar que respondi a los preguntas pensando en los glaciares del region de Coquimbo donde trabajo. Aqui los glaciares tienen mucho relevancia para los recursos hídricos, pero mucho menos relevancia como peligro comparado mas al sur. Tambien tome en cuenta la importancia de todo la ecosistema (e.g. nieve, bofedales, animales, etc.) respondiendo a las preguntas.
Metodos para medir los indices 1. Potencial de uso educativo del glaciar - hacer un actividad relacionado a los glaciares (e.g. "crear" un glaciar con hielo y barro (para un glaciar cubierto o rocoso), ir en un excursion a ver un glaciar, presentacion y interacion con un glaciologo) y despues hacer una encuesta para ver si los estudiantes les gustó la actividad y tienen ganas de aprender mas o hacer otro actividad similar, si la actividad despertó un curiosidad y animo de aprender dentro de ellos, si aprendieron algo interesante, y si tienen un deseo de visitar un glaciar y/o pretegerlo. 2. Riesgo de degradacion del glaciar - Los metodos mas comun son medir la balance de masa usando estacas en el glaciar, y medir cambios en la elevacion del glaciar atraves del tiempo que es un aproximacion del balance de masa. Si la balance tiene una tendencia negativa por muchos anos, esto nos dice que el glaciar esta en riesgo. Tambien se puede usar estos datos de balance de masa mas otros para modelar como el glaciar va cambiar en los proximos 50-100 anos.
Vigilancia meteorológica, hidrométrica y fotogramétrica de ambientes glaciares más amenazantes a población e infraestructura ya instalada en un área de influencia.
medir aporte hídrico, medir aporte de nutrientes
Metodologías de valoración de servicios ecosistémicos, tales como las revisadas en Pandeya et al. (2016); Análisis de peligros segun Huggel et al. (2003)

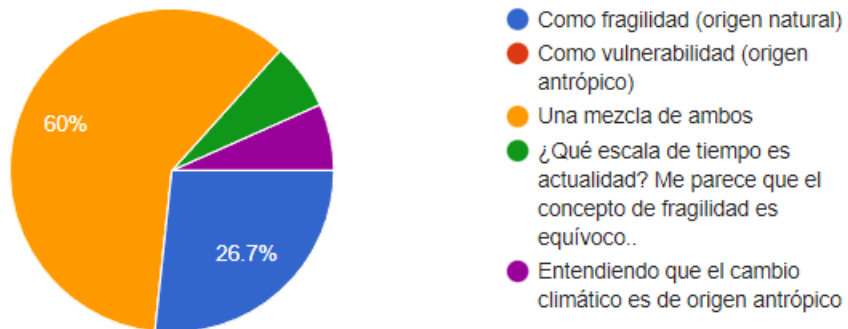
Algunas metodologías para la evaluación del geopatrimonio prefieren diferenciar el riesgo de degradación en 2 categorías distintas: la fragilidad, que se refiere al riesgo de degradación por procesos naturales, y la vulnerabilidad, que se refiere al riesgo de degradación por causas antrópicas. ¿Cree usted que es necesario diferenciar estas dos categorías para la evaluación del patrimonio glaciológico?

15 respuestas



En relación con la pregunta anterior, ¿cómo definiría el retroceso generalizado que están experimentando los hielos en la actualidad? (Por favor, omita casos particulares como glaciares ubicados en la cercanía de actividades antrópicas que los afectan y refiérase solamente al caso general de retroceso glacial).

15 respuestas



La metodología incluirá la generación de un inventario de los glaciares existentes en la zona de estudio. ¿Qué tamaño mínimo cree que deberían tener los glaciares inventariados?

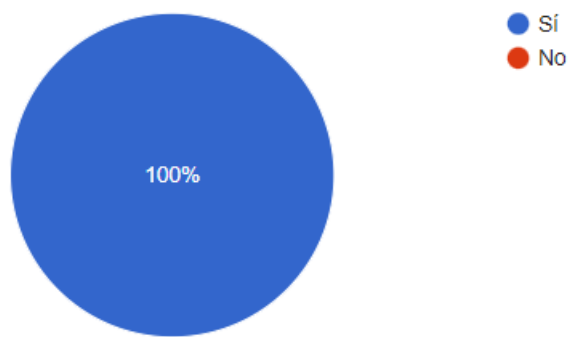
14 responses

el tamaño en cual se puede definir como un glaciar (flujo de hielo)
1 hectárea (0.01 km <sup>2</sup> )
0,01 hectáreas
Mayor 1hc
Si el glaciar se mueve debería ser considerado. Bajo 0.1 km <sup>2</sup> un glaciar no tiene suficiente masa y el hielo está estancado.
0.1 hectares (este valor esta alineado con lo que se considera "normal" a nivel internacional)
¿La zona de estudio es todo Chile? El tamaño mínimo debe ser el que pueda ser inventariado con rango de error aceptable según el tipo de base de dato a utilizar.
depende de la zona de interes 0.1 hectarea es un estandard internacional
1 hectárea (0,01 km <sup>2</sup> )
Todos son importantes, pero depende del objetivo de estudio. No olvidar los glaciares cubiertos o rocosos de la zona árida.
Consideraría los estandares nacionales e internacionales
0.7 km <sup>2</sup>
Todos los glaciares deberían ser inventariados
1 hectarea

## Especialistas en geopatrimonio

¿Considera importante evaluar el patrimonio glaciológico y los glaciares en general como insumo para la gestión y planificación territorial?

8 responses



Existen ciertos elementos de la geodiversidad que poseen metodologías de evaluación especializadas, tal como el patrimonio paleontológico y el geomorfológico. ¿Estima necesaria la generación de una metodología diseñada especialmente para la evaluación del patrimonio glaciológico? Por favor, explique brevemente su opinión.

7 responses

Si, ya que tiene elementos que no son considerados en las metodologías mencionadas y algunos parámetros no aplican a los glaciares. Aunque es probable existan puntos en común con las metodologías usadas para valorar p. Geomorfológico

Si, sobre todo considerando el contexto de cambio climático y peligro geológico asociado a estos elementos.

Sí, es necesaria. Pues, se requiere una de la herramienta con la que se pueda evaluar, gestionar y/o proteger el estado de este Patrimonio.

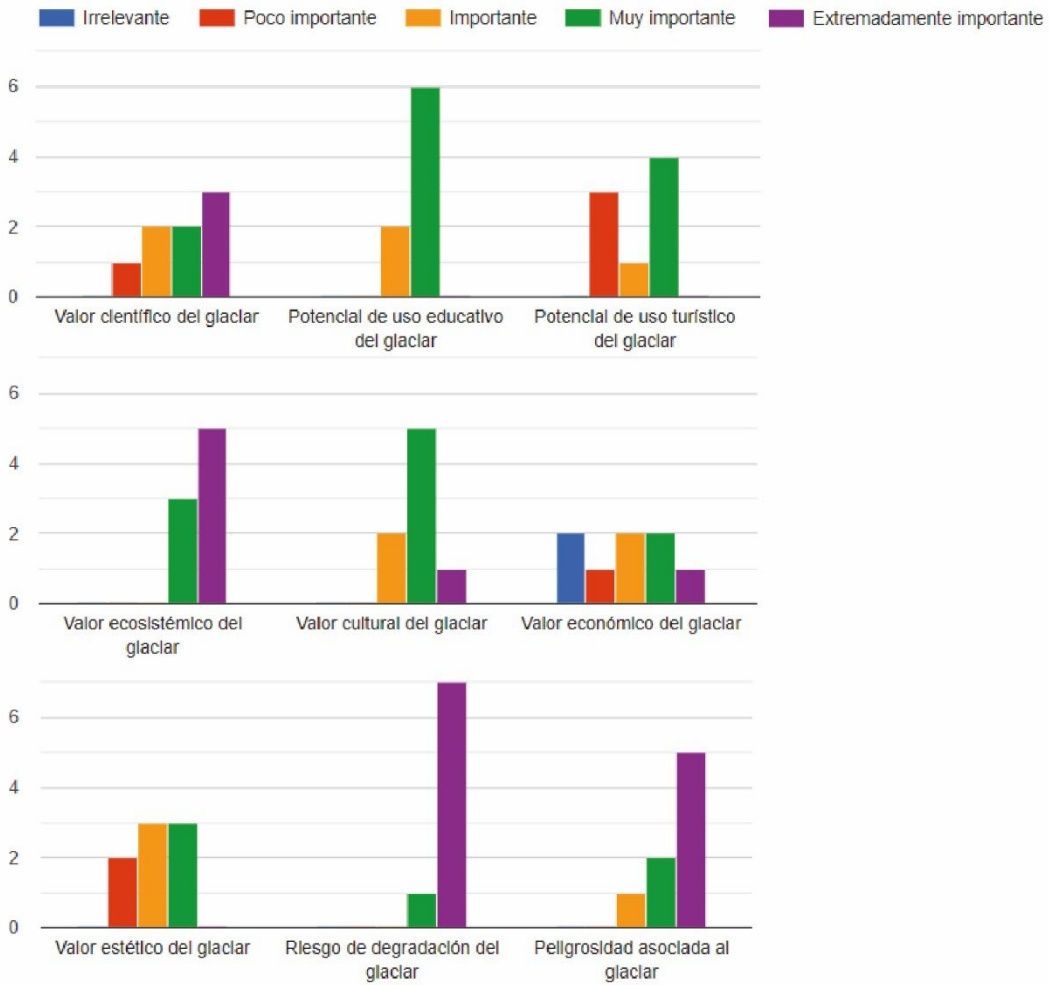
Si, puesto que el cambio climático hace urgente la gestión de estos recursos

Creo que sí, porque la criosfera es más que sólo los glaciares, incluye todo lo que se encuentra sobre la isoterma cero, por lo que se vinculan no solo criofomas sino toda una diversidad de elementos como permafrost y toda la biodiversidad asociada a los sistemas glaciocénicos

Considero que si. En tiempos donde se discute una nueva ley de protección total de glaciares, existen ciertas susceptibilidades respecto los conceptos que definen el área periglacial, los glaciares de roca, entre otros. Entonces tener una metodología especializada que lo evalúe podría ser muy poderoso para su protección.

Considero que se pueden utilizar metodologías para el patrimonio geológico. Igualmente, se podría diseñar una metodología particular para este caso, y antes revisar la bibliografía para saber si ya existe algo similar.

La metodología incluirá una evaluación cuantitativa basada en el cálculo de distintos índices. Por favor, categorice los índices propuestos a continuación según la importancia que usted considere oportuna.



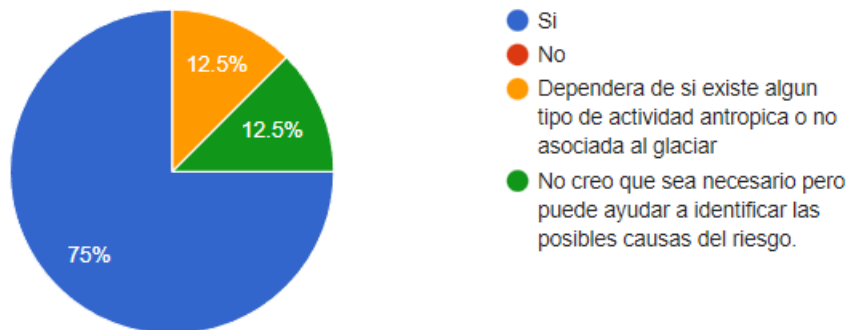
En relación con la pregunta anterior, indique métodos o técnicas que permitan medir, en alguna medida, los índices que catalogó como "extremadamente importante". En caso de que no haya catalogado ninguno como tal, puede proceder con aquellos catalogados como "muy importante".

8 responses

<p>En general para los 3 elementos que mencione como muy importante se debiese realizar una línea de base, donde se puedan generar los balances hídricos de la cuenca asociada al (los) glaciar(es), que incluya la biodiversidad asociada a este, así también su balance de masa para conocer su estado y velocidad de degradación y hacer estudios asociados a los peligros de desprendimientos, avalanchas, aluviones, etc.</p>	<p>Considero que el valor científico es "invaluable". Este es un concepto que lo escuché aplicado a valores sociales y refuerza el hecho de que algo es tan importante que no se puede valorar con las escalas conocidas. Esto lo aplicaría al valor científico de los glaciares, como registros geomorfológico y como base de datos de los procesos geográfico-ambientales del Pleistoceno. Está implícito el valor científico de su protección y como reservas de agua dulce para la humanidad.</p>
<p>Los índices del valor ecosistémico del glaciar se puede medir haciendo un balance entre lo que aporta de agua al sistema y la diversidad de ecosistemas que alberga en su entorno. Actualmente todos los glaciares deberían protegerse por esta razón. El valor cultural puede medirse considerando las cuencas que abastece el deshielo de cierto glaciar, y comprender que la vida del valle no sería la misma sin su existencia. El riesgo de degradación se puede medir observando el retroceso de estos, y factores que pueden afectar su derretimiento acelerado, y la peligrosidad asociada se puede medir considerando las remociones en masa que puede gatillar su deshielo.</p>	<p>Desconozco cómo medir el grado de degradación (quizás valorando la cercanía a industrias y actividad turística no regulada) a y la peligrosidad asociada al glaciar.</p>
<p>Valor Científico: Cantidad de publicaciones y/o proyectos de investigación asociados, esto en base al valor de uso o no uso del recurso (lo que se ha publicado v/s lo que no se podrá publicar en caso de la desaparición del Patrimonio, quizás también podría incluirse los fondos monetarios que se han invertido en estas investigaciones)/ Valor Ecosistémico y Valor Económico: Reconocimiento Flora y Fauna presentes en los sistemas asociados al glaciar y afectación con áreas productivas como pesca o acuicultura.</p>	<p>Valor científico asociado al monitoreo de avance y retroceso, el cual puede ser integrado como índice según una tasa estimativa. Para el valor ecosistémico, un balance de masa para saber el aporte hídrico a la cuenca. Nuevamente, este podría otorgar un índice de alguna forma. Riesgo de degradación en base a indicadores existentes, incluyendo además la vulnerabilidad propia de su entorno (probablemente el contexto local donde está ubicado lo hace más o menos susceptible a la degradación). Finalmente, la peligrosidad pudiese integrarse en el aprovechamiento turístico y educativo.</p>
<p>Desconozco</p>	<p>Para el valor científico, potencial de uso educativo y turístico, y riesgo de degradación puedes usar las metodologías usadas internacionalmente (por ejemplo IGME, Brilha (2016)).</p>

Algunas metodologías para la evaluación del geopatrimonio prefieren diferenciar el riesgo de degradación en 2 categorías distintas: la fragilidad, que se refiere al riesgo de degradación por procesos naturales, y la vulnerabilidad, que se refiere al riesgo de degradación por causas antrópicas. ¿Cree usted que es necesario diferenciar estas dos categorías para la evaluación del patrimonio glaciológico?

8 responses



En relación con la pregunta anterior, ¿cómo definiría el retroceso generalizado que están experimentando los hielos en la actualidad? (Por favor, omita casos particulares como glaciares ubicados en la cercanía de actividades antrópicas que los afectan y refiérase solamente al caso general de retroceso glacial).

8 responses

