



UNIVERSIDAD DE CHILE
Facultad de Arquitectura y Urbanismo
Escuela de Pregrado
Carrera de Geografía

**LOS GLACIARES ROCOSOS DEL SANTUARIO DE LA NATURALEZA YERBA
LOCA, COMUNA DE LO BARNECHEA, REGIÓN METROPOLITANA**

Memoria para optar al título de Geógrafa
HELENA CONCEPCIÓN VALENZUELA-ASTUDILLO

Profesor Guía: Dr. Francisco Ferrando Acuña

SANTIAGO – CHILE

2020

Expresión de gratitud

∞ La gratitud como una virtud superior a través de la cuál valoro y honro a todas y todos quienes acompañaron, guiaron, apoyaron y celebraron este camino personal de descubrimiento de la maravillosa y envolvente Criósfera ∞

Primero y antes que todo, expreso mi gratitud hacia la vida y la energía por su maravillosa existencia, por ser el origen de la mía propia, de estas palabras y también por ser el origen de quienes leen esto en su presente relativo.

A mi profesor guía Dr. Francisco Ferrando Acuña por ser con quien conocí este extraordinario mundo de la criósfera. Gracias por las múltiples conversaciones donde aprendí términos y perspectivas nuevas, gracias por incluirme en eventos y entregarme herramientas para desarrollarme en esta disciplina. Gracias por apoyarme sin titubeo al emprender este viaje, primero siendo monitora de su electivo, luego para irme a mi Práctica Profesional en Punta Arenas, y este último año, por idear juntos y revisar dedicada y minuciosamente este trabajo de memoria. Gracias infinitas, profesor.

A mi madre, Blanca Astudillo Torres por ser tremenda, increíble, jugada, fan de mis proyectos, visiones, anhelos y reflexiones desde que tengo memoria. Gracias por impulsarme con tu linaje, con tu energía, con tu vida, con tus valores, con tu fuerza, por enseñarme a confiar en mí misma, y por mostrarme desde pequeña, el lado intangible y sutil de la existencia.

A mis cuatro hermanas y a mis tres hermanos, por elegirnos en esta vida para recorrer un camino lleno de aprendizajes. Gracias por el apoyo, por la nutrición espiritual, emocional, e intelectual; gracias por los conflictos y por las resoluciones, gracias por la potencia que cada una y cada uno tiene y desarrolla, celebro su existencia y les amo infinito.

A mi padre, Gonzalo Valenzuela Vargas por ser catalizador y espejo de grandes eventos de vida que me han hecho crecer, confiar y creer en mi incondicionalmente.

A Eduardo Gallardo Portillo por tu amor y amistad incondicional, además de la confianza, escucha y apoyo durante estos cinco años de evolución mutua tan maravillosa que hemos vivido.

A Eduardo Gallardo Santander por tanto amor y apoyo, por recibirme como a una hija, agradezco a la vida por la amistad y cariño que hemos cultivado en el paso de los años.

A mis amigas y amigos de ayer y del hoy, gracias por su amistad, compañía, apoyo, por caminar juntas y por compartir este camino de la madurez y definición de nosotres mismas a través de las risas, llantos, experiencias, reflexiones, y múltiples aprendizajes. Que la vida les de todo lo bueno, porque se lo merecen sin ninguna duda.

Resumen

Las iniciativas de investigación sobre glaciares rocosos en Los Andes centrales chilenos han aumentado en las últimas décadas, sin embargo, sigue siendo insuficiente la información técnica existente sobre las características generales y específicas de estas crioformas. Por esta razón, el presente trabajo busca aportar con una revisión actualizada de estas expresiones de permafrost andino en el Santuario de la Naturaleza de Yerba Loca, cuenca ubicada en la parte superior de la cuenca del Río Mapocho, a 50 km del centro de la ciudad de Santiago de Chile.

Para lograr este objetivo, se reconocen y analizan los glaciares rocosos a partir de imágenes de alta resolución del software Google Earth Pro del año 2019, desde un punto de vista cualitativo y cuantitativo respecto de sus dimensiones, morfología, dinámica y en su relación con el espacio donde se ubican.

Los resultados obtenidos indican en primer lugar, la presencia de 4 glaciares cubiertos y 23 glaciares rocosos – 17 en estado activo y 6 en estado relicto -. En segundo lugar, se identifica la presencia de las cuatro tipologías morfológicas asociadas a glaciares rocosos: 11 glaciares rocosos de valle, 4 glaciares rocosos de talud, 4 glaciares rocosos lobulados de talud y 4 glaciares de rampart protalus. En tercer lugar, de un total de 112 km² de superficie en la cuenca estudiada, el conjunto de glaciares rocosos y cubiertos representa 4,65 km² (un 4,15% del total de superficie). Por último, en cuarto lugar, se concluye con un mapa glaciogeomorfológico donde se sintetiza la información y los análisis realizados sobre el conjunto de glaciares rocosos y cubiertos estudiados.

Palabras claves: Glaciares rocosos, tipología, clasificación, geomorfología glacial.

Índice de contenidos

CAPÍTULO I: PRESENTACIÓN	8
1.1 Introducción	8
1.2 Planteamiento del problema.....	10
1.3 Antecedentes del área de estudio	11
1.3.1 Sistema físico	11
1.3.1.1 Características geológicas y morfológicas	11
1.3.1.2 Características altimétricas	13
1.3.1.3 Características hidrológicas y glaciológicas.....	14
1.3.1.4 Características climáticas	15
1.3.2 Sistema antrópico	18
1.3.2.1 Proyecto Yerba Loca	18
1.3.2.2. Extracción minera a gran escala	19
1.4 Objetivos	20
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO.....	21
2.1 Criósfera	22
2.2 Glaciares.....	23
2.2.1 Concepto general de glaciar y clasificación general para los Andes Centrales	23
2.2.2 Concepto de Glaciar Cubierto y Glaciar Rocosos.....	25
2.2.3 Clasificaciones para Glaciares Rocosos	26
2.3 Permafrost	28
2.3.1 Relación entre permafrost y Glaciares Rocosos (GR).....	29
CAPÍTULO III: MARCO METODOLÓGICO	30
3.1 Materiales utilizados	31
Software e imágenes satelitales	31
Modelo de Elevación Digital (DEM)	31
3.2 Pasos Metodológicos.....	32
3.2.1 Objetivo 1: Identificación de los glaciares rocosos presentes en el Santuario de la Naturaleza Yerba Loca	32
Identificación, delimitación y clasificación.....	32

Coordenadas centrales	33
3.2.2 Objetivo 2: Descripción de las características morfológicas, posición y actividad dinámica de los glaciares rocosos presentes en el Santuario de la Naturaleza Yerba Loca	33
Exposición	33
Descripción de las geoformas identificadas	33
Formas de macro relieve.....	33
Formas de relieve.....	34
Glacio-morfologías asociadas a la dinámica y sus expresiones topográficas	35
Thermokarst.....	35
3.2.3 Objetivo 3: Caracterización de los glaciares rocosos identificados según su morfométrica e hidrología cuantitativa.....	36
Cálculo de altitud máxima y mínima.....	36
Cálculo de área	36
Cálculo de longitud máxima y ancho medio	36
Cálculo de espesor, volumen de hielo estimado y equivalente en agua	37
3.2.4 Objetivo 4: Mapeo glacio-geomorfológico de la cuenca del Santuario Yerba Loca	38
3.3 Alcances y limitaciones de la investigación	38
CAPÍTULO IV: RESULTADOS	39
Resultado 1: Glaciares rocosos y cubiertos presentes en el Santuario de la Naturaleza Yerba Loca.....	39
Resultado 2: Descripción cualitativa de las características identificadoras de los glaciares rocosos presentes en el Santuario de la Naturaleza Yerba Loca.....	40
Descripción de glaciares rocosos presentes en la cuenca del Yerba Loca	40
Glaciares rocosos de valle	40
Glaciares rocosos de valle relictos.....	46
Glaciares rocosos de talud	47
Glaciares rocosos lobulados de talud.....	49
Glaciares rocosos de terraplén o rampart protalus (GRR).....	51
Glaciares cubiertos	52
Exposición.....	53
Alturas de taludes frontales	54

Thermokarst	55
Resultado 3: Caracterización morfométrica e hidrológica de los glaciares rocosos y cubiertos presentes en el Santuario de la Naturaleza Yerba Loca	57
Altitud.....	57
Planimetría	58
Espesor, volumen de hielo estimado y agua equivalente	59
Resultado 4: Mapa Glaciomorfológico – Cuenca del Santuario Yerba Loca.....	60
Glaciogeomorfología de la cuenca del Estero Yerba Loca	61
CAPITULO IV: DISCUSIONES Y CONCLUSIONES	63
Bibliografía.....	65
Anexos	70

Índice de figuras

FIG. 1. CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS DEL SANTUARIO YERBA LOCA	12
FIG. 2. CARACTERÍSTICAS ALTIMÉTRICAS DE LA CUENCA DEL ESTERO YERBA LOCA.....	13
FIG. 3. CARACTERÍSTICAS HÍDRICAS Y GLACIOLÓGICAS.....	15
FIG. 4. CLASIFICACIÓN CLIMÁTICA DE KÖPPEN-GEIGER Y ESTACIONES METEOROLÓGICAS EN LA ZONA DE ESTUDIO	16
FIG. 5. CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO EN BASE A DATOS DE LA ESTACIÓN LOS BRONCES	17
FIG. 6. ZONAS CLIMÁTICAS PARA LA CUENCA DEL SANTUARIO YERBA LOCA.	17
FIG. 7. MAPA DEL SANTUARIO YERBA LOCA DESARROLLADO EN EL MARCO DEL PROGRAMA DE EDUCACIÓN AMBIENTAL.....	19
FIG. 8. MARCO CONCEPTUAL SOBRE LA CRIÓSFERA Y SUS ELEMENTOS	21
FIG. 9. COMPONENTES DE LA CRIÓSFERA.	22
FIG. 10. DIAGRAMA EVOLUTIVO DE UN GLACIAR DESCUBIERTO A UN GLACIAR DETRÍTICO ..	24
FIG. 11. EJEMPLO DE GLACIAR ROCOSO DE VALLE (GR) Y DE TALUD (GRT) EN LA CUENCA SUPERIOR RÍO LIMARÍ.....	27
FIG. 12. ESQUEMA METODOLÓGICO DE INVESTIGACIÓN.....	30
FIG. 13. EJEMPLO DE LA RESOLUCIÓN ESPACIAL PARA LA IDENTIFICACIÓN DE CRIIFORMAS	31
FIG. 14. EJEMPLO DE (A) UNIDAD DE GLACIAR ROCOSO Y (B) DE SISTEMA DE GLACIAR ROCOSO	33
FIG. 15. TALUDES DEFINIDOS Y TALUDES EXTENDIDOS.....	34
FIG. 16. TALUD FRONTAL DE UN GLACIAR ROCOSO EN EL SANTUARIO YERBA LOCA.	35
FIG. 17. EJEMPLO DE PUNTOS PARA ALTITUD MÁXIMA Y MÍNIMA	36

FIG. 18. CARTOGRAFÍA DE LOS GLACIARES ROCOSOS RECONOCIDOS EN EL SANTUARIO YERBA LOCA.....	39
FIG. 19. GLACIAR ROCOSO DE VALLE (GR-1)	40
FIG. 20. GLACIAR ROCOSO DE VALLE (GR-5)	41
FIG. 21. GLACIAR ROCOSO DE VALLE (GR-7)	42
FIG. 22. GLACIAR ROCOSO DE VALLE (GR-6)	42
FIG. 23. GLACIAR ROCOSO DE VALLE (GR-8)	43
FIG. 24. GLACIAR ROCOSO DE VALLE (GR-9).....	44
FIG. 25. GLACIAR ROCOSO DE VALLE (GR-13)	44
FIG. 26. GLACIAR ROCOSO DE VALLE (GR-16)	45
FIG. 27. GLACIAR ROCOSO DE VALLE (GR-15)	45
FIG. 28. GLACIARES ROCOSOS DE VALLE FÓSILES (GR-11 Y GR-12).....	46
FIG. 29. GLACIARES ROCOSOS DE TALUD (GRT-2 Y GRT-3).....	47
FIG. 30. GLACIAR ROCOSO DE TALUD (GRT-4).....	48
FIG. 31. GLACIAR ROCOSO DE TALUD (GRT-10).....	48
FIG. 32. GLACIAR ROCOSO LOBULADO DE TALUD (GRLT-14).....	49
FIG. 33. GLACIAR ROCOSO LOBULADO DE TALUD (GRLT-17).....	49
FIG. 34. GLACIARES ROCOSOS LOBULADOS DE TALUD (GRLT-18 Y GRLT-19).....	50
FIG. 35. GLACIARES ROCOSOS DE PROTALUS RAMPART RELICTOS (GRR-20, GRR-21, GRR-22 Y GRR-23)	51
FIG. 36. GLACIARES CUBIERTOS (GC-1, GC-2, GC-3 Y GC-4).....	52
FIG. 37. CARACTERIZACIÓN DE LOS GLACIARES ROCOSOS CON RESPECTO A SU EXPOSICIÓN SOLAR.....	53
FIG. 38. ALTURA PROMEDIO DE TALUDES FRONTALES EN (M) POR GLACIAR ROCOSO.	54
FIG. 39. EJEMPLOS DE TALUDES FRONTALES DEL GR-16 (A Y B) Y GR-8.....	54
FIG. 40. THERMOKARST PRESENTE EN EL GR-9, EN LOS GC-2 Y GC-3.....	55
FIG. 41. DISTRIBUCIÓN VERTICAL Y CINTURÓN ALTITUDINAL DE DISTRIBUCIÓN DE LOS 17 GLACIARES ROCOSOS ACTIVOS.....	57
FIG. 42. RESULTADOS DEL CÁLCULO DE ÁREA PLANIMÉTRICA PARA GLACIARES ROCOSOS Y CUBIERTOS.....	58
FIG. 43. ÁREA ACUMULADA EN PORCENTAJES PARA GLACIARES ROCOSOS Y ÁREA ACUMULADA SEGÚN EXPOSICIÓN SOLAR.	59
FIG. 44. ESPESOR Y VOLUMEN DE HIELO ESTIMADO PARA GLACIARES ROCOSOS EN EL SANTUARIO YERBA LOCA	60
FIG. 45. EQUIVALENTE EN AGUA Y VOLUMEN DE HIELO ESTIMADO PARA GLACIARES ROCOSOS	60
FIG. 46. MAPA GLACIOMORFOLÓGICO CUENCA DEL SANTUARIO YERBA LOCA.....	62

Índice de tablas

TABLA 1. RESUMEN DE FORMAS MORFOLÓGICAS MAPEADAS EN LA ZONA MEDIA-ALTA DE LA CUENCA DEL ESTERO YERBA LOCA.	70
---	----

CAPÍTULO I: PRESENTACIÓN

1.1 Introducción

En la Cordillera de los Andes chilenos existe gran número de glaciares, concentrando cerca del 80,5% del total de los cuerpos de hielo catastrados en Sudamérica (Segovia & Videla Giering, 2017), situando a nuestro país en una posición ventajosa con respecto a los demás países de la región. Por esta razón, y parafraseando a Messerli & Ives (1997) sobre su concepción de los glaciares como “las torres de agua del mundo”, los Andes claramente pueden ser considerados como las torres de agua de nuestro continente.

En este sentido, en Los Andes podemos encontrar tanto glaciares descubiertos, como también otros reservorios de agua con igual o mayor importancia: los glaciares cubiertos y rocosos, los cuales se ubican en una amplia sección andina del país. Estos se presentan en mayor cantidad en la zona central y zona semiárida, donde, durante el verano y el otoño temprano, alimentan hídricamente a las cuencas (Azócar & Brenning, 2010). Por esta importante razón, es que cada vez se concentra mayor atención en los glaciares rocosos a nivel académico, territorial, político y económico.

Sin embargo, a pesar de su gran importancia, y de acuerdo con Fernandez & Ferrando (2018), no existe protección legislativa realmente efectiva para los glaciares descubiertos en su totalidad, y menos para los glaciares rocosos, el permafrost y su entorno glaciosistémico. Tampoco un marco regulador para asegurar el suministro de agua como elemento básico para la vida en favor de la población y las economías locales, aun cuando el Estado tiene la responsabilidad ambiental, política y de gestión del cuidado de los cuerpos de hielo en el territorio nacional y sobre el bienestar de la población. Debido a esto, glaciares cubiertos y rocosos han sido alterados o removidos por operaciones mineras en las montañas, cuya afectación agrava enormemente la situación hídrica en el contexto de Cambio y Emergencia Climática (Brenning & Azócar, 2010)

En este sentido, las principales motivaciones en que se enmarca el desarrollo de este estudio y análisis sobre los glaciares rocosos son:

- 1. La situación de sequía que se ha prolongado por más de una década y que afecta las regiones áridas y semiáridas del país.** Frente a lo cual autores como Schaffer, Macdonell, Réveillet, et al (2019), Fernandez & Ferrando (2018) y Azócar & Brenning (2010) concluyen que los glaciares rocosos en Chile son “reservas de agua dulce sumamente importante para las regiones semiáridas y para el abastecimiento de las zonas bajas de las cuencas donde se encuentran”. Una de ellas es la Región Metropolitana, donde se concentra más de la mitad de la población nacional, la cual es abastecida en

gran medida por la criósfera andina y por las reservas subterráneas que se alimentan de su fusión.

2. **La insuficiente información y lenta actualización de los inventarios de GR en los Andes Centrales.** El hecho de que estas geoformas no sean dimensionadas en su totalidad provoca que su consideración e incidencia en las políticas públicas, y en proyectos de inversión en las zonas de montaña, no sea proporcionalmente tomado en cuenta (Brenning & Azócar, 2010). Se debe considerar que en la zona centro-norte del país se encuentran los yacimientos más importantes de cobre, litio, caliza, hierro y yodo, entre otros, concentrando el interés de la gran minería y de los capitales económicos, junto a las influencias políticas, dada la importancia de esta actividad económica a nivel nacional (Chile es el segundo mayor exportador de cobre a nivel internacional, siendo ello todavía el principal aporte al PIB nacional).
3. **La importancia de los glaciares rocosos en los ambientes de montaña** recae en la “contribución a la regulación del clima, su contenido e información sobre el pasado geológico y climático (Barsch, 1996), su apreciación en el turismo (Parks Canada, 2008), agregándose el valor no relacionado al uso, como el de su existencia, de legado y altruista (Kronenberg, 2009)” en Brenning & Azócar (2010).
4. **El riesgo asociado al descongelamiento de los glaciares y el permafrost.** Para Vergara Dal Pont, Santibañez, Araneo, Ferrando, & Moreiras (2018) es facilitar la erosión de las laderas y los deslizamientos. En este sentido, Barsch (1996) explica que esto es de gran importancia, ya que “(...) varias cumbres, paredes de rocas y depósitos de material no consolidado permanecen unidos por el hielo del permafrost de montaña. El derretimiento de este hielo desestabilizaría estas áreas causando amenazas como deslizamientos, flujos de detritos, los cuales podrían afectar incluso a los fondos de valles”, tal como se ha establecido en los estudios de (Vergara Dal Pont, Santibañez, Araneo, Ferrando, & Moreiras, 2018) y (Vergara Dal Pont, Moreiras, Santibañez, Araneo, & Ferrando, 2019).

Esta situación de riesgo puede provocar grandes cambios en las economías de comunidades de montañas, así como en el transporte de mercancías y movilidad tanto nacional como internacional por el corte de caminos y ruptura de obras de infraestructura caminera, por lo que se hace cada vez más necesario tener un conocimiento concreto de las regiones que podrán ser afectadas y generar mecanismos de prevención de riesgos y disminución de vulnerabilidad regional.

1.2 Planteamiento del problema

En las investigaciones de la glaciología y la geocriología sobre los cuerpos detrítico-gélidos, se ha logrado identificar la presencia de glaciares rocosos en casi todas las cadenas montañosas del mundo (Burger, et al, 1997) en Soto Bäuerle, Ferrando, & Vieira (2002). En Chile, estas formas comenzaron a estudiarse en profundidad recién en la década de 1990, a lo cual Ferrando (2017) señala que estos estudios han tenido un tardío y lento desarrollo. En este proceso, autores como (Lliboutry, 1956), (Paskoff, 1970), (Marangunic, 1976), (Payne, 1998), y (Ferrando, 1992, 2003a, 2003b), entre otros, han aportado en formar los cimientos del conocimiento sobre los glaciares rocosos y el permafrost que se encuentran en la vertiente occidental de la Cordillera de Los Andes.

Actualmente, los estudios sobre glaciares rocosos han aumentado considerablemente con respecto a los realizados en las décadas pasadas, siendo desarrollados en la actualidad por diversas instituciones universitarias y centros de investigación privados, gubernamentales y no-gubernamentales, ahondando en la comprensión de estas formas periglaciales, con el objetivo de poder aportar a su inventariado, al conocimiento de sus propiedades, comportamientos, y a su importancia tanto para los sistemas periglaciales y ecosistemas de montaña, como para la sociedad en general. Sin embargo, la cantidad de estudios aún no son suficientes dada la importancia y amenazas que enfrentan los glaciares rocosos en Los Andes. La mayor parte de la cordillera en nuestro país no ha podido ser minuciosamente investigada, lo cual se puede explicar por la gran extensión del cordón montañoso como por los pocos recursos económicos invertidos por el Estado en materia de investigación glacial.

En efecto, una de las zonas donde se requiere estudiar en mayor profundidad los glaciares rocosos corresponde a una subcuenca tributaria del Río Mapocho superior, donde a simple vista se identifican glaciares descubiertos, cubiertos y rocosos, además de diferentes expresiones de permafrost. Esta subcuenca comprende en sus límites al Santuario de la Naturaleza Yerba Loca, ubicado en el sector andino de la Comuna de Lo Barnechea, en la Región Metropolitana. Su ubicación es de suma importancia, pues en esta región se concentra alrededor del 50% de la población a nivel nacional y, además donde, producto de la actual sequía que afecta al país desde el año 2008 aproximadamente, gran cantidad de comunas han sido declaradas Zonas de Emergencia Agrícola (Prensa Minagri, 2020).

Consecuentemente, este trabajo de memoria busca contribuir al conocimiento general y particular sobre los glaciares rocosos presentes en la cuenca y su estado actual, generando un inventario de estos cuerpos detríticos-gélidos considerando sus características, su morfología, tipología y significancia hídrica, entre otros, con el fin de aportar en su visibilización y consideración en todos los espacios donde se pueda debatir y decidir sobre el futuro del Santuario Yerba Loca.

1.3 Antecedentes del área de estudio

El área de estudio corresponde a la subcuenca del Estero Yerba Loca, un valle andino ubicado en la comuna de Lo Barnechea, al nororiente de la Región Metropolitana. Su nombre se debe a una hierba cordillerana muy común en la zona central que se encuentra presente en el valle: *Astragalus cruckshanksii* o "hierba loca". En julio del año 1973, fue declarado Santuario de la Naturaleza bajo el Decreto N°937 con el objetivo de “conservar las especies arbóreas existentes (...), la ecología original de la precordillera; y las posibilidades turísticas que ofrece, por la belleza natural de esa región” (Consejo de Monumentos Nacionales de Chile, s/f). El área de protección que contemplaba este decreto era de 39.029 hectáreas, sin embargo, y según la información de la Municipalidad de Lo Barnechea, en la actualidad son solamente 11.300 há.

1.3.1 Sistema físico

1.3.1.1 Características geológicas y morfológicas

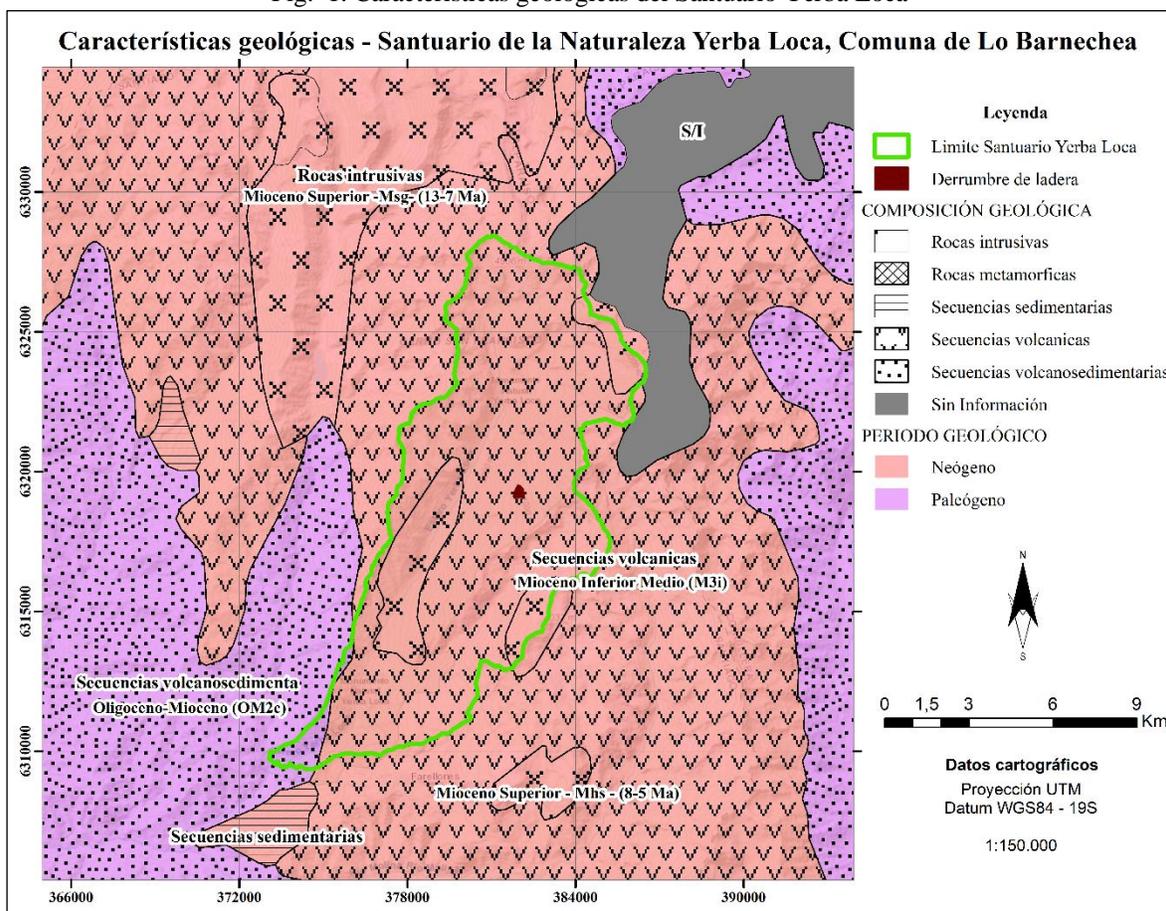
La zona de estudio se encuentra inmersa en la parte central de la Cordillera de los Andes chilena, una de las cuatro unidades macro morfológicas a nivel país. Por su origen en la subducción de las placas de Nazca y Sudamericana, esta zona tiene importante influencia tectónica y volcánica. El contexto geológico regional en el cual se encuentra inserta la cuenca del Estero Yerba Loca corresponde a una formación geológica del periodo Neógeno, la cual se emplaza sobre otra del Paleógeno. La composición litológica de ambas formaciones geológicas varía entre secuencias volcánicas, volcánico-sedimentarias, cuerpos intrusivos y en menor medida, en secuencias sedimentarias.

En lo particular, la geología estructural de la cuenca del Estero Yerba Loca se caracteriza principalmente por secuencias volcánicas del Mioceno Inferior - Medio (M3i), donde se incluyen tres secciones con rocas intrusivas: dos de ellas de las eras del Cenozoico, del Mioceno Superior - Mhs - (8-5 Ma), y una tercera del Mioceno Superior - Msg - (13 - 7 Ma). Por último, en la parte más baja de la cuenca encontramos una sección pequeña de secuencias volcánico-sedimentarias del Oligoceno - Mioceno (OM2c).

Morfológicamente, Arroyo, Marticorena, Mathhef, et al (2002) indica que “este valle muestra fuertes rasgos morfológicos de las glaciaciones pleistocenas”. Correspondiendo a un territorio de media y alta montaña, de laderas escarpadas, con los cerros La Paloma y Altar en su extremo norte o nacimiento, el Cordón de la Sierra Bella por el Oeste y los cerros Leonera, Pintor y La Parva por el Este. Su orientación es NNE-SSO y la extensión desde su nacimiento hasta la confluencia con el Río San Francisco es de 20 kilómetros aproximadamente.

Es importante mencionar que, recientemente en el año 2018 se registró un movimiento en masa del tipo derrumbe en una de las laderas del valle, por lo cual se decidió cerrar el Santuario ante la posible ocurrencia de nuevos fenómenos de este tipo, en resguardo de los visitantes. El Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN) por su parte indica en el Informe Técnico denominado “Remoción en masa en Parque Yerba Loca”, que “se percibieron movimientos internos que pueden estar asociados al derretimiento de hielo (o suelo congelado) y/o a la filtración de agua por deshielo, lo que genera erosión selectiva dentro del depósito”, indicando que la causa de este desprendimiento de rocas se relaciona con el derretimiento del permafrost (hielo intersticial) producto del incremento de las temperaturas debido al cambio climático (Andinismo, 2019)

Fig. 1. Características geológicas del Santuario Yerba Loca

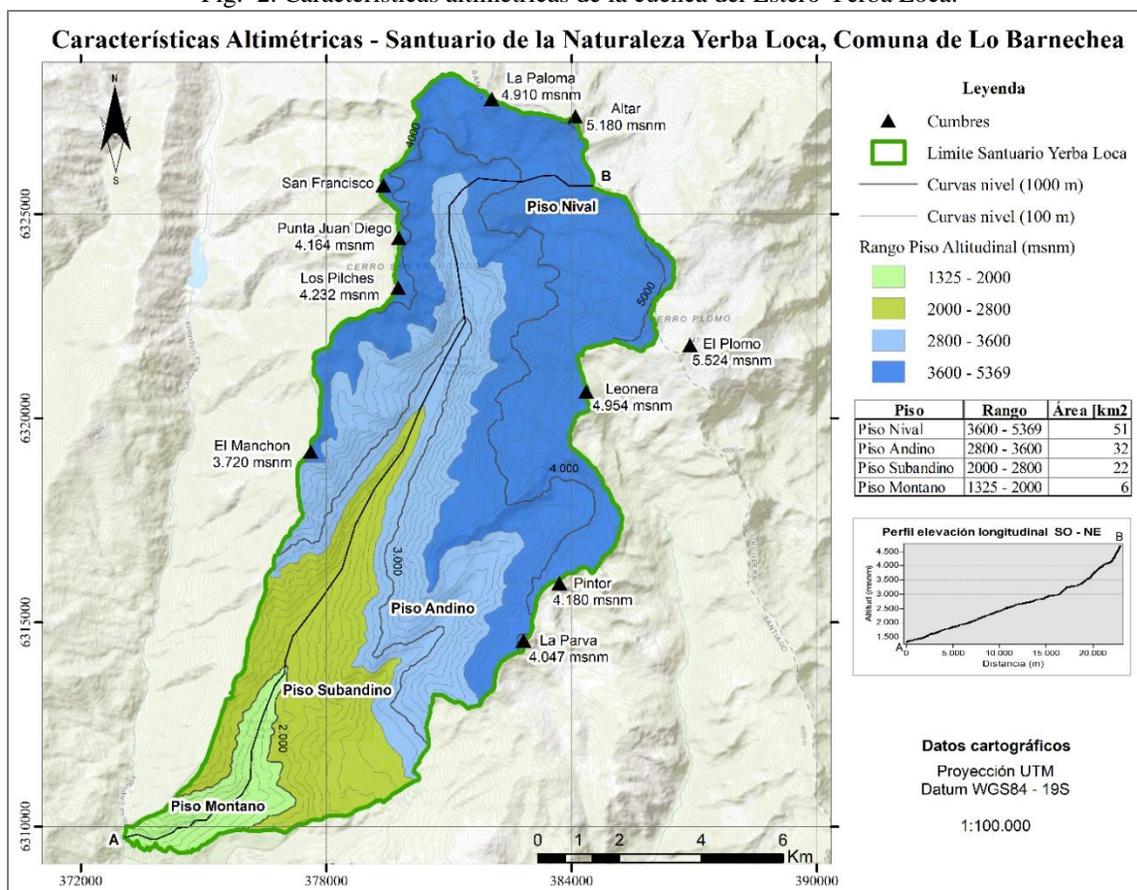


Fuente: Elaboración propia en base a SERNAGEOMIN (2003)

1.3.1.2 Características altitudinales

En cuanto a la altimetría, Arroyo, Marticorena, Mathhef, et al (2002) indica que la cuenca posee un rango altitudinal desde los 1.300 a los 5.340 msnm, con una diferencia de altitud aproximada de 4000 m., como se muestra en la Fig. 2. En base a lo anterior, se identifican cuatro pisos altitudinales en base a (García, s/f) y (Muñoz-Schick, Moreira-Muñoz, Villagrán, & Luebert, 2000): en la parte baja de la cuenca, desde los 1.325 a 2.000 msnm, se sitúa el Piso Montano; en la parte media de la cuenca, el Piso Subandino abarca desde los 2.000 a 2.800 msnm donde se encuentran varios cerros de mediana altitud; luego, desde los 2.800 a 3.600 msnm se encuentra el Piso Andino.

Fig. 2. Características altimétricas de la cuenca del Estero Yerba Loca.



En la Fig. 2 se aprecian los cuatro pisos altitudinales con sus rangos de altura, además de las áreas que comprende cada uno de ellos, siendo el piso Nival el que ocupa mayor superficie dentro de la cuenca con 51 km², seguido por el piso Andino con 32 km², luego el piso Subandino con 22 km² y, por último, el piso Montano con 6 km² en la base de la cuenca. El perfil longitudinal SO-NE sigue el recorrido del cauce del estero Yerba Loca desde la parte más baja de la cuenca hasta su nacimiento (A-B).

Finalmente, desde los 3.600 a los 5.369 msnm corresponde al Piso Nival que comprende todas las más altas cumbres de la cuenca, como La Paloma, Cerro Altar y Leonera. Es importante mencionar que en las cercanías del límite oriental se encuentra el cerro El Plomo con 5.424 msnm, siendo la sexta cumbre más alta de la región (Biblioteca del Congreso Nacional, s/f). Cabe destacar el cambio de gradiente que se observa desde los 3.000 msnm en la cuenca del Santuario, donde las laderas se vuelven más escarpadas y el valle comienza a encajonarse hacia el NE en dos direcciones, una más extensa hacia las cumbres Altar y La Paloma, y otra más acotada hacia la cumbre del cerro Leonera.

1.3.1.3 Características hidrológicas y glaciológicas

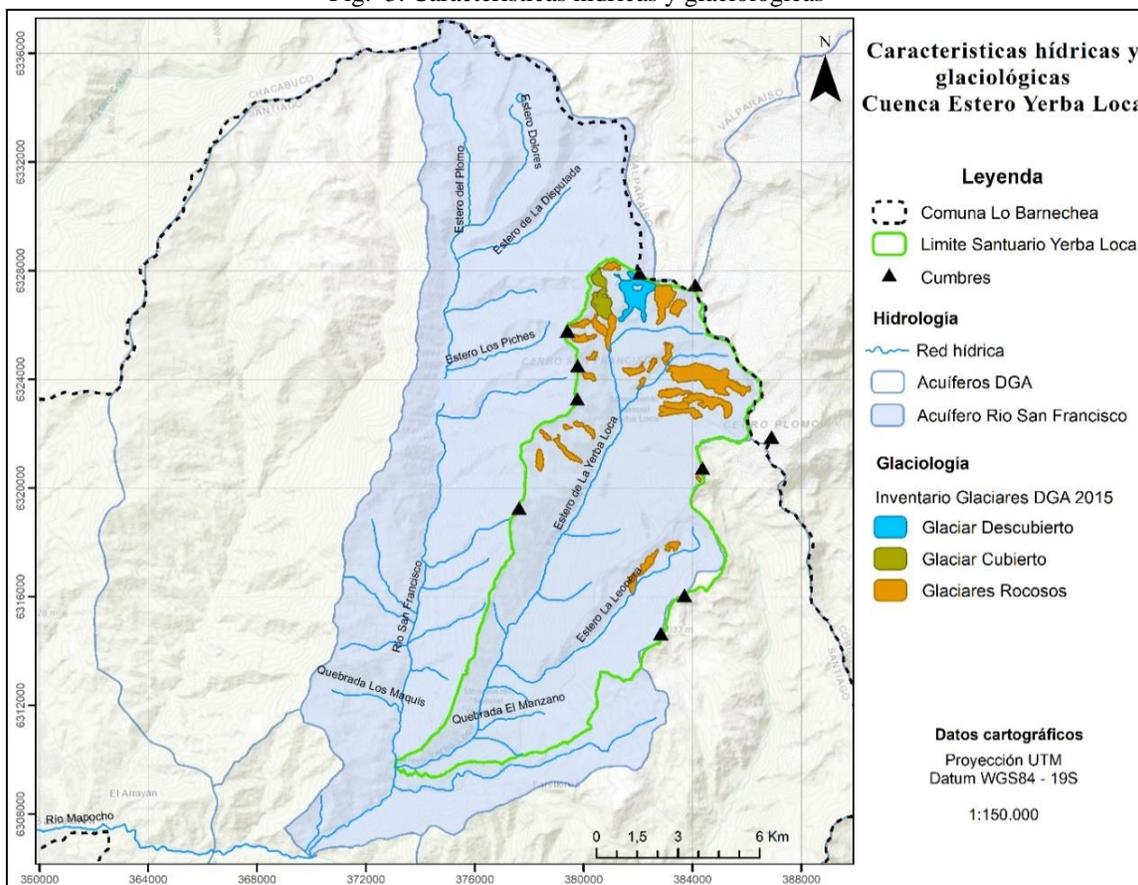
La hoya hidrográfica del Estero Yerba Loca es de carácter exorreico con una pequeña microcuenca tributaria, el Estero Leonera, hacia el NE en dirección a la cumbre del Cerro Leonera (4.954 msnm). Pertenece al acuífero San Francisco junto a la cuenca adyacente del río del mismo nombre. El flujo hídrico de base del Estero Yerba Loca se alimenta del agua de fusión de los glaciares Altar y La Paloma, cuyos frentes se encuentran a unos 3.900 msnm, y de la retroalimentación de las aguas infiltradas producto del derretimiento.

Es tributario del Río San Francisco, el cual, a su vez, tributa al Río Mapocho, definiéndose su régimen como nivo-glacial-periglacial (Azócar & Brenning, 2010). En este sentido, cuando la nieve y el hielo reducen su aporte hídrico en invierno, su caudal depende principalmente de las precipitaciones líquidas y/o de la fusión temprana de la nieve estacional, ambas que se registran en su sección inferior a media (escorrentía directa). En este contexto, Azócar & Brenning (2010) también señalan que “el régimen fluvial de las cuencas andinas a la latitud de Santiago se caracteriza por una fuerte influencia periglacial”, donde los glaciares rocosos y el permafrost son importantes aportadores a través de la retención de agua adicional en forma de hielo subterráneo, reserva que se incrementa en meses fríos y funde parcial y gradualmente en los meses más cálidos.

En base a lo anterior, es que en primavera el estero aumenta su volumen, primero a causa de la fusión nival de media montaña y gradualmente de la de alta montaña junto con los deshielos en la medida que aumentan las temperaturas estacionales. Cabe destacar que estas aguas, según el Consejo de Monumentos Nacionales de Chile, (s/f), poseen altas concentraciones de sales de hierro y sulfatos de cobre provenientes de las rocas que drenan sus afluentes (esteros La Leonera y Chorrillos del Plomo), alcanzando un pH marcadamente ácido, por lo que no son aptas para el consumo humano.

En cuanto a su glaciología, según el Inventario 2015 de la Dirección General de Aguas, existirían unos 34 glaciares rocosos y 4 glaciares de montaña, entre los cuales se encuentran el Glaciar La Paloma y el Glaciar Del Rincón como los de mayor superficie en el valle. Además, dos de los glaciares rocosos más importantes de la cuenca se ubican en el Cajón de Los Sulfatos, cuya denominación se debe a la fuerte alteración hidrotermal de la que han sido efecto las rocas del sector, proceso que ha llevado al enriquecimiento con sulfatos de cobre.

Fig. 3. Características hídricas y glaciológicas

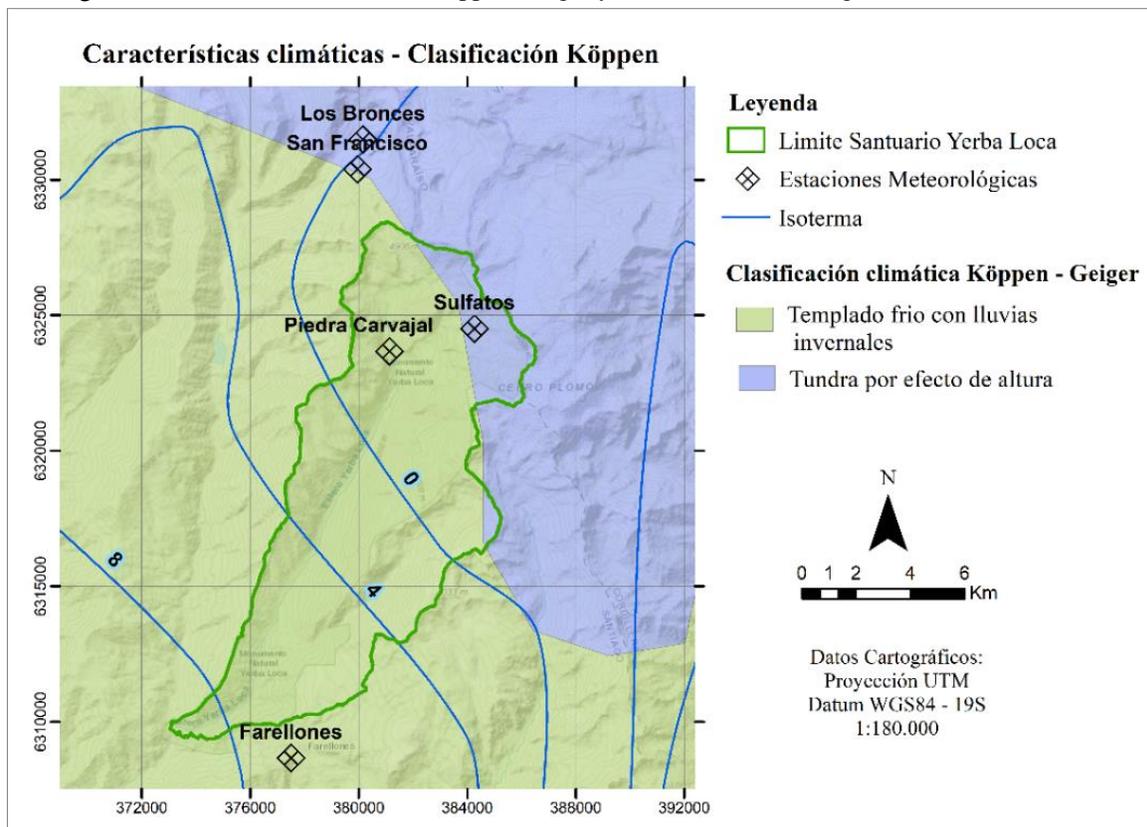


1.3.1.4 Características climáticas

Según la clasificación de Köppen-Geiger (Fig. 4), en el área de estudio se reconocen dos pisos climáticos: el templado frío con lluvia invernal (Csc), el cual se caracteriza por “una precipitación en el mes más seco de verano, inferior a un tercio de la del mes más lluvioso de invierno, y tener una temperatura media del mes más frío superior a -38°C y en el mes más cálido, inferior a 22°C , teniendo menos de cuatro meses una temperatura media que supera los 10°C ” (Universidad Católica, s.f.). En el caso del segundo piso climático, este corresponde a la Tundra por efecto de altura (ETH), la cual se caracteriza por “una

temperatura media entre 0°C y 10°C en el mes más cálido, con una influencia de la altura del relieve relevante sobre los 3.000 msnm” (Universidad Católica, s.f.).

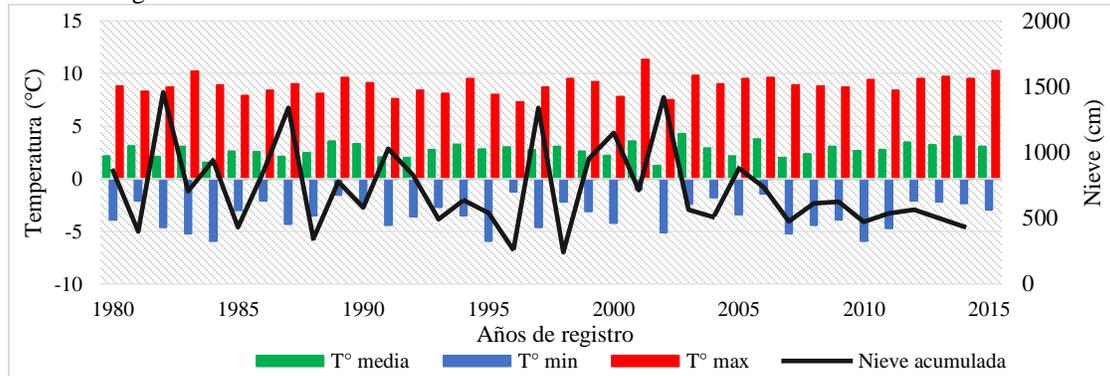
Fig. 4. Clasificación climática de Köppen-Geiger y estaciones meteorológicas en la zona de estudio



Fuente: Elaboración propia

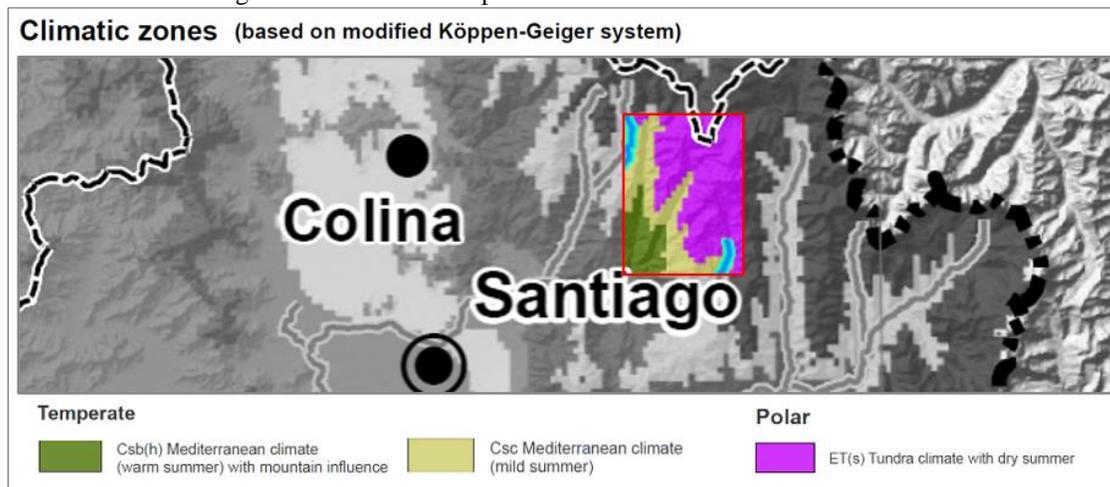
En cuanto a los registros de las estaciones meteorológicas presentes en la cuenca y en sus alrededores, encontramos cinco: Farellones, Piedra Carvajal, Sulfatos, San Francisco y Los Bronces (Fig. 5). Esta última es propiedad de la minera homónima y la única de las cinco con que se ha podido recolectar información de más de 30 años, con un registro total de 35 años disponible (1980 a 2015). En la siguiente figura, se presenta el gráfico de caracterización del área de estudio en base a los datos de la estación Los Bronces para la temperatura máxima, media y mínima, junto a la cantidad de nieve caída por año, desde donde se reconoce que esta zona posee mínimas anuales bajo 0°C, variando entre -1°C a -6°C y las máximas anuales fluctúan entre los 7°C a 11°C, manteniéndose la media anual entre los 1°C y los 4°C. La variación de la acumulación de nieve en este contexto deja entre ver que no responde a la temperatura como variable predominante, ya que, en un contexto relativamente estable, la acumulación de nieve varía ampliamente entre 300 a 1.400 cm de nieve caída.

Fig. 5. Caracterización del área de estudio en base a datos de la estación Los Bronces



En base la clasificación climática de Köppen-Geiger, Sarricolea et al. (2017) actualiza y desarrolla la regionalización climática de Chile continental. Según este trabajo, en la cuenca del Santuario Yerba Loca, se identifican tres zonas climáticas (Fig. 6). En primer lugar, en la zona baja de la cuenca domina un clima mediterráneo (verano cálido) con influencia de montaña - Csb(h); luego en la parte media de la cuenca un clima mediterráneo con verano templado – Csc; y, por último, en la sección superior o de alta montaña predomina un clima de tundra con verano seco - ET(s).

Fig. 6. Zonas climáticas para la cuenca del Santuario Yerba Loca.



Para las zonas climáticas templadas (Csb(h) y Csc), el clima se caracteriza por su temperatura media del mes más frío es inferior a 18°C y superior a -3°C, lluvias estacionales y bosque templado y matorral. En el caso del tipo Csb (h), la temperatura media del mes más cálido es inferior a los 22° C y, al menos, cuatro meses, con temperaturas medias que superan los 10° C. Así, para el Csc, La temperatura media del mes más frío es superior a -38° C y el mes más cálido es inferior a 22° C, y menos de cuatro meses tienen una temperatura media que supera los 10° C. Mientras que en el caso de la zona climática polar ET (s), La temperatura media del mes más cálido debe estar entre 0° C y 10° C. Fuente: adaptado a partir de (Sarricolea, Herrera Osandón, & Meseguer-Ruiz, 2017)

1.3.2 Sistema antrópico

Existen dos principales actividades antrópicas que se desarrollan dentro de los límites del área de estudio o en sus cercanías. La primera corresponde a la de recreación y deporte al aire libre que impulsa el “Proyecto Yerba Loca”, el cuál es auspiciado por la Municipalidad de Lo Barnechea y llevado a cabo por la compañía Outlife con aportes de privados. Y la segunda actividad corresponde a la extracción minera a tajo abierto en sectores adyacentes a los límites de la cuenca estudiada a cargo de las grandes mineras Andina (Codelco) y Los Bronces (AngloAmerican), y que tienen efectos indirectos en el glaciosistema local (Brenning & Azócar, 2010)

1.3.2.1 Proyecto Yerba Loca

El “Proyecto Yerba Loca” en el Santuario de la Naturaleza tiene el objetivo de “hacer de este lugar un ejemplo de gestión outdoor a nivel nacional, abierto a la comunidad durante todo el año, con especial énfasis en la conservación ambiental, el rescate de la cultura cordillerana, la educación ambiental, el desarrollo de un turismo sustentable y la promoción del deporte responsable al aire libre” (Municipalidad de Lo Barnechea, s/f). En este contexto, algunas de las actividades que se realizan dentro del parque son camping, trekking, montañismo, mountain bike, cabalgatas, escalada en hielo, raquetas en nieve, y ski de montaña.

Uno de los lugares iconos de este proyecto es Villa Paulina, donde confluyen los esteros Yerba Loca y Leonera. Este lugar está delimitado en tres sectores: el sector Refugio donde cada sitio está más separado uno de otro, el sector Pozones ideal si se va con familia o amigos y el sector El Bosque que está un poco más alejado. Cada sector tiene baños compartidos, mesa de picnic, un lugar delimitado para hacer asado a carbón y espacio para una carpa, además de no tener electricidad (Umatu, 2020). De esta forma, las familias pueden ir a acampar o a realizar picnic por el día.

La compañía Outlife es quien administra el Parque Yerba Loca, y también quienes lo diseñaron y llevan a cabo. Para lograr este objetivo, reciben financiamiento de la minera AngloAmerican (operadora de la mina Los Bronces), cumpliendo la función de “articulador responsable de concretar la visión de la compañía y la Municipalidad en Yerba Loca” (Municipalidad de Lo Barnechea, s/f)

Fig. 7. Mapa del Santuario Yerba Loca desarrollado en el marco del Programa de Educación Ambiental¹



Se aprecia en la parte superior-izquierda ambas extracciones mineras – AngloAmerican y División Andina de Codelco – limitando con las divisoras de agua de la zona norte y noroeste de la cuenca. Fuente: (Santuario de la Naturaleza Yerba Loca, s/f)

1.3.2.2. Extracción minera a gran escala

En el caso de las extracciones mineras, se encuentra la Mina Los Bronces en las nacientes de la cuenca del Rio San Francisco, ubicada al NO y contigua a la cuenca del Estero del Yerba Loca, explotando cobre y molibdeno a rajo abierto. Actualmente, se encuentra en avance el proyecto de mina subterránea – Proyecto Los Bronces Integrado – el cual basaría su extracción en “extracción por bloques o caserones, ubicados en promedio a 660 metros de profundidad” bajo el área que comprende el Santuario Yerba Loca. Y en cuanto al proceso de mitigación, esto consistirá en el relleno de los espacios subterráneos liberados por los bloques extraídos, para asegurar la estabilidad de la superficie” (AngloAmerican, s/f). El problema en esta fase de expansión es que, según el mapa incluido en el estudio de impacto ambiental, la explotación se haría debajo de los glaciares rocosos del Cajón de Los Sulfatos, cuyo sustrato corresponde a rocas fuertemente alteradas y mineralizadas, por tanto, de baja

¹ Programa de Educación Ambiental “Flora y Fauna de Lo Barnechea”. “La iniciativa se materializó gracias a un trabajo colaborativo entre la Municipalidad, AngloAmerican –a través de su operación Los Bronces- y un destacado grupo de científicos y especialistas” (Lo Barnechea noticias, 2017).

calidad geotécnica, lo que podría provocar subsidencias y derrumbes, y afectar estas reservas hídricas (Ferrando, comunicación personal, 2020).

En el caso de Codelco – División Andina, la explotación se realiza en la cabecera de la cuenca del Río Blanco, afluente del Río Aconcagua, la que limita con la cuenca del Estero Yerba Loca en el lado norte, donde se realiza la extracción de cobre a tajo abierto entre 3.500 y 4.000 metros sobre el nivel del mar (Guía Minera de Chile, 2020).

Además de los negativos efectos sobre la criósfera local, la que se ha prolongado por décadas, la cercanía de ambas faenas mineras al Santuario de la Naturaleza de Yerba Loca y los prolongados efectos de los materiales particulados y otros contaminantes aportados a la atmósfera local, todos arrastrados por los vientos y depositados sobre hielo y nieve, han estado afectando el balance de masa de los glaciares y acelerando la fusión de la nieve y el hielo al alterar su albedo natural, entre otros efectos (Brenning & Azócar, Minería y glaciares rocosos: impactos ambientales, antecedentes políticos y legales, y perspectivas futuras, 2010). Estos efectos han llevado a los organismos de base locales a una contienda judicial contra estas faenas mineras por el daño a los recursos hídricos y a los ecosistemas de montaña, la que aún no se resuelve.

1.4 Objetivos

Objetivo general

Contribuir al conocimiento sobre los glaciares rocosos presentes en la cuenca del estero
Yerba Loca

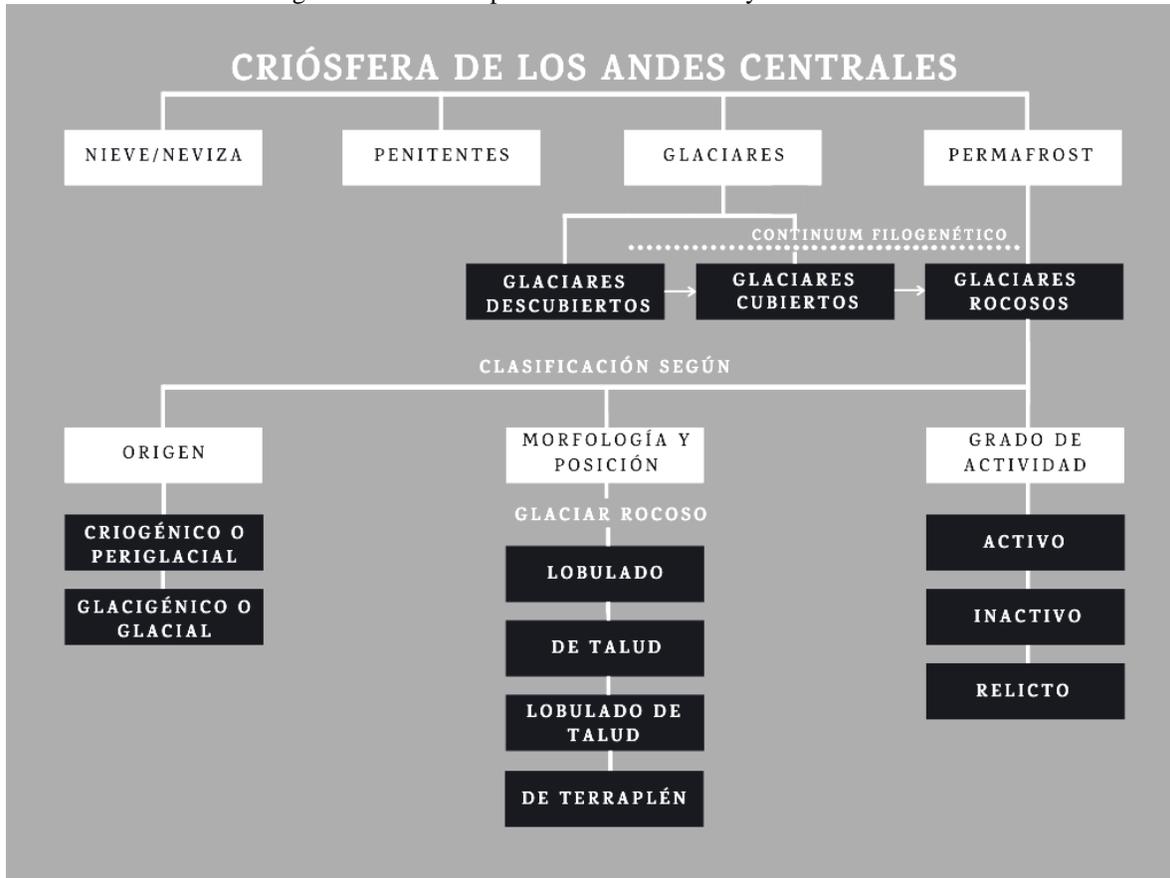
Objetivos específicos

- 1.** Identificar los glaciares rocosos y cubiertos en la cuenca del Santuario del Estero Yerba Loca
- 2.** Describir las características morfológicas, de origen y actividad dinámica de los glaciares rocosos identificados
- 3.** Caracterizar los glaciares rocosos y cubiertos descritos según su morfometría e hidrología
- 4.** Ilustrar la glacio-geomorfología de la cuenca del Santuario del Estero Yerba Loca

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

El presente Marco Teórico busca como objetivo principal enmarcar la realización de este trabajo dentro de concepciones teóricas que actualmente siguen en constante discusión (Fig. 8), entregando un contexto de referencia para los y las lectoras.

Fig. 8. Marco conceptual sobre la Criósfera y sus elementos



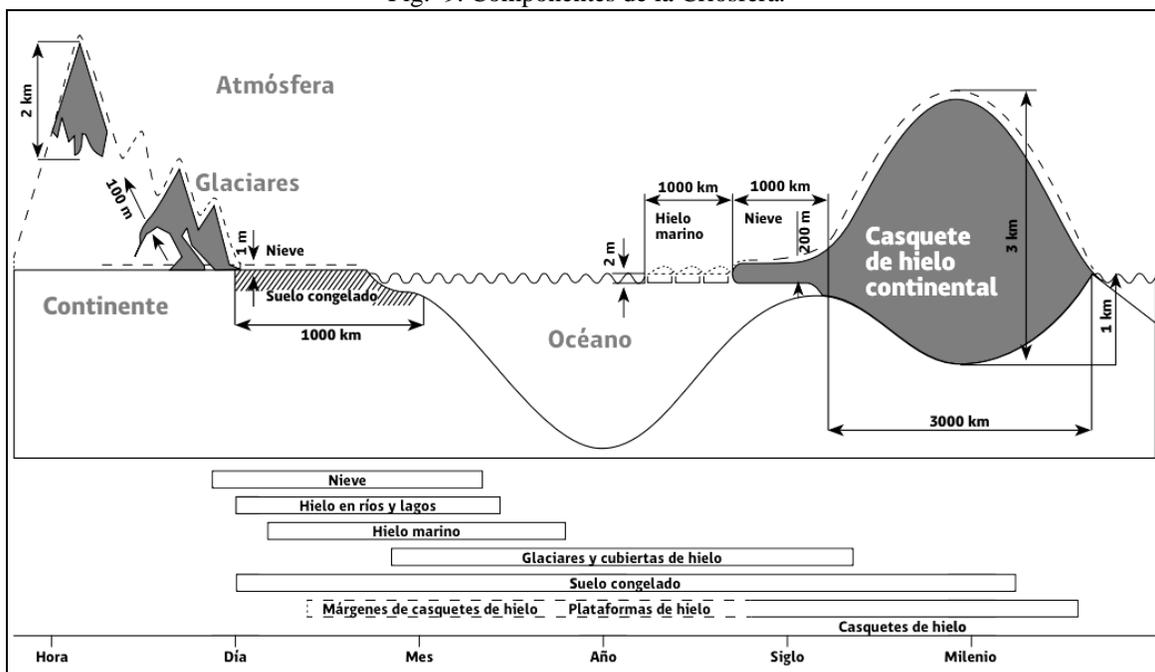
Fuente: Elaboración propia (2020)

2.1 Criósfera

La criósfera (del término *kryos*: hielo), es el subsistema terrestre formado por las regiones y zonas en las que el agua se encuentra en estado sólido, incluyendo áreas con temperaturas bajo cero de forma estacional o permanente. Está constituida por la cobertura de nieve, neviza, glaciares, campos de penitentes, calotas glaciales, suelos congelados o permafrost y pergelisol, lagos, ríos congelados, hielo marino y el hielo atmosférico (mod. de (Ahumada & Ibañez, 2009); (Rivera, Bown, Napoleoni, Muñoz, & Vuille, 2016); (UNESCO, 2018)). En base a esto, la criósfera en los Andes Centrales está conformada por: nieve, neviza, penitentes, glaciares y permafrost, último que incluye a todos los glaciares rocosos (Kreiner, 2001 en Ferrando, 2002).

Cada componente de este subsistema se puede comportar diferenciadamente frente al cambio climático, por lo que las escalas de tiempo en que se experimenten los cambios pueden variar desde horas, días, años y hasta milenios, dependiendo de sus características dinámicas, termodinámicas, geográficas, topográficas, entre otras. (Rivera, Bown, Napoleoni, Muñoz, & Vuille, 2016).

Fig. 9. Componentes de la Criósfera.



Fuente: (Rivera, Bown, Napoleoni, Muñoz, & Vuille, 2016) en base a (IPCC, 2013)

2.2 Glaciares

2.2.1 Concepto general de glaciar y clasificación general para los Andes Centrales

Según Ferrando (2013), un glaciar es “todo cuerpo de hielo de diferentes formas y dimensiones, que ubicado sobre diferentes relieves (cumbres, laderas, fondos de valle, etc.):

1. presenta distintos porcentajes de hielo y material detrítico tanto interior como en superficie (los contenidos de detritos superficiales e internos pueden variar desde nulos o leves para glaciares descubiertos a $\pm 90\%$ o más en glaciares rocosos.
2. pueden registrar diferentes y cambiantes velocidades de flujo, las cuales pueden variar desde 0 m/día en cuerpos de hielo sin movimiento de flujo, a varios m/día.
3. su permanencia es de escala secular o superior, pudiendo permanecer miles a millones de años.”

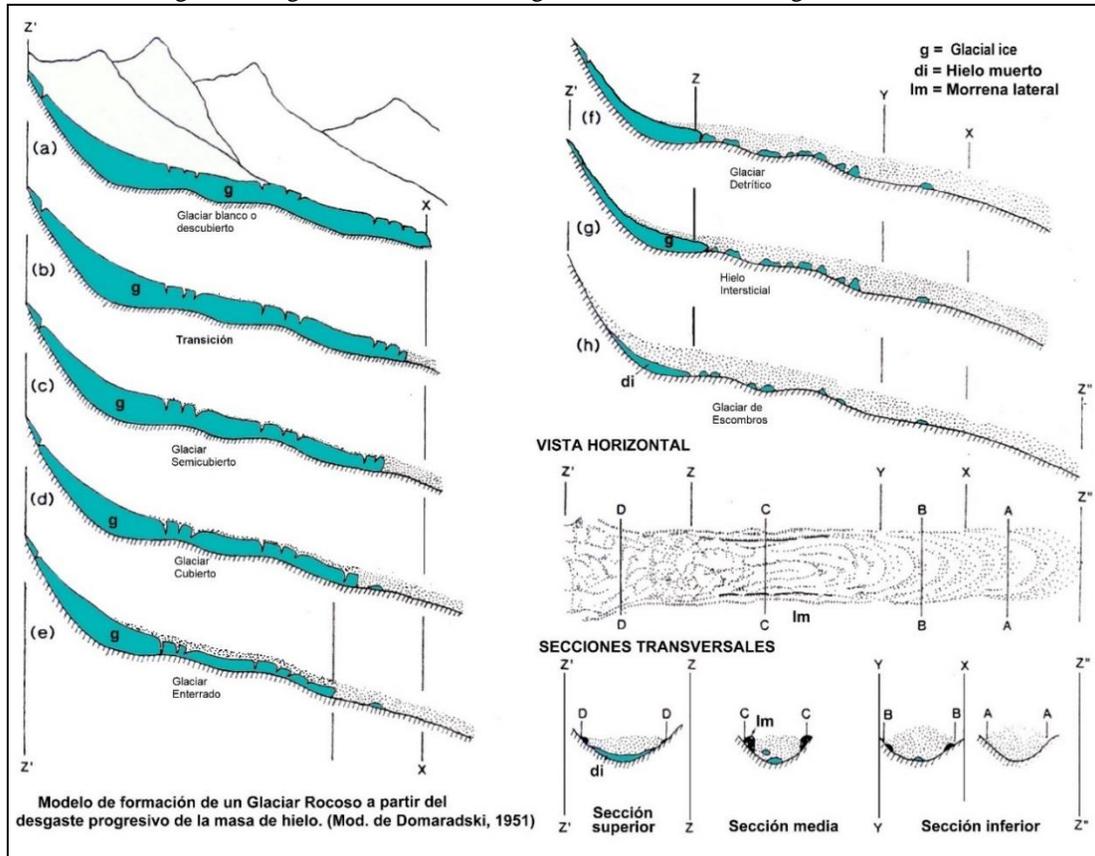
En Janke, Bellisario, & Ferrando (2015) se presenta en base a múltiples investigaciones de autores como (Corte, 1975, 1976a,b; Soto et al., 2002; Brenning, 2003, 2005, 2008, 2010; Ferrando, 2003; Ferrando et al., 2003; Azócar and Brenning, 2008; Bown et al., 2008; Geostudios, 2008a,b; Nicholson et al., 2009; Bodin et al., 2010; Brenning and Azócar, 2010; IANIGLA, 2010; Ferrando, 2012 y Ferrando et al, 2015), la clasificación tradicional y general para los Andes Centrales, la cual se presenta en 3 subdivisiones generales:

1. **glaciares descubiertos o blancos**, donde el hielo es claramente visible con muy poco porcentaje de detritos internos o externos.
2. **glaciares cubiertos**, los cuales poseen una superficie cubierta parcialmente a totalmente por un manto morrénico de diferentes espesores.
3. **glaciares rocosos**, los cuales se caracterizan por poseer, además de un manto detrítico superficial grueso, un interior caracterizado por una mezcla de hielo y sedimentos de diferente granulometría y en porcentajes de proporción variables.

Respecto a la última clasificación, se agrega la diferenciación en cuanto a su origen, donde las hipótesis presentadas han sido controversiales desde el inicio de las investigaciones en la década de 1950. En efecto, Barsch (1996) explica en su libro “Rock-glaciers” que esta discusión ha tenido aportes de varios grupos de investigadores (desde estudiantes a investigadores en el campo de la geomorfología glacial, glaciología y geocriología); quienes en síntesis postulan dos posibles orígenes principales a modo separado: uno periglacial o criogénico y otro glaciogénico. En tal sentido, los glaciares rocosos de origen periglacial se

autoforman por criogénesis en la sección media y base de las laderas; y los glaciares rocosos de origen glacial, son aquellos que derivan de glaciares blancos que por consunción se van cubriendo de detritos, incrementando el porcentaje con relación al hielo en su interior (Ferrando, 2003). Aunado a esto, también se postuló la concepción del “continuum filogenético” para explicar que los glaciares rocosos de origen glacial evolucionan gradualmente a partir de glaciares descubiertos. Esta evolución se expresa en el siguiente diagrama:

Fig. 10. Diagrama evolutivo de un glaciar descubierto a un glaciar detrítico



Este proceso consiste en un adelgazamiento progresivo del cuerpo de hielo, incremento gradual de la fragmentación y aumento del material morrénico. Así, se tiene en a) y b) el glaciar descubierto; en c) y d) un glaciar semicubierto; en e) un glaciar cubierto; en f) y g) la fase de hielo intersticial, y en h) el glaciar de escombros. La vista horizontal muestra las características morfológicas que se desarrollan en el manto morrénico de superficie, como son los cordones y surcos convexos (*ridges and furrows*). Los cortes transversales muestran las variaciones en contenido de hielo de las diferentes secciones. Fuente: modificado por Ferrando (2017) desde Domaradski (1951).

2.2.2 Concepto de Glaciar Cubierto y Glaciar Rocoso

Al interior del valle del Estero Yerba Loca se reconocen y se estudian los siguientes tipos de glaciares:

Glaciar Cubierto (GC)

Dentro de la noción de *continuum filogenético*, los glaciares cubiertos son formas transicionales de procesos glaciales que se forman a través del progresivo enterramiento de glaciares blancos, y posterior deformación del hielo bajo una capa superior de material detrítico o escombros de roca, también llamado “manto morrénico superficial” (Giardino & Vitek, 1988) en Burger, Degenhardt, & Giardino (1999); (Owen & England, 1998); (Janke, Bellisario, & Ferrando, 2015). Según Barsch (1996) y (Fyffe, Reid, Brock, & etal, 2014), el hielo de los glaciares cubiertos se encuentra enterrado bajo una morrena superficial de espesor variable, la cual puede desarrollarse como consecuencia de un gran aporte detrítico a través de una combinación de mecanismos como avalanchas, caídas de rocas u otros movimientos de masas, las cuales serían de una tasa más alta en comparación con el flujo del hielo o bien, por un balance de masa negativo del glaciar que hace aflorar la morrena interna de forma progresiva. Dependiendo del grosor de esta capa de material o morrena superficial, se puede acelerar el derretimiento del cuerpo de hielo (espesor inferior a ± 3 m) o se convierte en una capa aislante (espesor superior a ± 3 m), reduciendo la ablación y preservando parte de un antiguo glaciar descubierto (Janke, Bellisario, & Ferrando, 2015). Esta variación del rol del manto morrénico según espesor se determinó en base a mediciones en la zona semiárida de Chile. Para Chile central, según Brenning (2003) este valor sería cercano a los 5 m en base a estudios en la cuenca del Río Yeso, cuenca del Río Maipo.

Glaciar Rocoso (GR)

En general se pueden describir como un cuerpo o un relieve con forma lobulada o de lengua, que consiste en una mezcla de cantos rodados angulares con uno o varios núcleos de hielo, o matriz cementada con hielo, donde ha alcanzado suficiente acumulación de detritos en su superficie para mantener el hielo interno. De esta forma, los GR ocuparían la posición final dentro de la concepción del *continuum filogenético*, que según la IPA Action Group Rock Glacier (2020), son identificados en base a una morfología distinguible: márgenes frontales, laterales, y topografía superficial de crestas y surcos

En cuanto a su origen, se destaca la investigación de (Azócar & Brenning, 2010) donde indica que el origen de la formación de los glaciares rocosos estudiados en los Andes Centrales chilenos es mixto, es decir, pueden ser de origen glaciogénico o criogénico dependiendo de su posición en el relieve. En esta misma línea Farbroth, Isaksen, Eiken, & al, (2005) en base a (Haerberli & Vonder Mu`hll 1996, Berthling et al. 1998, Isaksen et al. 2000)

señala que el hielo de los glaciares rocosos puede tener múltiples orígenes, incluida la congelación de aguas subterráneas y superficiales, así como el entierro de nieve o de hielo.

2.2.3 Clasificaciones para Glaciares Rocosos

En base a la definición de glaciar rocoso explicada anteriormente, en el marco de este trabajo de investigación los glaciares rocosos se clasifican geomorfológicamente según tres categorías principales: morfología, posición y grado de actividad, con el fin de caracterizar cada geoforma de la manera más específica posible.

Según morfología y posición

En primer lugar, y de acuerdo con su morfología y posición, se puede hacer referencia a los glaciares rocosos criogénicos. Estos evolucionan a partir de la formación de hielo dentro de los depósitos coluviales o gravitacionales. Dentro de este grupo se diferencian formas como:

1. glaciares rocosos de talud (GRT) o talus rock glacier (ver Fig. 11)
2. glaciar rocoso lobulado de talud (GRLT) o lobated talus rock glacier
3. glaciar rocoso de terraplén (GRR) o protalus rampart rock glacier

A modo de ejemplo, los glaciares rocosos de talud (GRT) están asociados al ámbito periglacial en base al modelo hidrostático de (Burger, Degenhardt, & Giardino, 1999). Tienen su origen en depósitos de detritos gravitacionales, iniciando su formación en base a un abultamiento convexo en una zona de permafrost, el cual comienza a moverse ladera abajo para que luego aparezca una parte más plana que funciona como zona de depositación para el desplazamiento gravitacional de detrito y avalanchas (Azócar & Brenning, 2010). En estos tipos de GRT, las formas lobuladas son comunes, no así las formas onduladas (Frauenfelder, Laustela, & Kääb, 2005) y (Ferrando, 2003a), encontrándose dispuestas en forma perpendicular al eje del valle.

Un segundo grupo lo constituyen los glaciares rocosos glaciogénicos, los que derivan de glaciares blancos de valle y que se alimentan de sedimentos glaciogénicos y peri-glaciogénicos. Dentro de este grupo se distinguen los glaciares semicubiertos y cubiertos; los cuales evolucionan a glaciares rocosos detríticos, pasando por la fase denominada hielo intersticial, luego a los glaciares de escombros y, finalmente, los glaciares fósiles o relictos. A modo de ejemplo, el Glaciar Rocos Detrítico (GRD) o debris rock glaciers tiene una localización homóloga a la del glaciar blanco del cual se originó y presenta morfologías superficiales acordes a los movimientos que registra. Según Barsch (1996), corresponden a formas criogénicas que tienen una proporción de $50\pm 10\%$ entre hielo y material morrénico interior.

Fig. 11. Ejemplo de glaciar rocoso de valle (GR) y de talud (GRT) en la cuenca superior Río Limarí



En ambas fotografías se pueden observar los flujos activos, los materiales frescos de sus taludes frontales y en el caso de la derecha, su flujo en dirección al valle, mientras que a la izquierda se aprecia la estrecha relación del cuerpo glaciar con la ladera del valle. (Fotografía derecha: J.P. Valenzano (2020) y fotografía izquierda: F. Ferrando)

Según grado de actividad

La clasificación de los glaciares rocosos, según el grado de actividad en función de la observación visual de la morfología e indicadores relativos a vegetación, puede subdividirse en tres tipos de glaciares reunidos en dos grupos según la IPA Action Group Rock Glacier (2020):

1. Glaciares rocosos intactos

a) Glaciar rocoso activo: Un glaciar rocoso activo se reconoce por su movimiento en la ladera - valle abajo, formando lenguas o lóbulos como expresión geomorfológica (Barsch, 1996). Estos reptan desde centímetros a metros por año en el sentido de la pendiente debido a la gravedad y a la deformación del hielo interno y sedimentos congelados (Giardino & Regmi, 2014), (Potter, 1972; Washburn, 1979) en Whalley & Azizi (2003), (Owen & England, 1998) y (Janke, Bellisario, & Ferrando, 2015). Según Azócar & Brenning (2010) y Barsch (1996), la principal característica que evidencia el movimiento es el escarpe frontal marcado, el cual posee una pendiente que alcanza valores de $>30^\circ$ hasta 50° . Otro signo del grado de actividad lo indica la frescura de los materiales detríticos del talud, lo cual habla de su reciente derrumbamiento producto del empuje glaciogénico (Ferrando, comunicación personal, 2020)

Hidrológicamente, los glaciares rocosos activos pueden ser considerados como sumideros de agua en el sistema hidrológico (Azócar & Brenning, 2010), ya que consisten en una mezcla de un 40 a 60% de material clástico y 60 a 40% de hielo (principalmente hielo intersticial y de segregación) (Barsch, 1996), (Arenson, Hoelzle, & Springman, 2002)

b) Glaciar rocoso inactivo: Los glaciares de roca inactivos, según Barsch (1996) y Azócar & Brenning (2010), todavía contienen hielo en su interior, pero no se registra movimiento ni avance, identificándose en una etapa de estancamiento, lo cual puede deberse a causas climáticas, geomorfológicas o hidrológicas. A causa de esta inactividad, las formas que presentan consisten en una transición convexa suave entre su superficie y el talud frontal, mientras que su relieve superficial todavía está bastante bien conservado (Brenning & Azócar, 2010) y (Ferrando, 2003a).

Cabe destacar que, por otra parte, la evolución morfológica del manto morrénico de los glaciares rocosos tanto activos como inactivos suele manifestarse con movimientos de flujo del material detrítico, como si fueran debris-flows supraglaciales, lo cual es resultado de la interacción entre estadios de mayores temperaturas y presencia de hielo a poca profundidad. Ello genera depósitos alargados en forma de lenguas detrítica que modifican la configuración de los ridges & furrows (Ferrando, comunicación personal, 2020)

2. Glaciar rocoso relicto

c) Glaciar rocoso fósil o relicto: Un glaciar de roca fósil se caracteriza por estar desprovistos de movimiento, indicando el derretimiento completo del hielo que lo formaba y la presencia anterior de permafrost (Brenning & Azócar, 2010). Sus formas ya están decaídas debido a la pérdida del contenido de hielo y en su superficie puede preservar elevaciones débiles remanentes de las estructuras de flujo (Azócar & Brenning, 2010). Este autor explica que este tipo de glaciar a veces es confundido con morrenas, lo cual puede evitarse, en la mayoría de los casos, al analizar las estructuras superficiales de esas geoformas, existiendo diferencia en el grado de rubefacción de los materiales en la cara expuesta, y la ausencia de la depresión relativa que suelen presentar detrás del borde frontal (Ferrando, 2003b)

2.3 Permafrost

El permafrost, también llamado “pergelisol”, “gelisuelo” o “permahielo” es un sustrato (suelo, sedimento o roca) que permanece bajo los 0°C por al menos dos años consecutivos (Harris & etal, 1988). Hay investigadores que prefieren reservar el concepto permafrost para sedimento o roca congelados, lo que es más propio de alta montaña, y el concepto pergelisol para suelo congelado propiamente tal, como ocurre en altas latitudes del hemisferio norte (Ferrando, comunicación personal, 2020)

En base a la definición puramente térmica, Gruber & Haeberli (2009) y Harris & et al (1988) señalan que el permafrost no necesariamente contiene agua o hielo y que “cada sustrato es permafrost cuando está sujeto a ciertas condiciones de temperatura”. Sin embargo, la mayoría de las áreas de permafrost andino experimentan deshielo estacional, denominándose "capa activa" al material que está sujeto a cambios estacionales de

temperatura que sobrepasan los 0°C, la cual tiene un espesor común de 0.5–8 m ((Gruber & Haeberli, 2009).

Una clara evidencia de este deshielo es la afectación de las laderas crióticas andinas, producto del calentamiento global, con fenómenos de geliflujión y flujos detríticos (Vergara Dal Pont, Santibañez, Araneo, Ferrando, & Moreiras, 2018) y (Vergara Dal Pont, Moreiras, Santibañez, Araneo, & Ferrando, 2019).

En este sentido, se ha establecido mediante mediciones con cintas termistoras que la mayor concentración de calor se produce entre 0,5 y 1,0 m de profundidad, y no en superficie por el efecto del viento (Ferrando, 2003a) lo cual tiene gran trascendencia en la estabilidad de las laderas con permafrost cercano a la superficie.

En Chile, el permafrost es de tipo montañoso y se encuentra en la Cordillera de los Andes sobre los 3500 msnm y aisladamente a los 3000 msnm (Azócar & Brenning, 2010); (Gruber & Haeberli, 2009) señalan al permafrost de montaña como un fenómeno extremadamente variable y heterogéneo, difícil de medir, difícil de modelar, donde la topografía y la exposición solar poseen una gran influencia, por lo que domina la extrema variabilidad espacial en sus características, extensión, continuidad, espesor y propiedades.

2.3.1 Relación entre permafrost y Glaciares Rocosos (GR)

La relación entre el permafrost y los GR es reconocida por varios autores: Barsch (1996) indica que los glaciares rocosos, especialmente los activos, son indicadores de la existencia de permafrost a sus alrededores. A su vez, Owen & England (1998) postulan al permafrost como uno de los requisitos esenciales para el mantenimiento de los núcleos de hielo en los glaciares de roca. En este mismo sentido, Gruber & Haeberli (2009) explican que “el permafrost es un elemento importante de la evolución del paisaje debido a los accidentes geográficos característicos como los glaciares de roca, las morrenas de empuje y los glaciares colgantes están conectados a su existencia mediante los mecanismos de transferencia de sedimentos a largo plazo.”

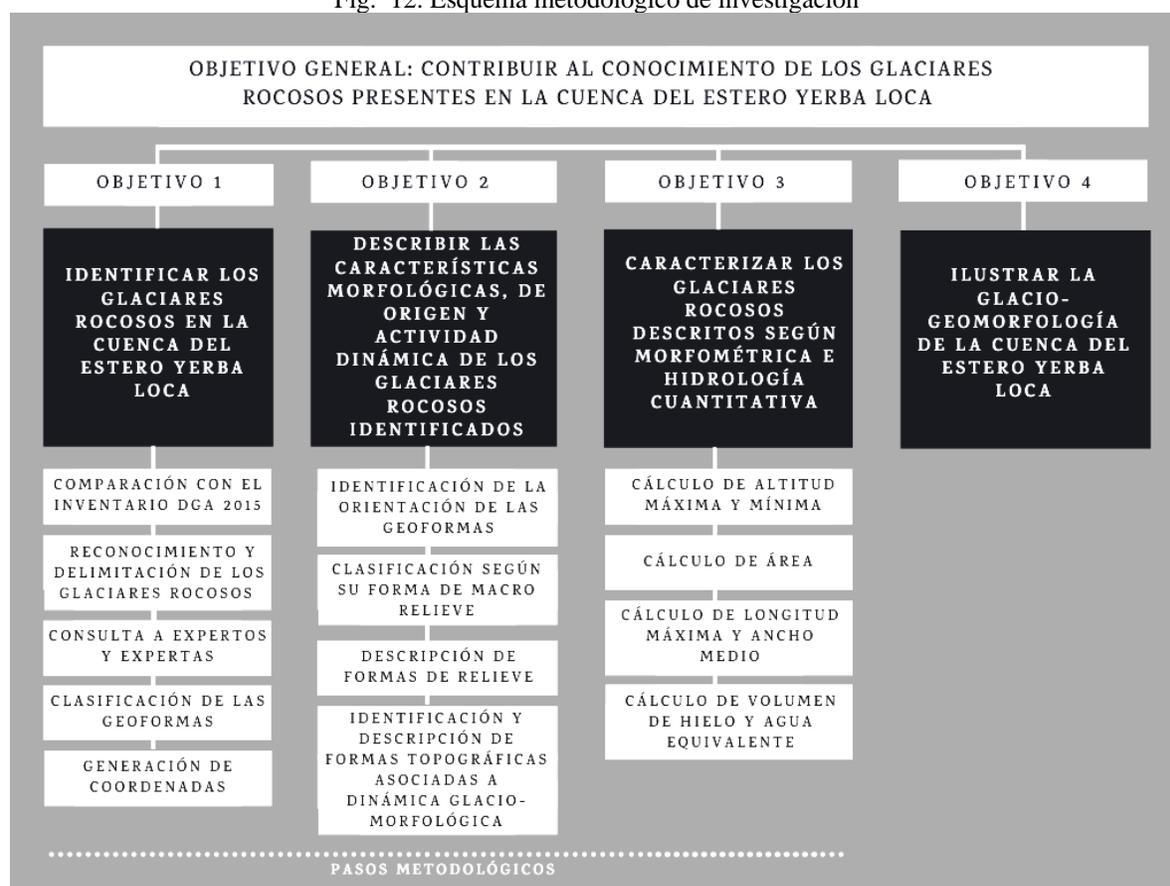
En cuanto a su monitoreo, Brenning & Azócar (2010) resaltan que en el caso del permafrost de montaña, se reconoce que éste se extiende a zonas cercanas a los glaciares de rocosos activos, y (Humlum, 1998; Konrad et al., 1999; Millar et al., 2015; Sorg et al., 2015) en Pandey (2019) señalan que los glaciares rocosos “son el mejor indicador geomórfico del permafrost en las regiones montañosas empinadas, por lo tanto, el conocimiento de su distribución puede proporcionar información confiable sobre las incidencias pasadas del permafrost y las condiciones climatológicas relacionadas”.

CAPÍTULO III: MARCO METODOLÓGICO

La metodología ocupada en el presente trabajo nace a partir de la recopilación y adecuación de otros métodos ocupados por autores como Soto Bäuerle, Ferrando, & Vieira, (2002), Pandey (2019), IPA Action Group Rock Glacier (2020), entre otros. Posee una orientación descriptiva, comparativa, cuantitativa y analítica, en donde la caracterización de los glaciares rocosos está sometida una incertidumbre relativa dada la complejidad en la identificación e interpretación de su morfología. En este sentido, se acepta que la subjetividad es parte del proceso de reconocimiento y análisis de los glaciares rocosos.

A continuación, se presenta el esquema metodológico general donde se agrupan los procesos y pasos metodológicos más importantes para lograr los objetivos específicos, y con ello, el objetivo general propuesto:

Fig. 12. Esquema metodológico de investigación



Fuente: Elaboración propia

3.1 Materiales utilizados

Software e imágenes satelitales

Se utilizan las imágenes del Programa Google Earth Pro y se delimitan los glaciares rocosos identificados mediante polígonos en formato *kmz* en imágenes Quickbird propias del programa. Luego se utiliza el software ArcMap para la organización de los polígonos y realización de cartografías y figuras explicativas.

Fig. 13. Ejemplo de la resolución espacial para la identificación de crioformas



Se muestra una comparación de la visualización de un glaciar rocoso: A la izquierda una composición de bandas con resolución de 30 m para Landsat-8 y a la derecha una imagen CNES Airbus 2020 de Google Earth Pro.

Modelo de Elevación Digital (DEM)

El Modelo de Elevación Digital para la cuenca del Estero Yerba Loca se obtuvo desde la base de datos de Google Earth Engine, y corresponde al *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) (Farr & et al, 2007), donde se abarca casi la totalidad de los continentes a una resolución de 30 m, llenando los espacios vacíos usando datos de código abierto de ASTER GDEM-2, GMTED2010 y NED (Google Earth Engine, 2020).

3.2 Pasos Metodológicos

La estructura metodológica de esta investigación se orienta a satisfacer en los cuatro objetivos específicos planteados. A continuación, se detallan los criterios y los procesos llevados a cabo en cada uno de ellos:

3.2.1 Objetivo 1: Identificación de los glaciares rocosos presentes en el Santuario de la Naturaleza Yerba Loca

Identificación, delimitación y clasificación

La identificación inicial de los glaciares rocosos se hizo de forma visual a partir de las descripciones teóricas y en base al catastro de la Dirección General de Aguas del año 2015. Los criterios de delimitación para los glaciares rocosos se basaron en reconocimiento visual mediante su morfología particular, cambios de pendiente, cambios de textura superficial y colores de los flujos. De esta forma, se realizaron dos delimitaciones en cada glaciar rocoso (Fig. 14): primero se realizó una delimitación general para la identificación de las formas en su macro relieve, donde se incluye el talud de avance frontal y lateral, identificando también las crestas y surcos; en segundo lugar, se delimitaron los glaciares rocosos excluyendo los taludes frontales y laterales. En esta etapa del trabajo se realizaron consultas técnicas a expertos y expertas en la disciplina². Finalmente, después de ambas delimitaciones, se clasificaron según lo expuesto en (Janke, Bellisario, & Ferrando, 2015) según glaciares cubiertos o rocosos.

Fig. 14. Delimitaciones realizadas en cada glaciar rocoso



² Las investigadoras consultadas fueron Carla Tapia Baldis – Doctora en Ciencias Geológicas (UNSJ) e investigadora de IANIGLA, Mendoza; y Laura Zalazar – Profesional encargada de mapeo en Inventario Nacional de Glaciares, CONICET – Argentina.

Coordenadas centrales

Para generar el centroide y con ello, poder asignar las coordenadas centrales de cada polígono que representa un glaciar rocoso, se utilizó la herramienta *Feature to point* en ArcMap, la cual “crea una entidad que contiene puntos generados a partir de ubicaciones representativas de entidades de entrada” (ESRI, 2016a)

3.2.2 Objetivo 2: Descripción de las características morfológicas, posición y actividad dinámica de los glaciares rocosos presentes en el Santuario de la Naturaleza Yerba Loca

Exposición

La identificación de la exposición se realiza en base a la dirección de flujo de cada glaciar rocoso, y se asigna dentro de ocho clases: N, NE, E, SE, S, SW, W y NW. La herramienta utilizada para la definición fue *Aspect* en base al DEM-SRTM con método geodésico, ya que “el cálculo se realizará en un sistema de coordenadas cartesianas 3D al considerar la forma de la tierra como un elipsoide.” (ESRI, 2016b)

Descripción de las geoformas identificadas

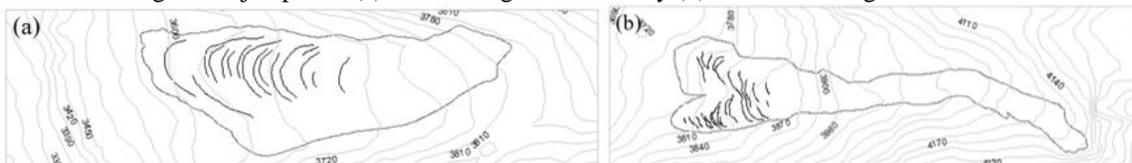
Para la descripción de los glaciares rocosos, primero se han ordenado los glaciares según morfología y posición, la cual clasifica estas geoformas según a) glaciares rocosos lobulados, b) glaciares rocosos de talud, c) glaciares rocosos lobulados de talud y d) glaciares rocosos de terraplén. Luego se han descrito los diferentes factores y cualidades importantes para lograr la mayor comprensión de su naturaleza.

Formas de macro relieve

En base al reporte de la IPA Action Group Rock Glacier (2020) se clasifican los glaciares rocosos para el reconocimiento y caracterización, a través de unidades y sistemas, a saber:

- a) **Unidad de glaciar rocoso:** Forma de relieve correspondiente a un glaciar rocoso de estructura lobulada única que puede ser reconocida sin ambigüedades.
- b) **Sistema de glaciares rocosos:** Forma de relieve identificada como glaciar rocoso que se compone de dos o más unidades lobuladas que están conectadas espacialmente, por lo que los límites exactos de cada uno no son fáciles de reconocer.

Fig. 15. Ejemplo de (a) unidad de glaciar rocoso y (b) de sistema de glaciar rocoso



Fuente: Elaboración propia (2019)

Formas de relieve

En cuanto a las formas de relieve, Azócar & Brenning (2010), Giardino & Regmi (2014), Janke, Bellisario, & Ferrando (2015) y la International Permafrost Association en (IPA Action Group Rock Glacier, 2020), indican que los glaciares rocosos son distinguibles en el paisaje por su morfología frontal, sus márgenes laterales y por su topografía de crestas y surcos arqueados hacia abajo que indican el flujo, lo que le da un característico patrón “arrugado” en su superficie. A continuación, se describe esta morfología:

- a) **Talud o margen frontal:** Es un talud distinguible que delimita la parte terminal del área móvil sobre un terreno sin movimiento o más lento. Cuando no es erosionado, dibuja una morfología convexa perpendicular a la dirección principal del flujo. Para un glaciar rocoso que se desarrolla en una pendiente pronunciada, el frente puede ser difícil de reconocer (IPA Action Group Rock Glacier, 2020), sobre todo en cuanto a su límite inferior. Barsch (1996) indica que, en las fotografías aéreas, los márgenes frontales y laterales aparecen “más claros” que la superficie de arriba, dando cuenta de la “frescura” del material. A modo de ejemplo, en la Fig. 15 se presenta un talud definido y otro talud frontal extendido y poco discernible:

Fig. 16. Taludes definidos y taludes extendidos.



La primera foto de la izquierda muestra un glaciar rocoso con un talud bien delimitado e identificable, mientras que en la imagen de la derecha se aprecia como el talud frontal del glaciar rocoso cae por la pendiente y se confunde con un cono de detritos, por lo que no sería posible delimitar exactamente hasta donde llegaría el talud, sino que se deja catalogado como “talud extendido”.

- b) **Taludes o márgenes laterales:** para la IPA Action Group Rock Glacier (2020) los taludes laterales son la continuación lateral del frente, no obstante, estos pueden estar ausentes, en particular en la parte superior de los glaciares rocosos.
- c) **Relieve de superficie:** El relieve de superficie de los glaciares rocosos está caracterizado por surcos y crestas o cordones transversales visibles (*ridges and furrows*), así como

cordones de flujos longitudinales, siendo en el primer caso la expresión superficial de las deformaciones internas del hielo (Barsch, 1996; Frehner et al, 2015) en Pandey (2019) y de movimientos de flujo del manto morrénico por incremento de la capa activa en el segundo caso (Ferrando, comunicación personal, 2020)

Fig. 17. Talud frontal de un glaciar rocoso en el Santuario Yerba Loca.



Elaboración propia a partir de Google Earth (2019).

Glacio-morfologías asociadas a la dinámica y sus expresiones topográficas

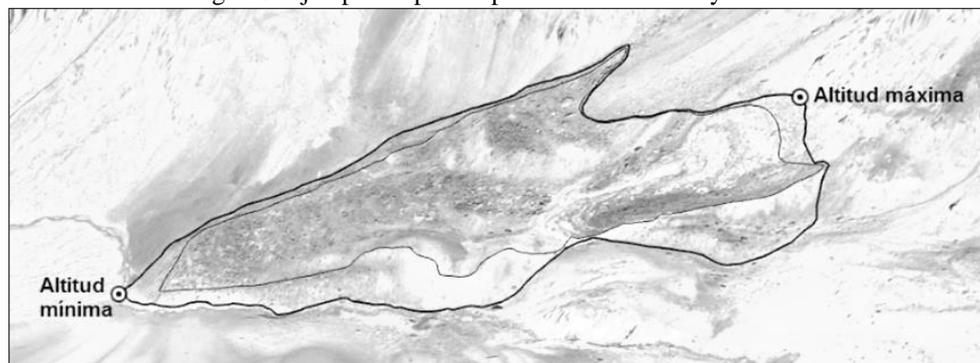
- a) **Estado y gradiente de escarpe de derrumbamiento:** En el caso de glaciares rocosos activos, se presenta como un frente abrupto con detritos frescos (baja meteorización) y ausencia de procesos de colonización vegetal, indicativo de ocurrencia de derrumbamiento activo (Brazier et al, 1998) en Soto Bäuerle, Ferrando, & Vieira (2002). Para Barsch (1996) es importante medir el gradiente de la pendiente frontal del glaciar rocosos en relación con el ángulo de reposo del material, para conocer el grado de actividad.
- b) **Thermokarst:** Accidentes geográficos ocurridos en áreas de permafrost con exceso de deshielo, donde incluso teniendo lugar a la posterior congelación repetida del suelo, es probable que persistan (Singh, Singh, & Haritashya, 2011). En los glaciares rocosos, se presenta como depresiones de colapso con lagunas y escarpes de subsidencia que dejan ver el hielo enterrado por el manto morrénico (Ferrando, 2017). Según Janke, Bellisario, & Ferrando (2015), la aparición de thermokarst sugiere “un desequilibrio en el sentido de que la acumulación de escombros no ha establecido un grosor suficiente para preservar un núcleo de hielo interno”, así como por el efecto de flujos hídricos intraglaciales que generan incremento del diámetro de los conductos, adelgazamiento del techo de ellos, y derrumbes locales por el peso del manto morrénico (Ferrando, comunicación personal, 2020)

3.2.3 Objetivo 3: Caracterización de los glaciares rocosos identificados según su morfométrica e hidrología cuantitativa

Cálculo de altitud máxima y mínima

En cuanto a la altitud máxima o límite superior, este se estima por rasgos morfológicos y por el cambio de pendiente respecto de los depósitos coluviales ubicados más arriba (International Permafrost Association, 2019). Mientras que la altitud mínima según (Scotti et al, 2013) en Pandey (2019) es la elevación a la cual la base del talud frontal del glaciar rocoso se encuentra con la superficie del terreno bajo ella.

Fig. 18. Ejemplo de puntos para altitud máxima y mínima



Elaboración propia en base a Google Earth (2019)

Cálculo de área

En este trabajo el término “área”, se refiere al equivalente planimétrico de la superficie del glaciar. Para el cálculo de proporciones de áreas se utiliza como superficie de referencia sólo aquellas áreas que no están caracterizadas por la presencia superficial de roca firme o afloramiento rocoso, es decir, el área de referencia comprende las superficies de roca no consolidada, hielo y nieve (Azócar & Brenning, 2010). El cálculo se realiza mediante las opciones automáticas del software ArcMap y se expresa en kilómetros cuadrados con su equivalente en hectáreas.

Cálculo de longitud máxima y ancho medio

Para la medición de la longitud de un glaciar rocoso según Pandey (2019), se identifica la longitud paralela al flujo desde su nacimiento hasta la base del talud frontal en las imágenes satelitales. Mientras que, en el caso del ancho medio, se decidió calcularlo de forma manual, realizando cuatro a cinco mediciones a lo ancho del cuerpo para posteriormente obtener un promedio de las medidas.

Cálculo de espesor, volumen de hielo estimado y equivalente en agua

Para determinar el espesor y volumen de hielo estimado para los glaciares rocosos clasificados en la cuenca del Estero Yerba Loca, se usará la relación entre superficie, espesor y volumen establecida por (Chen & Ohmura, 1990). Estas fórmulas publicadas el año 1990, se obtuvieron a partir de las mediciones de volumen llevadas a cabo en 63 glaciares alpinos a través de mediciones de radio eco sondaje y perfiles sísmicos, relacionando estos datos a sus superficies (Huenante, 2018). De esta forma, las fórmulas que se obtuvieron son las siguientes:

$$Espesor (m) = 28,5 \cdot S^{0,357}$$

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

Para la estimación de agua equivalente a partir del volumen de hielo obtenido para los glaciares rocosos y cubiertos que aborda este estudio, se ocupa una densidad de hielo del $0,9 \text{ g/cm}^3$ (Azócar & Brenning, 2010), y se considera un contenido de hielo del 50% en el volumen total, considerando lo afirmado por (Barsch, 1996; Hoelzle *et al*, 1998; Arenson *et al*, 2002) en (Azócar & Brenning, 2010): “La estructura interna de los glaciares rocosos está constituida por una mezcla de hielo (entre 40% y 60%) y material detrítico convirtiéndolos en reservorios de agua congelada acumulada durante el período postglacial”. De esta manera, la fórmula ocupada es la siguiente:

$$Eq \text{ agua }_{km^3} = [(S_{km^2} \times Espesor_m) \times 0,5] \times 0,9_{g/cm^3}$$

3.2.4 Objetivo 4: Mapeo glacio-geomorfológico de la cuenca del Santuario Yerba Loca

El mapeo de la glacio-geomorfología de la sección de la cuenca donde se encuentran los glaciares rocosos y cubiertos abordados en esta investigación, se muestra en una escala espacial de 1:35.000, abarcando la zona media y alta de la cuenca. Esta decisión fue tomada en base a que en la parte baja de la cuenca no se identifican signos de existencia de glaciares rocosos o permafrost. Cabe destacar que, el objetivo principal de esta cartografía es establecer una línea de base primaria de la criósfera del valle para su conocimiento general y frente a posibles impactos que trascienden desde actividades extractivas que se desarrollan en valles contiguos y sus proyectos de expansión.

3.3 Alcances y limitaciones de la investigación

1. Imágenes satelitales: No se pudieron utilizar imágenes Landsat ni Sentinel, ya que, si bien la resolución de ambas es de 30 m y 10 m respectivamente, las imágenes para libre descarga no entregan el detalle necesario para la identificación de los glaciares rocosos mediante su morfología.
2. Puntos de control: no existe forma de saber cuáles son los puntos de control de las imágenes base de Google Earth ocupadas en el proceso, por lo que la posición de las imágenes no es totalmente exacta, pero sí muy representativa del lugar.
3. Mapas base: al trabajar en zonas de alta montaña, la precisión de las representaciones en los mapas base no es la misma que en áreas de llanuras o territorios antropizados, ya que los puntos de control son mucho menos, por lo que la exactitud de lo que vemos representado es menor. Sin embargo, son muy eficientes para reconocimiento y generación de catastros.
4. Delimitación de límite superior de los glaciares rocosos: considerando que es una de las delimitaciones más complejas en el proceso de mapeo visual de glaciares rocosos (Pandey, 2019); (Krainer & Ribis, 2012), se considera que la incertidumbre asociada es reconocida como parte de la investigación, así los límites superiores son mapeados de forma referencial.
5. Actividad de terreno: Por causas de contingencia nacional y posterior pandemia, fue imposible realizar un trabajo elaborado en terreno, por lo que se realizó una visita general al área de estudio al finalizar este escrito con el objetivo de reconocer la cuenca estudiada.

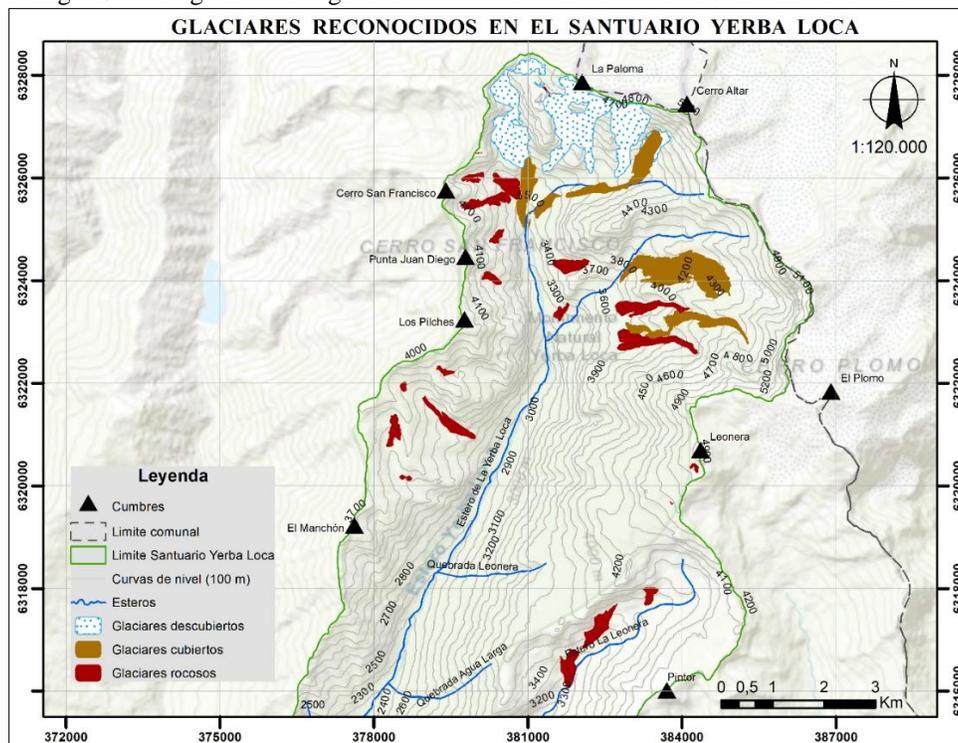
CAPÍTULO IV: RESULTADOS

Resultado 1: Glaciares rocosos y cubiertos presentes en el Santuario de la Naturaleza Yerba Loca

Como primer resultado, a partir de la identificación morfológica de las formas de la criósfera asociadas a ambiente periglacial y glacial, presentes en la cuenca del Santuario Yerba Loca, se identificaron un total de 27 geoformas³ (Fig. 18) que a continuación se organizar en dos grupos:

El primer grupo corresponde a los glaciares rocosos (GR, GRT, GRLT o GRR según el caso), encontrándose en la cuenca un total de 23 geoformas, de los cuales 17 se encuentran en estado activo y los 6 restantes, en un estado fósil o relicto. Mientras que el segundo grupo lo integran 4 glaciares cubiertos (GC) en diferentes estados de conservación. Esto significa una diferencia con el inventario de glaciares realizado por la Dirección General de Aguas al año 2015, ya que este indica la presencia de 34 glaciares rocosos y 4 glaciares de montaña; mientras que en este trabajo se reconocieron 23 glaciares rocosos y 4 glaciares cubiertos, además de 3 glaciares descubiertos.

Fig. 19. Cartografía de los glaciares rocosos reconocidos en el Santuario Yerba Loca



³ Cabe mencionar y agregar a estas 27 geoformas identificadas, la presencia de 3 glaciares descubiertos en la Cuenca del Yerba Loca (Glaciar La Paloma, Glaciar El Rincón y el último, sin nombre), los cuales no son abordados en esta investigación.

Resultado 2: Descripción cualitativa de las características identificadoras de los glaciares rocosos presentes en el Santuario de la Naturaleza Yerba Loca

Descripción de glaciares rocosos presentes en la cuenca del Yerba Loca

Como ya fuera mencionado en el marco metodológico, la descripción detallada y prolija que se presenta a continuación se ha subdividido y ordenando según la tipología por morfología y posición para los glaciares rocosos reconocidos. Esta clasificación consiste en:

- Glaciares rocosos de origen glaciogénicos:
 - a) glaciares rocosos de valle (GR)
- Glaciares rocosos de origen criogénicos:
 - b) glaciares rocosos de talud (GRT),
 - c) glaciares rocosos lobulados de talud (GRLT)
 - d) glaciares rocosos de terraplén o Rampart Protalus (GRR).

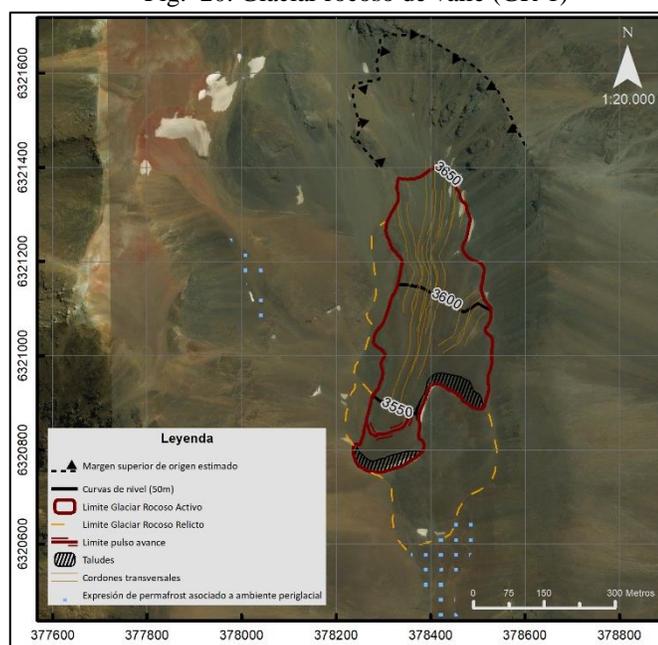
Glaciares rocosos de valle

Esta primera tipología reúne a los glaciares rocosos de valle (GRT) activos y relictos, siendo reconocidos 11 glaciares de un total de 23 presentes en la cuenca.

El primer glaciar de valle corresponde al GR-1 (Fig. 19), el cual se ubica a una altitud máxima de 3.667 m.s.n.m. y a una altitud mínima de 3.513 m.s.n.m. Abarca una superficie de 0,1 km² (10,8 ha) con una longitud de 555 m y un ancho medio de 145 m.

Se ubica en la parte superior de uno de los dos micro valles que se encuentran a las faldas del Cerro del Manchón, específicamente del lado sur. En su posición, recibe el material detrítico desde las laderas más altas. Su forma es lobulada o de lengua, donde se reconocen fácilmente cordones longitudinales a través de toda su extensión, lo cual indica movimientos de flujo del material morrénico,

Fig. 20. Glaciar rocoso de valle (GR-1)



evidenciando los efectos derivados del calentamiento sobre la capa activa, que es lo que desencadena este tipo de movimientos en masa supraglaciales. En él, es posible reconocer dos pulsos de avances recientes por la superposición de un pequeño lóbulo sobre el principal. En su parte frontal, se reconoce un talud de avance notorio y de color más claro que el resto de la geoforma, dando indicios de su reciente actividad.

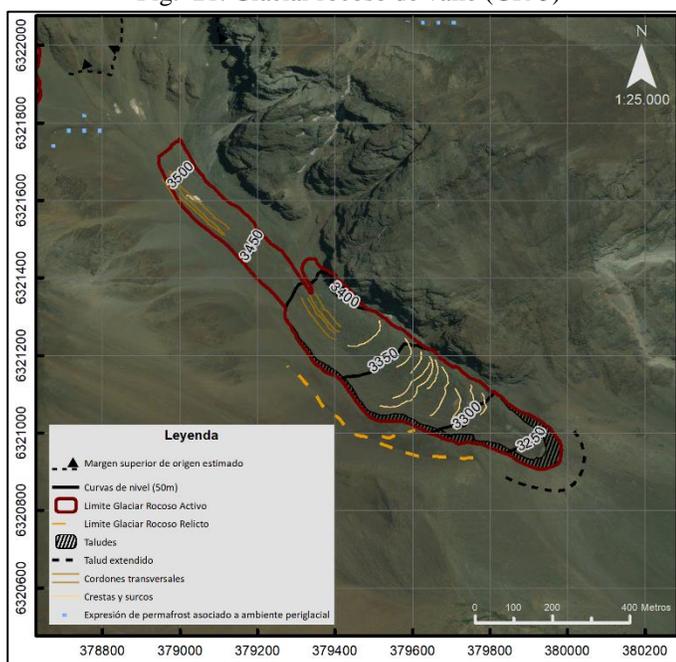
Cabe destacar que en el contexto morfológico de este glaciar rocoso de valle es posible observar una situación particular, ya que se distinguen crioformas derivadas de dos ciclos de glaciación en la zona contigua inferior al cuerpo criogénico. En este sentido, en la parte contigua al talud principal se distingue parte de la sección inferior de un antiguo glaciar rocoso, hoy en día en condición de relicto o fósil.

El segundo glaciar rocoso en esta clasificación es el GR-5 (Fig. 20), el cual se sitúa a una altitud máxima de 3.527 m.s.n.m. y una altitud mínima a los 3.204 m.s.n.m. Posee un área de 0,18 km² (18,13 ha) con una longitud de 948 m y un ancho medio de 130 m.

Su nacimiento se reconoce en la parte media del segundo micro valle que se origina bajo el Cerro del Manchón, específicamente, del lado norte. A esta misma altura, pero en la zona baja del valle, se encuentra la estación meteorológica La Lata.

En su avance por el valle, su forma de lengua va ganando anchura en la parte baja. En su perfil transversal se reconocen una tendencia a la concavidad de la geoforma y en su parte baja, se distinguen crestas y surcos transversales perpendiculares a la dirección del flujo. En el frente de la forma, el talud coincide con el término de la microcuenca formándose un talud extendido que llega al cauce del estero Yerba Loca en forma de cono gravitacional, por lo que no es posible delimitar el termino exacto del talud frontal, asignándosele la categoría de talud extendido. En cuanto a los taludes laterales, estos se encuentran bien conservados en el lado sur, mientras que los taludes laterales del lado norte se mezclan con las fuentes de alimentación de sedimentos coluviales, por lo que pierden nitidez.

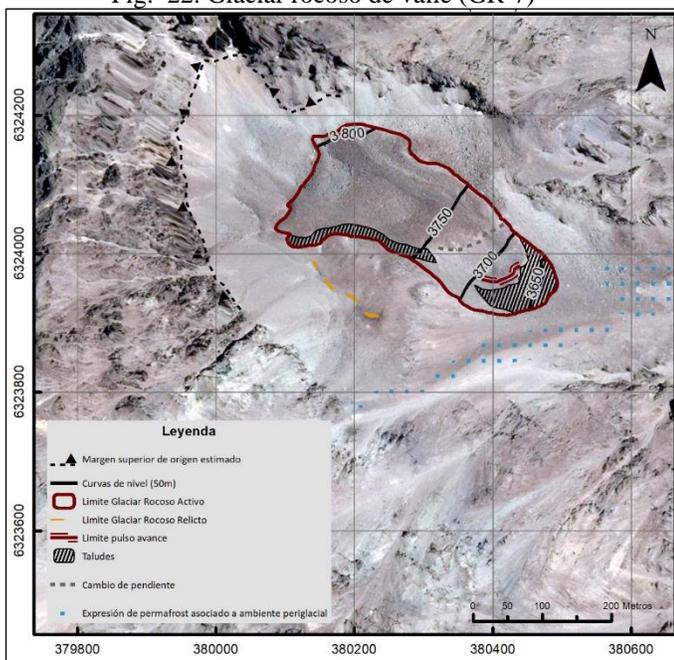
Fig. 21. Glaciar rocoso de valle (GR-5)



En tercer lugar, encontramos al glaciar rocoso de valle GR-7, ubicado a una altitud máxima de 3.800 m.s.n.m. y una altitud mínima de 3.630 m.s.n.m., este glaciar ocupa un área de 0,054 km² (5,46 ha) con una longitud de 336 m y un ancho medio de 118 m.

Morfológicamente corresponde a una lengua con desniveles marcados por lo fuertes cambios de pendiente del terreno. El frente del glaciar se distingue por el cambio de coloración de los detritos y por un talud prominente. En la zona lateral sur, el talud se encuentra bien conservado. En la superficie del glaciar rocosos es posible identificar evidencias de la dirección de flujo mediante cordones y surcos medianamente desarrollados.

Fig. 22. Glaciar rocoso de valle (GR-7)

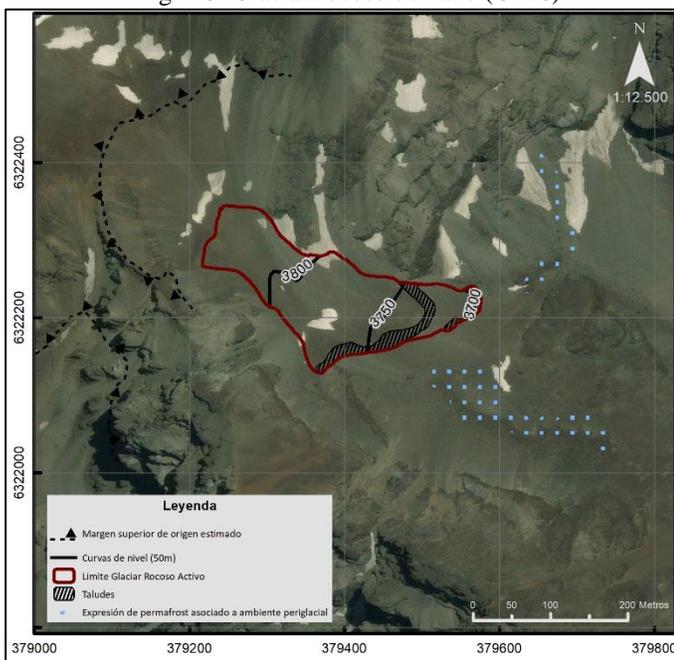


En el cuarto lugar de esta tipología, encontramos al GR-6 a una altitud máxima de 3.851 m.s.n.m. y una altitud mínima a los 3.697 m.s.n.m. Posee un área de 0,03 km² (2,23 ha) con una longitud de 213 m y un ancho medio de 71 m.

Con respecto a su ubicación, este glaciar rocoso se encuentra en el interior del micro valle perpendicular a la zona “Terraza Ceremonial”, en la zona alta de la cuenca donde existe un alto aporte de detritos.

Como consecuencia de la morfología del valle, este glaciar se va adaptando al cambio de dirección de las laderas que, junto al alto grado de enterramiento bajo los detritos, su forma de lengua es difícil de identificar. A pesar de esta condición, es posible identificar claramente dos pulsos de avance en base a dos taludes frontales consecutivos, los cuales presentan una

Fig. 23. Glaciar rocoso de valle (GR-6)

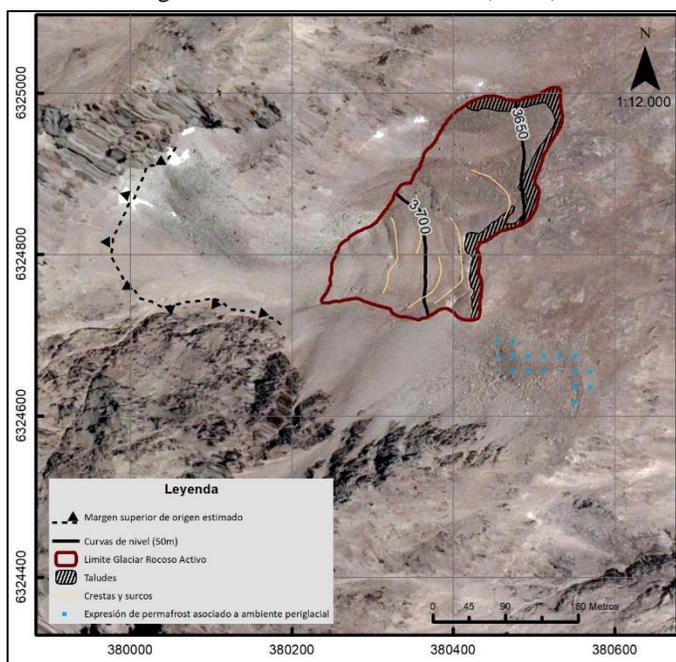


coloración más clara. El talud lateral, por su parte, que indica el cambio de dirección del flujo y presenta mayor longitud que el talud frontal de avance principal. Por último, asociado a la parte contigua baja de este glaciar rocoso, encontramos diferentes formas que podrían corresponder a permafrost, morrenas o también, glaciares de talud que no ha sido posible corroborar mediante la metodología aplicada.

En quinto lugar, tenemos el glaciar rocoso GR-8, ubicado a una altitud máxima de 3.725 m.s.n.m. y a una altitud mínima a los 3.624 m.s.n.m. Posee un área de 0,04 km² (4,4 ha) con una longitud de 342 m y un ancho medio de 113 m.

Es un glaciar rocoso de tipo lobulado. En su superficie se distinguen surcos y ondulaciones que indican su movimiento y dirección en el sentido longitudinal del valle. Posee marcados taludes frontales y laterales con alta pendiente y marcada coloración más clara con respecto a los detritos superficiales, lo que ratifica su condición de activo.

Fig. 24. Glaciar rocoso de valle (GR-8)

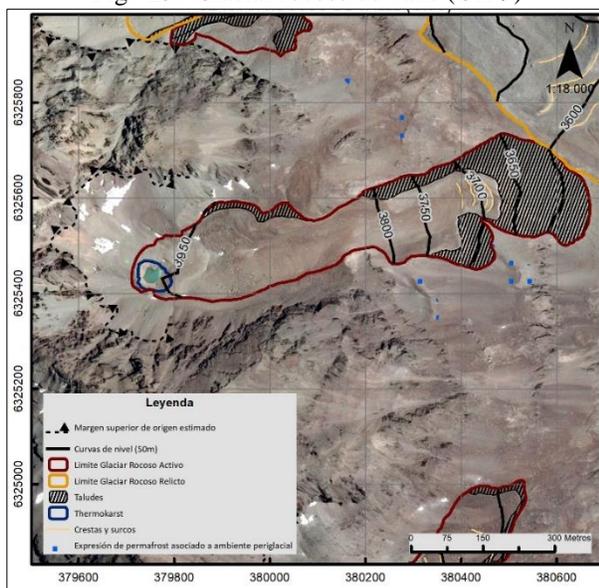


En parte de su superficie se reconocen depósitos provenientes de derrumbes de la ladera, lo cual incrementa localmente el espesor del manto detrítico aumentando la aislación térmica y, a la vez, teóricamente agregando sobrecarga al cuerpo de hielo, afectando potencialmente estabilidad interna en un futuro.

Luego, en sexto lugar, el glaciar rocoso GR-9 se presenta ubicado a una altitud máxima de 3.965 m.s.n.m. y una altitud mínima de 3.556 m.s.n.m. Posee un área de 0,15 km² (15,61 ha) con una longitud de 752 m y un ancho medio de 126 m.

Este es uno de los glaciares rocosos mejor conservado en el área de estudio ya que su forma de lengua se encuentra muy bien desarrollada y su delimitación es distinguible fácilmente. Posee un talud frontal que denota gran actividad en base a su buena conservación, el cual además se ve afectado a causa del cambio de pendiente del valle que lo contiene, siendo posible caracterizarlo como uno de avance extendido. Los taludes laterales en su mayoría son reconocibles y se presentan bien definidos. En su superficie se observan surcos transversales convexos hacia aguas abajo, lo que da cuenta de la actividad que registra la crioforma. Es importante mencionar que, aunque su estado de conservación es bueno, es el único glaciar rocoso que presenta thermokarst, el cual se distingue en la zona de alimentación. Por último, cabe destacar que, adyacente al flujo principal se encuentran pequeños lóbulos o morrenas que indican la existencia de permafrost cercano.

Fig. 25. Glaciar rocoso de valle (GR-9)

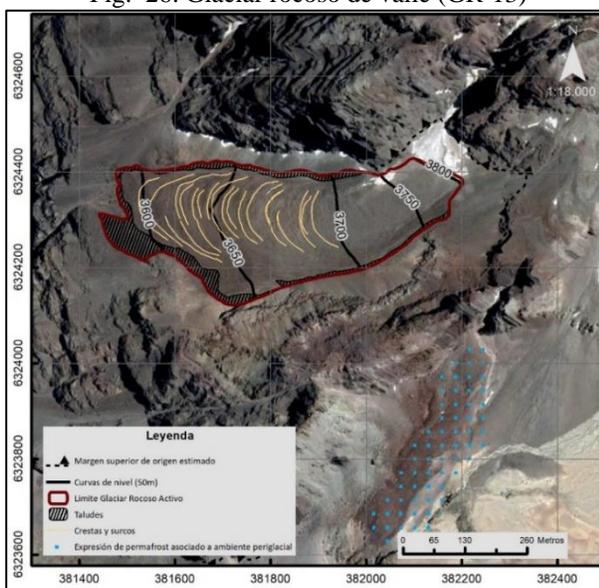


En séptimo lugar se encuentra el glaciar rocoso GR-13 ubicado en un pequeño valle, con laderas en su mayoría de roca expuesta, las que por su altura y alta pendiente generan una estrechez de horizonte que reduce la exposición diaria, protegiendo con ello al glaciar rocoso de la insolación.

Su altitud máxima se encuentra a los 3.800 m.s.n.m. y su altitud mínima a los 3.572 m.s.n.m. Posee un área de 0,14 km² (14,2 ha) con una longitud de 600 m y un ancho medio de 183 m.

Este glaciar rocoso tiene una forma de lengua con un flujo muy marcado y ordenado que se evidencia a partir de la textura superficial dominada por surcos y crestas transversales en toda su longitud, donde además la coloración oscura de los detritos genera una superficie visualmente única y bien

Fig. 26. Glaciar rocoso de valle (GR-13)



delimitada dentro del contexto general de los glaciares presentes en la cuenca del Yerba Loca. Este contraste de coloración de la superficie con los taludes laterales y talud frontal del glaciar es altamente distinguible, gracias a su buena conservación morfológica. Cabe destacar, que en el caso del talud frontal, la mayor parte de este se encuentra extendido en la ladera que da termino a este pequeño valle glacial colgado y solo una parte de él se encuentra distinguible por estar sobre roca a nivel del valle.

Estos aspectos morfológicos bien definidos permiten establecer que se trata de un glaciar activo en prácticamente toda su extensión y, consiguientemente, que posee una buena proporción de hielo interior (40 a 60 %).

Por último, en esta clasificación de glaciares rocosos de valle se reconocen los glaciares GR-15 y GR-16, los cuales son dos de las geoformas más extensas presentes en la cuenca. Por su parte, el GR-15 tiene su altitud máxima a los 4.180 m.s.n.m. y su altitud mínima a los 3.669 m.s.n.m., posee un área de 0,24 km² (24 ha) con una longitud de 1205 m y un ancho medio de 165 m; mientras que el GR-16 tiene su altitud máxima a los 4.145 m.s.n.m. y su altitud mínima a los 3.731 m.s.n.m. Posee un área de 0,3 km² (30,72 ha) con una longitud de 1626 m y un ancho medio de 157 m.

Ambas crioformas se originan dentro de un sistema de glaciares rocosos y cubiertos con circos amplios donde la zona de alimentación es muy extensa. En específico, el GR-15 es un glaciar rocoso que evoluciona a partir de un glaciar cubierto (GC-4), separándose en el camino a causa de un promontorio rocoso. Superficialmente ambos poseen marcados signos de avance como las crestas y surcos transversales evidenciando una textura corrugada con ondulaciones.

Ambos fluyen en dirección E-O ladera abajo del valle, donde el GR-15 enfrenta cambios drásticos de pendiente lo cual se refleja en su flujo escalonado donde la parte frontal se forma tras una bajada abrupta del flujo. Muestra signos claros de avance por su talud bien formado, con alta pendiente y por una superficie ondulada, destacándose en la parte frontal un pulso de avance sobre el lóbulo principal.

Fig. 27. Glaciar rocoso de valle (GR-16)

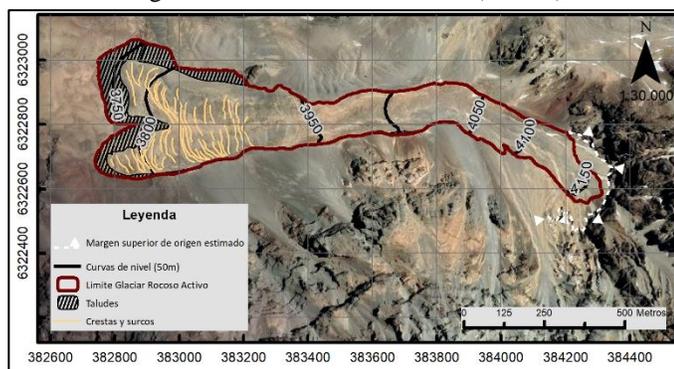
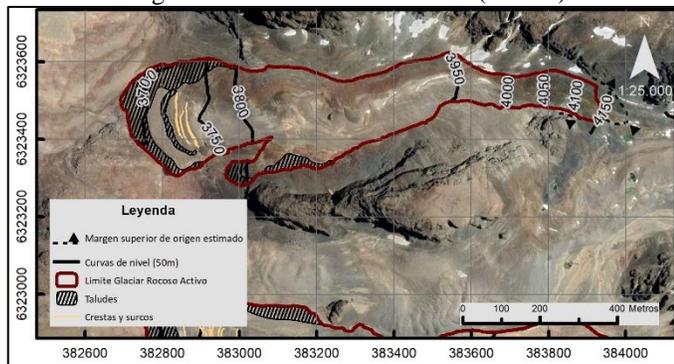


Fig. 28. Glaciar rocoso de valle (GR-15)

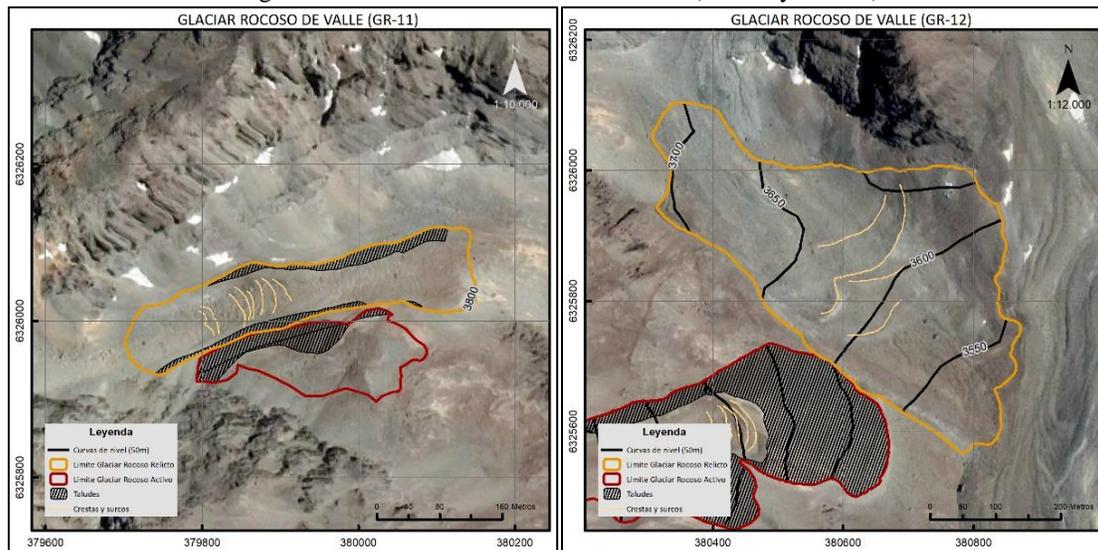


El glaciar rocoso GR-16, por su parte, fluye en un terreno con pendiente moderada. Su macro morfología es caracterizada como un sistema de glaciar rocoso, ya que posee dos lóbulos de avance. En cuanto a sus taludes, los taludes frontales se presentan en buena condición y pueden ser identificados rápidamente por su alta pendiente y coloración más clara que los detritos superficiales; mientras que los taludes laterales, en su mayoría se pierden en el contacto con la pared rocosa o con el flujo del glaciar cubierto adyacente.

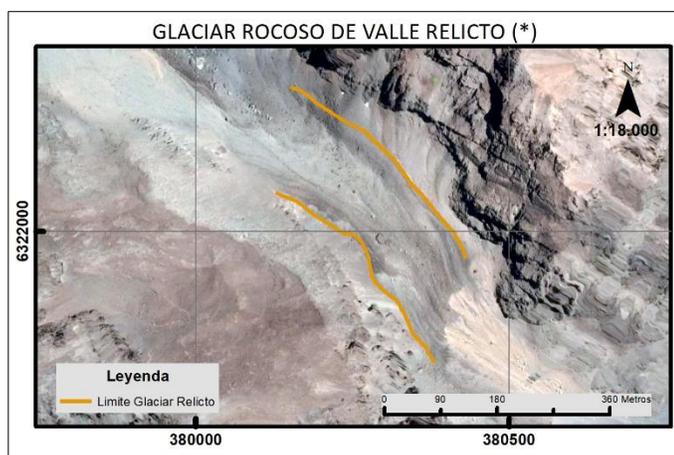
Glaciares rocosos de valle relictos

Los glaciares rocosos GR-11 y GR-12 (contiguos a los glaciares GR-9 y GR-10) poseen un desgaste generalizado en sus formas laterales y en el cuerpo central del glaciar, donde si bien se reconocen surcos propios del movimiento del cuerpo, estos significarían un movimiento en el pasado, ya que las lenguas están aplanadas y los taludes frontales son casi inexistentes tomando forma más parecida a morrenas (Fig. 28).

Fig. 29. Glaciares rocosos de valle fósiles (GR-11 y GR-12)



Además, es necesario mencionar que en la parte baja de la cuenca donde se encuentra el GR-6, se pueden reconocer evidencias de flujos y cordones longitudinales que pueden ser asociados a un glaciar rocosos relictos (*).



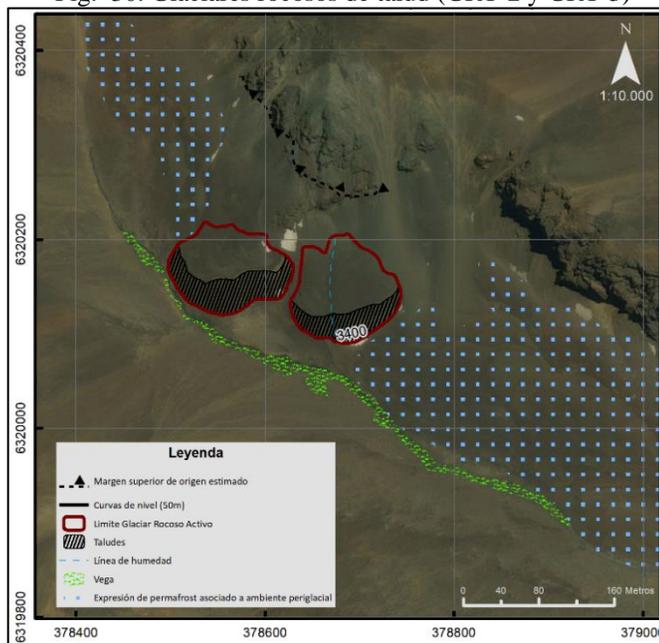
Glaciares rocosos de talud

La segunda categorización reúne a los glaciares rocosos de talud (GRT) activos, donde se reconocen 4 de un total de 23 glaciares rocosos presentes en la cuenca.

Los primeros dos glaciares de talud corresponden a los GRT-2 y GRT-3, ambos se ubican en la parte media-baja de la cuenca, a metros del GR-1 antes descrito.

El GRT-2 tiene su altitud máxima a los 3.451 m.s.n.m. y su altitud mínima a los 3.417 m.s.n.m., posee un área de 0,009 km² (0,9 ha) con una longitud de 57 m y un ancho medio de 81 m. Por su parte, el GRT-3 se ubica a una altitud máxima de 3.430 m.s.n.m. y una altitud mínima a los 3.395 m.s.n.m., también posee un área de 0,009 km² (0,95 ha) con una longitud de 90 m y un ancho medio de 77 m.

Fig. 30. Glaciares rocosos de talud (GRT-2 y GRT-3)



A diferencia de los glaciares rocosos lobulados y dispuestos de forma paralela al desarrollo longitudinal del fondo del valle glaciar, los glaciares rocosos de talud presentan una posición lateral y flujo en dirección perpendicular al eje del valle, teniendo una extensión limitada cercana a las laderas rocosas, por lo que en su superficie no se alcanzan a formar surcos o cordones marcados, y si se reconocen bloques depositados o líneas de humedad.

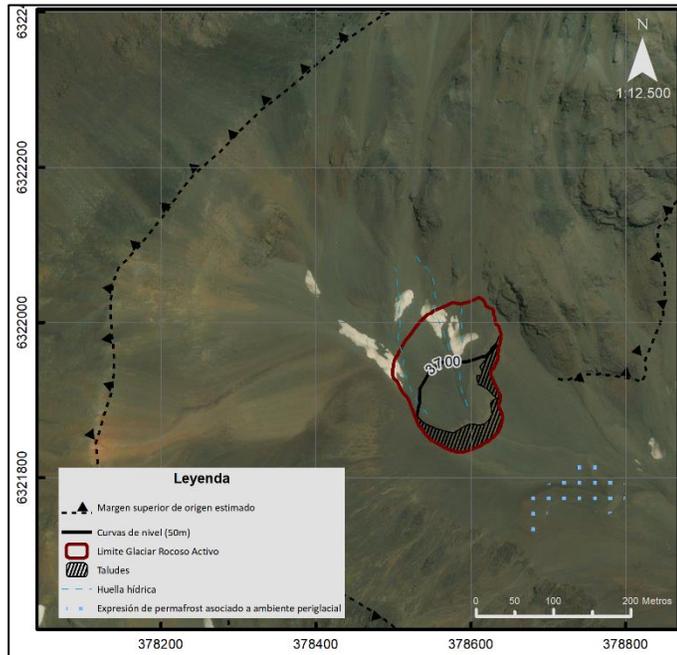
Los taludes frontales de ambos GRT son fácilmente distinguibles con una fuerte pendiente. Visualmente se identifica solo una mínima parte con sedimentos de coloración clara, lo que indica un bajo nivel de actividad cinética. Particularmente, en el caso del GRT-3 (posicionado a la derecha) se observa una línea de humedad que correspondería al afloramiento de aguas de la capa activa. Ello se confirma por la presencia de un humedal lineal del tipo vega andina y un curso de agua, lo que nos indica presencia hídrica constante.

El tercer glaciar rocoso de talud corresponde al GRT-4 (Fig. 30), el que se encuentra en la cabecera de la subcuenca donde se encuentra el GR-5 descrito anteriormente. Tiene su altitud máxima a los 3.723 m.s.n.m. y su altitud mínima a los 3.659 m.s.n.m., posee un área de 0,02 km² (2,04 ha) con una longitud de 169 m y un ancho medio de 98 m.

Su perfil transversal y longitudinal son de similares dimensiones y, se mantiene firme y estable a pesar de la fuerte pendiente de la cuenca. En el manto superficial se pueden reconocer huellas dejadas por pequeños cursos hídricos activados estacionalmente.

Su frente se caracteriza por un talud claramente discernible, con sedimentos notoriamente más claros que la parte superior, lo cual indica desplazamiento por empuje interno derivado de procesos de incremento de volumen por recongelamiento de agua de fusión y/o congelamiento del agua percolada derivada de fusión nival. Cabe destacar que a 150 m aprox. de esta crioforma, encontramos una posible morrena o talud frontal que puede corresponder a este mismo glaciar o a otro anterior, categorizado como expresión asociada a permafrost.

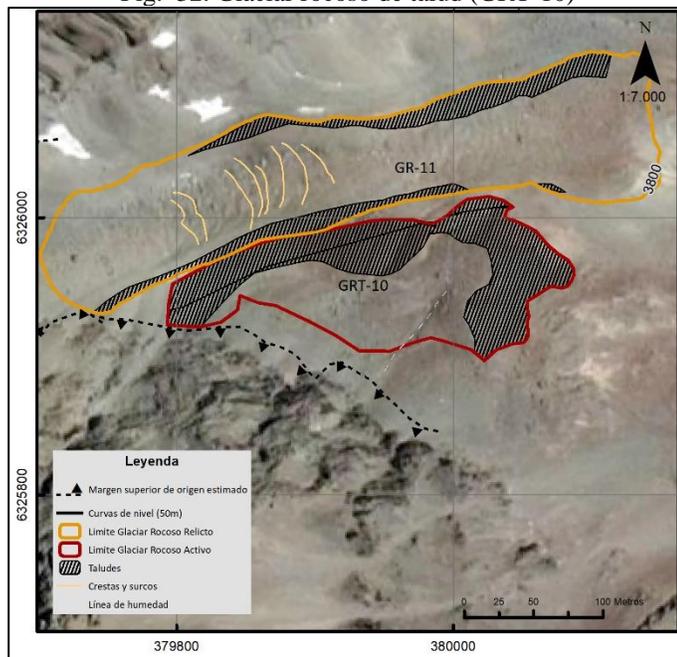
Fig. 31. Glaciar rocoso de talud (GRT-4)



El cuarto y último corresponde al GRT-10, el cual tiene su altitud máxima a los 3.723 m.s.n.m., y su altitud mínima a los 3.659 m.s.n.m., posee un área de 0,02 km² (2,04 ha) con una longitud de 169 m y un ancho medio de 98 m.

Este glaciar se encuentra adyacente y en dirección perpendicular a la dirección del valle y del glaciar rocoso relicto GR-11. Sus taludes laterales y frontales están bien definidos y demarcados. Al igual que el GRT-3 y GRT-4, también presenta línea de humedad en su superficie, indicando actividad de congelamiento y descongelamiento.

Fig. 32. Glaciar rocoso de talud (GRT-10)



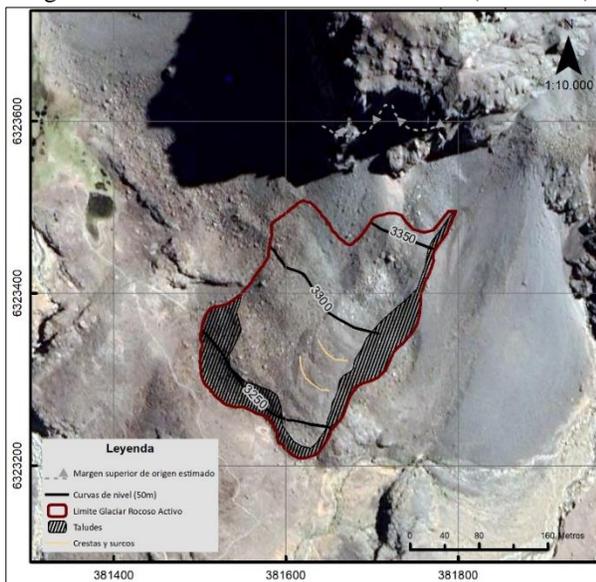
Glaciares rocosos lobulados de talud

En esta categoría se describen los glaciares rocosos lobulados de talud (GRLT) activos, donde se reconocen 4 de un total de 23 glaciares rocosos presentes en la cuenca.

El primer glaciar rocoso por describir corresponde al GRLT-14, el cual tiene su altitud máxima a los 3.410 m.s.n.m. y su altitud mínima a los 3.233 m.s.n.m., posee un área de 0,05 km² (5,06 ha) con una longitud de 254 m y un ancho medio de 152 m.

Este GRLT se caracteriza por ser el más cercano al fondo del valle. Se origina asociado a una ladera y posee dos flujos de avance contiguos que se originan desde la misma fuente de alimentación de detritos. Esto se evidencia ya que los taludes frontales y laterales de cada avance es diferente: el del flujo poniente (izquierdo en la cartografía) posee una pendiente más pronunciada y un talud más prominente, mientras que el flujo oriente (derecho en la cartografía) presenta un flujo con surcos débiles, y un talud frontal y lateral menos definido.

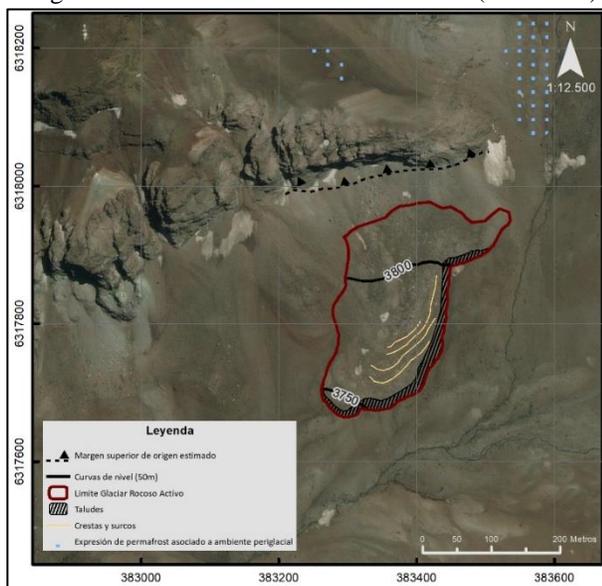
Fig. 33. Glaciar rocoso lobulado de talud (GRLT-14)



Luego, están los glaciares rocosos lobulados de talud GRLT-17, GRLT-18 y GRLT-19, los que se presentan asociados directamente a una misma ladera. En ellos se evidencia una coloración similar de sus detritos, desarrollándose desde la base de los escarpes rocosos hacia la parte inferior de las laderas del valle, sin ocupar parte de su fondo.

En cuanto a sus dimensiones, el GRLT-17 tiene su altitud máxima a los 3.859 m.s.n.m. y su altitud mínima a los 3.749 m.s.n.m., posee un área de 0,06 km² (6,42 ha) siendo el más pequeño de los 3 con una longitud de 303 m y un ancho medio de 130 m. El GRLT-18, tiene su altitud máxima a los 3.714 m.s.n.m. y su altitud mínima a los 3.440 m.s.n.m., posee un área de 0,19

Fig. 34. Glaciar rocoso lobulado de talud (GRLT-17)

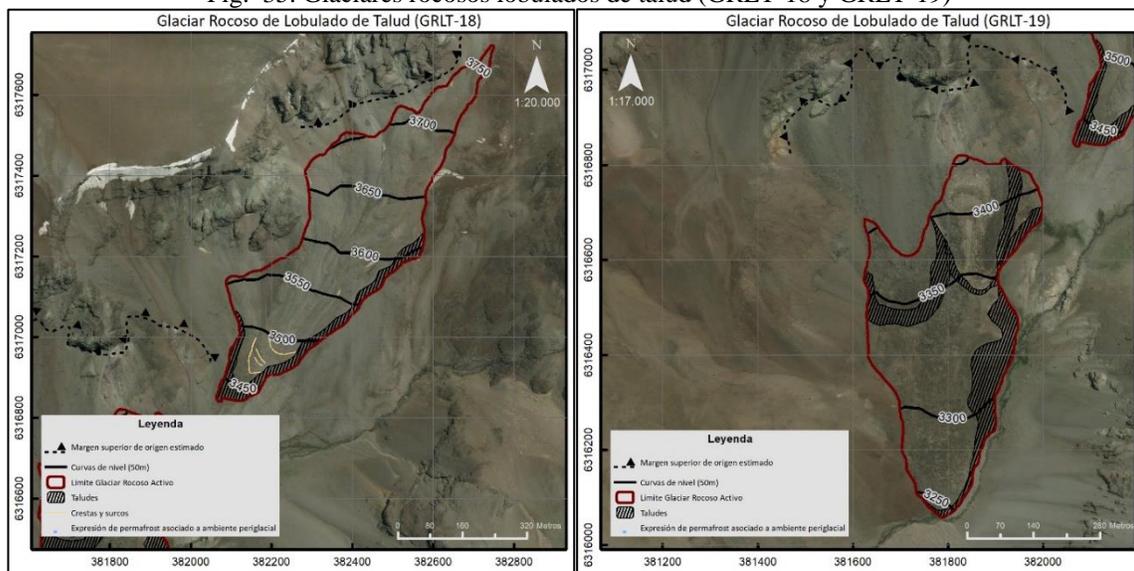


km² (19,84 ha) con una longitud de 883 m y un ancho medio de 137 m. Por último, el GRLT-19 tiene su altitud máxima a los 3.448 m.s.n.m. y su altitud mínima a los 3.237 m.s.n.m., posee un área de 0,16 km² (16,51 ha) con una longitud de 659 m y un ancho medio de 195 m.

Estos tres GRLT poseen una forma de lengua con superficies dominadas por crestas y surcos, y cordones longitudinales que indican tanto el movimiento del cuerpo por empuje interno como los efectos del calentamiento en la capa activa y el manto morrénico. Sus taludes frontales son de medio desarrollo, pero reconocibles fácilmente junto con los taludes laterales. Estos tres glaciares se encuentran rodeados de formas que indican la presencia de permafrost, lo cual se evidencia en que el terreno adyacente o cercano tiene una textura ondulada y con distintos cambios de tonalidad en los detritos que forman parte de ella.

Cabe destacar que en el GR-19 es posible distinguir dos cosas particulares; un pequeño pulso de avance más reciente y corto (parecido a un glaciar rocoso de talud) que se ubica sobre la lengua principal al lado izquierdo y una forma cóncava en la parte superior derecha, donde el color de los detritos es más claro y donde el grosor de su talud lateral indica el grosor que tuvo en el pasado este pulso de avance. Su parte superior se encuentra parcialmente cubierta por un cono coluvial activo que, como en otros casos, oculta la real extensión de su cabecera o nacimiento.

Fig. 35. Glaciares rocosos lobulados de talud (GRLT-18 y GRLT-19)

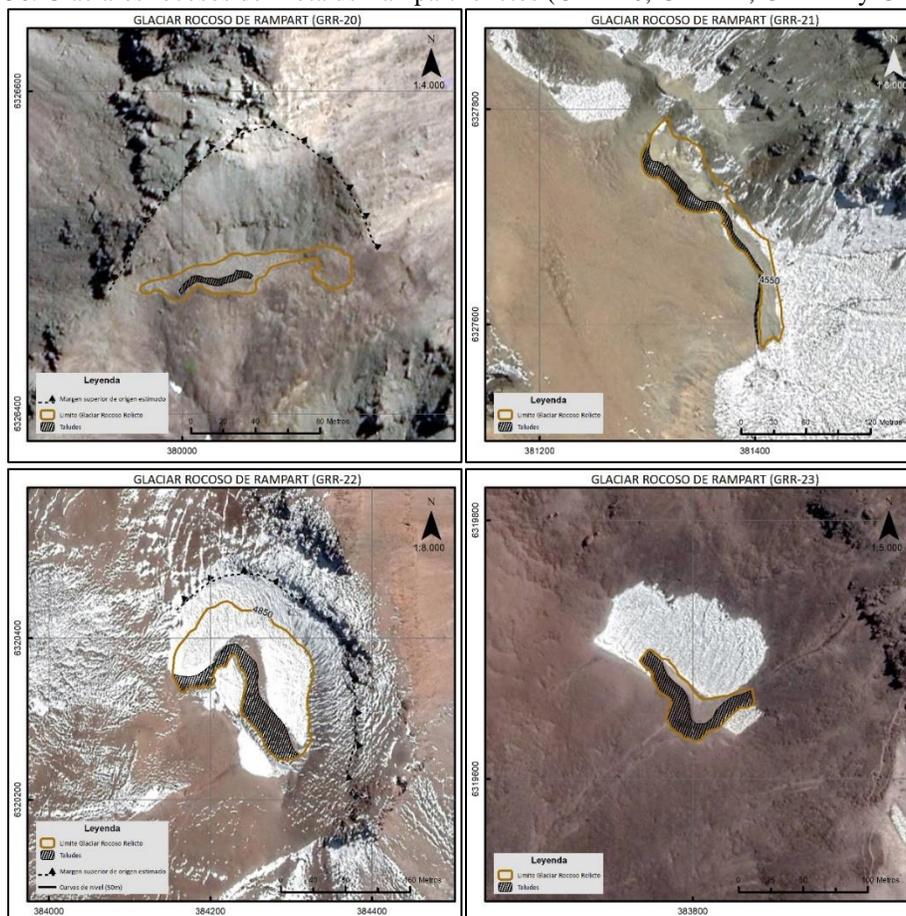


Glaciares rocosos de terraplén o rampart protalus (GRR)

En esta categoría se describen 4 glaciares rocosos rampart protalus (GRR) relictos, de un total de 23 glaciares rocosos presentes en la cuenca del Santuario Yerba Loca.

Los 4 glaciares relictos que se caracterizan a continuación son los GRR-20, GRR-21, GRR-22 y el GRR-23. El primero tiene su altitud máxima a los 3.714 m.s.n.m. y su altitud mínima a los 3.440 m.s.n.m., posee un área de 0,19 km² (19,84 ha) con una longitud de 883 m y un ancho medio de 137 m; mientras que el segundo, el GRR-21 tiene su altitud máxima a los 3.714 m.s.n.m. y su altitud mínima a los 3.440 m.s.n.m., posee un área de 0,19 km² (19,84 ha) con una longitud de 883 m y un ancho medio de 137 m. El GRR-22 se encuentra entre los 4.858 y los 4.810 m.s.n.m, ocupa una superficie de 0,019 km² (1,85 ha) y sus dimensiones son 157 m de longitud y 48 m de ancho medio. Por último, el GRR-23 tiene una altitud máxima de 4.602 m.s.n.m. y una altitud mínima de 4.576 m.s.n.m., posee una superficie de 0,002 km² (0,23 ha), una longitud de 80 m y un ancho medio de 13 m.

Fig. 36. Glaciares rocosos de Protalus Rampart relictos (GRR-20, GRR-21, GRR-22 y GRR-23)

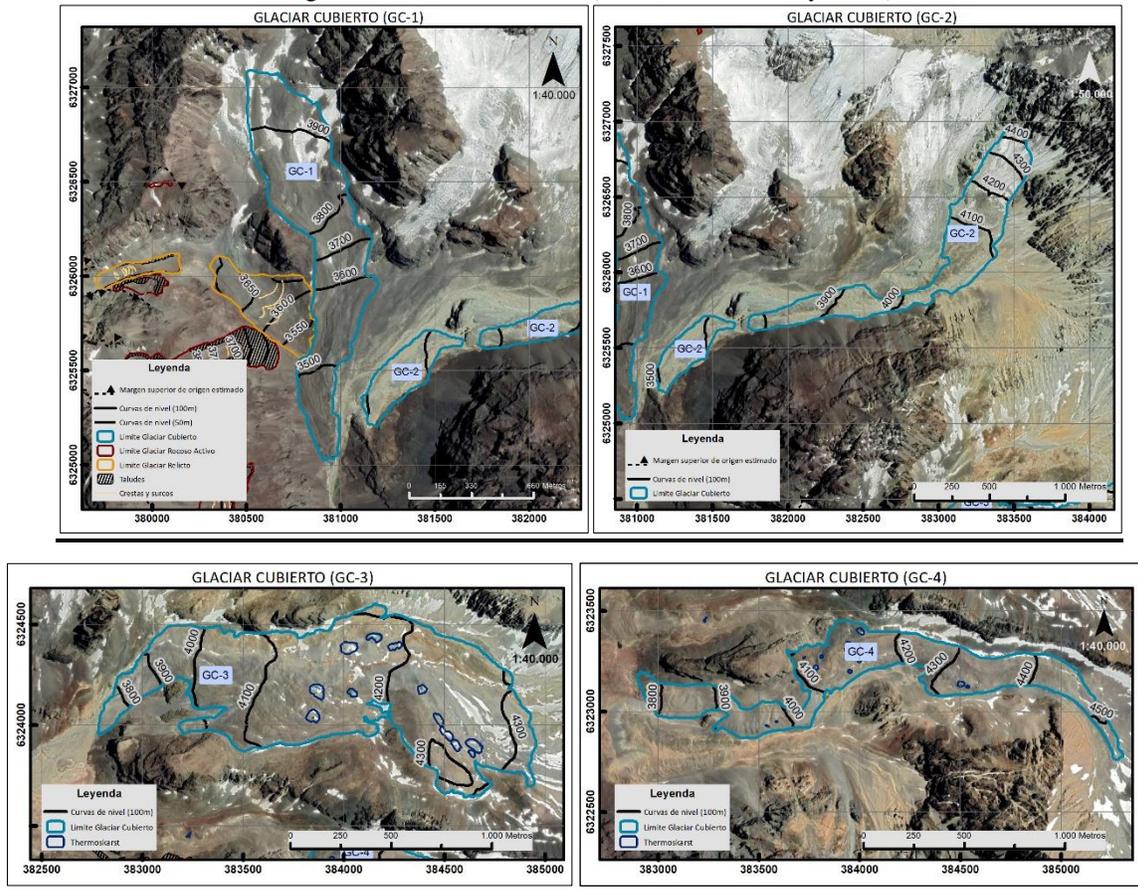


Glaciares cubiertos

En esta categoría se describen 4 glaciares rocosos cubiertos (GC) presentes en la cuenca del Santuario Yerba Loca.

El GC-1 se ubica entre los 3.994 m.s.n.m. y los 3.398 m.s.n.m., posee un área de 0,59 km² (58,8 ha), una longitud de 2.109 m y un ancho medio de 280 m. Por su parte, el GC-2 se ubica entre los 4.155 m.s.n.m. y los 3.741 m.s.n.m., también posee un área de 0,59 km² (59 ha), una longitud de 2.436 m y un ancho medio de 184 m. El GC-3 se ubica entre los 4.375 m.s.n.m. y los 3.720 m.s.n.m., posee un área de 1,07 km² (107,2 ha), una longitud de 2.173 m y un ancho medio de 480 m. Por su parte, el GC-4 se ubica entre los 4.575 m.s.n.m. y los 3.732 m.s.n.m., también posee un área de 0,44 km² (44 ha), una longitud de 2.633 m y un ancho medio de 181 m.

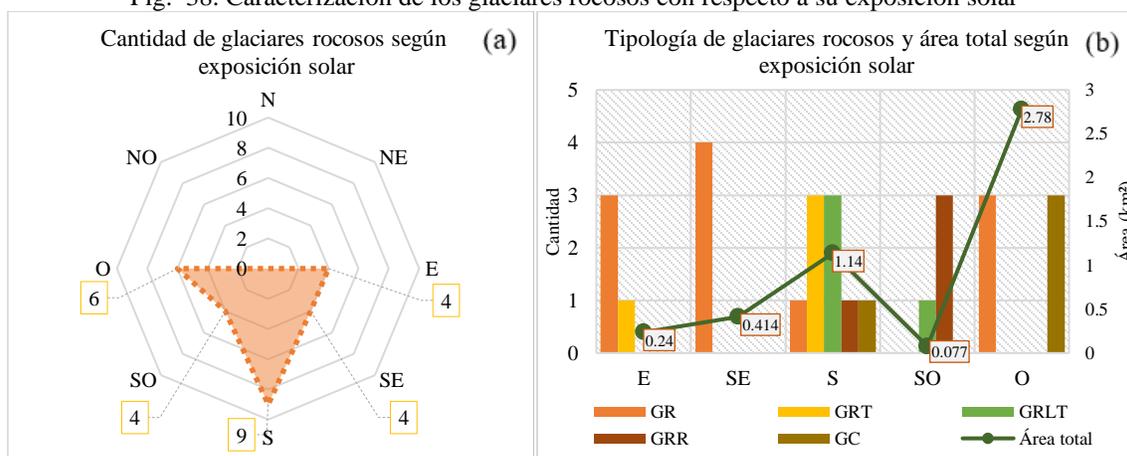
Fig. 37. Glaciares cubiertos (GC-1, GC-2, GC-3 y GC-4)



Exposición

Como resultado del análisis de la disposición de los glaciares rocosos y cubiertos respecto a su exposición al sol en base a su contexto topográfico dentro la cuenca del Yerba Loca, se pudo reconocer una predominancia de 5 exposiciones: E, SE, S, SO y O (Ver Fig. 37). En este sentido, 8 glaciares rocosos y 1 glaciar cubierto se ubican en una exposición sur; mientras que 4 glaciares rocosos avanzan marcadamente hacia el SE, otros 4 hacia el este y otros 4 hacia el suroeste. Por último, en una exposición orientada hacia el oeste, se encuentran 3 glaciares cubiertos y 3 glaciares rocosos.

Fig. 38. Caracterización de los glaciares rocosos con respecto a su exposición solar



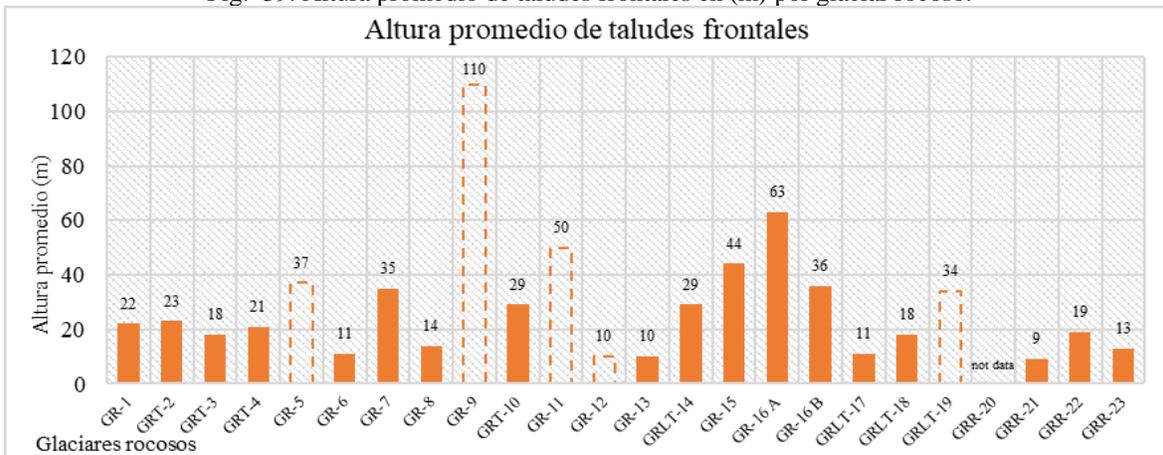
(a) Distribución de los glaciares rocosos según la cantidad total según la exposición; (b) Distribución de los glaciares rocosos según tipología (GR: Glaciar rocoso de valle; GRT: Glaciar rocoso de talud; GRLT: Glaciar rocoso lobulado de talud; GRR: Glaciar rocoso de rampart, y GC: Glaciar cubierto) y área total según exposición. Cabe destacar en este gráfico que, el área acumulada en porcentaje según exposición corresponde a 5,2% (0,24 km²) en el este, 8,9% (0,414 km²) en el sureste, 24,5% (1,14 km²) en el sur, 1,7% (0,077 km²) al suroeste y, por último, un 60% (2,78 km²) para la exposición oeste.

A partir de la predominancia de las exposiciones hacia el cuadrante SE-SO, se puede interpretar la clara relación genético-evolutiva que representa esta orientación para el desarrollo de glaciares rocosos, lo que se puede relacionar con tres aspectos tales como la influencia de las condiciones de umbría, las menos horas de insolación y la tangencialidad de la radiación solar. En este mismo sentido, lo escarpado de las laderas propias de esta área montañosa de disposición E-O y su efecto de sombra solar y térmica, viene a explicar también la presencia de un alto porcentaje de área de glaciares rocosos desarrollados en sentido Oeste (60%) y algo menor en sentido Sur (24,5%). Evidenciando la falta de estas condiciones favorecedoras para la presencia y evolución de glaciares rocosos y cubiertos en el cuadrante NO-N-NE.

Alturas de taludes frontales

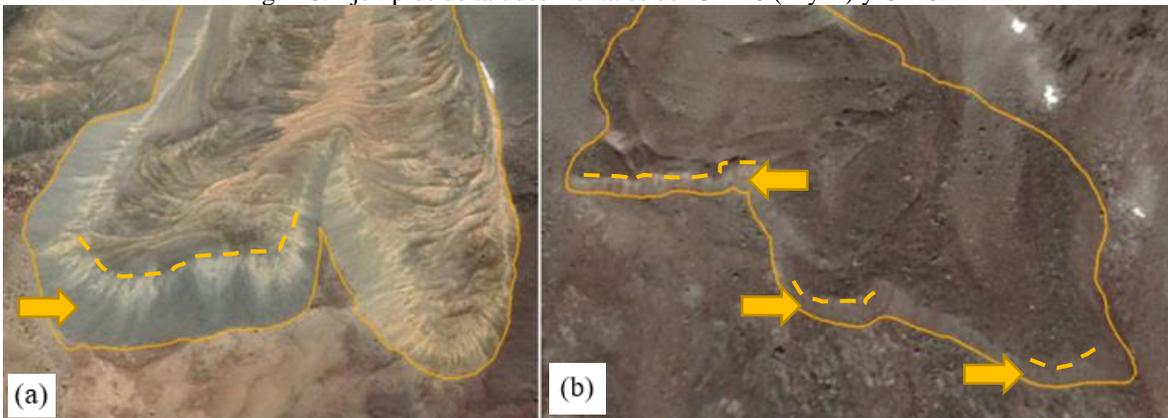
La altura de los taludes frontales varía entre 10 y 63 metros aproximadamente. De 23 taludes sometidos a cuantificación, sólo 17 de ellos han sido medidos con exactitud, mientras que los 5 restantes poseen taludes extendidos en una pendiente pronunciada (GR-5, GR-9, GR-11, GR-12 y GRLT-19), por lo que su reconocimiento y delimitación son complejas; o como en el caso del GRR-20, este no es posible medirlo por su reducido tamaño.

Fig. 39. Altura promedio de taludes frontales en (m) por glaciar rocoso.



Las medidas de los taludes extendidos están representadas con línea segmentada, y en el caso del GRR-20, se indica la ausencia de datos debido a la imposibilidad de realizar la medición de su talud frontal.

Fig. 40. Ejemplos de taludes frontales del GR-16 (A y B) y GR-8

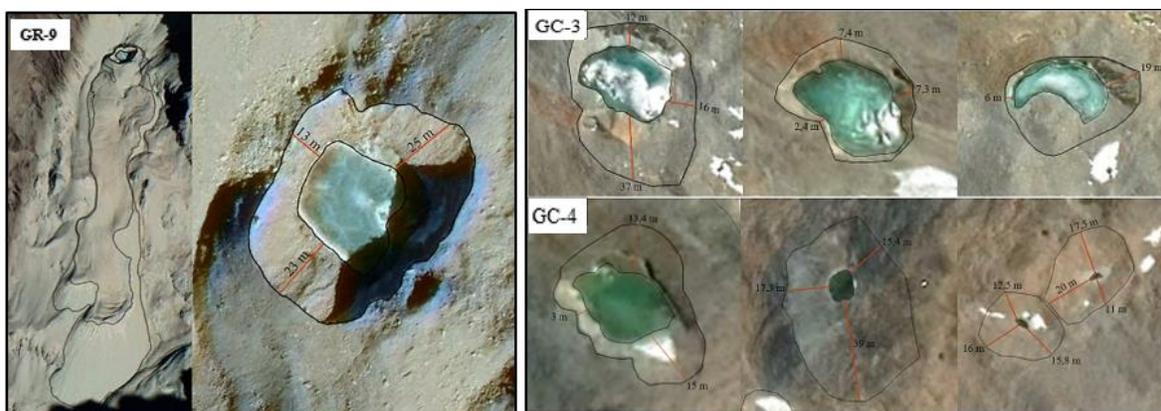


Los glaciares rocosos de valle presentados en la imagen corresponden a un sistema de glaciares rocosos (a) y a una unidad de glaciar rocoso (b). Bajo estas características, a la izquierda se identifican dos lóbulos que se desprenden de un mismo flujo; mientras que, a la derecha, se observa cómo, a causa de la disposición y pendiente del valle, el GR-8 posee un talud frontal bastante extenso en su longitud, que marca el flujo a través de una alta pendiente.

Thermokarst

Dentro de la totalidad de los glaciares rocosos y cubiertos presentes en el área de estudio, solo en 4 de ellos se reconocieron procesos de thermokarst y sus morfologías derivadas. En el glaciar rocoso GR-9 se reconoce una sola depresión de colapso de este tipo, la cual se identificó en la zona de acumulación, hacia la ladera sur, donde pareciera desarrollarse un segundo lóbulo de avance. Posee una profundidad media de 20 m y presenta una laguna con signos de congelación que es fácilmente distinguible por su color azulado a verdoso (Fig. 40). Esta escasa presencia de thermokarst en los glaciares rocosos puede considerarse un indicador de “buena salud” de estas crioformas.

Fig. 41. Thermokarst presente en el GR-9, en los GC-3 y GC-4

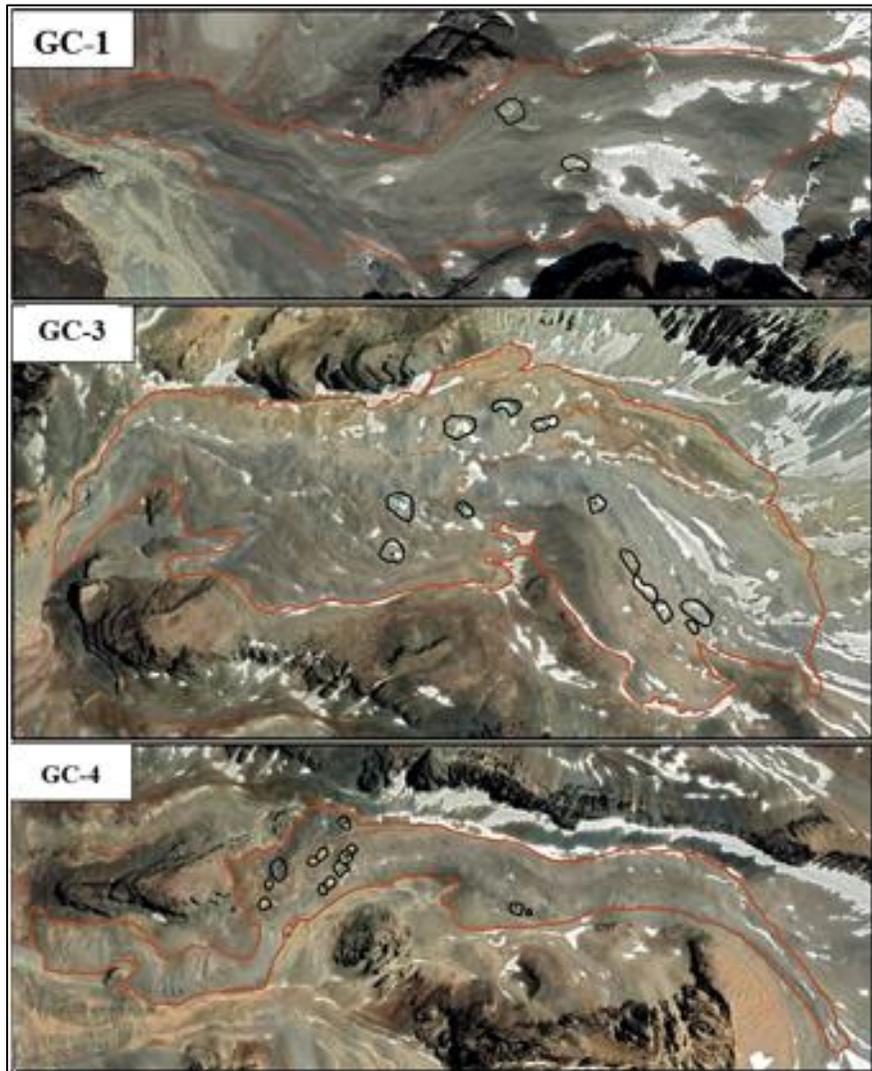


En los otros tres cuerpos identificados y mapeados – correspondientes a glaciares cubiertos - se encontraron cerca de 27 colapsos (ver Figura 41). En el GC-1 se contabilizan 2 colapsos del manto detrítico los cuales se concentran en la zona media del glaciar, caracterizada por un abrupto cambio de pendiente. El desarrollo de los colapsos es limitado, por lo que pueden ser asociados a la mecánica del movimiento en pendiente y a la adaptabilidad del manto en esta zona. Por otro lado, GC-3 y GC-4 (Fig. 40) poseen las mayores cantidades de thermokarst (12 y 13 depresiones de colapso respectivamente), los cuales son más extensos y profundos en comparación a los colapsos de GR-9 y GC-1.

Para ejemplificar, en la Fig. 41 se muestran 3 formas de colapsos ocurridas en GC-3 y otras 3 en GC-4. Se puede observar que todas poseen altos escarpes de derrumbamiento desde los 2,4 m a 39 m. Además, en el caso de GC-3, sus lagunas de congelación son amplias y están bien definidas, lo que indicaría lo reciente de estas geoformas.

En el caso de GC-4, es posible inferir una evolución de las formas de colapso, donde se observa primero un thermokarst de dimensiones amplias, luego uno con su laguna de congelación más reducida y, por último, un tercer colapso con una laguna muy diminuta. Esto indica claramente la heterogeneidad del desarrollo de los thermokarst en los cuerpos criogénicos estudiados.

Fig. 42. Thermokarst presentes en GC-1, GC-3 Y GC-4



Resultado 3: Caracterización morfométrica e hidrológica de los glaciares rocosos y cubiertos presentes en el Santuario de la Naturaleza Yerba Loca

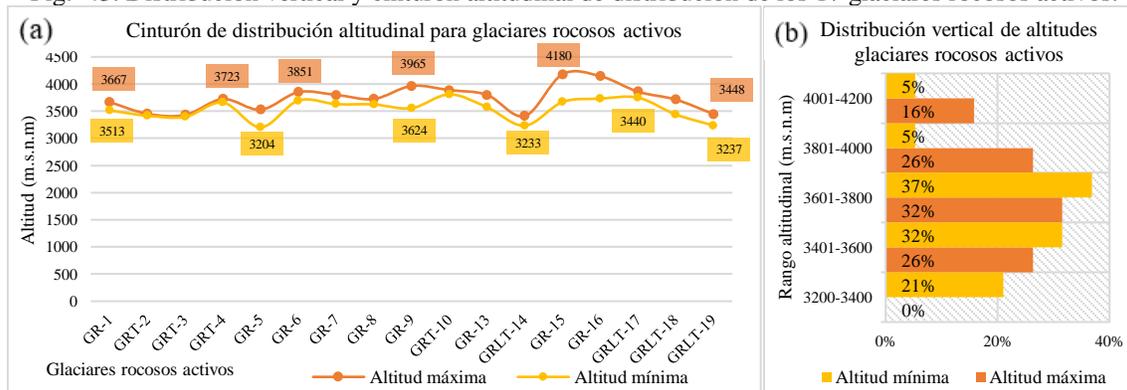
Altitud

El rango altitudinal de la cuenca del Estero Yerba Loca abarca desde los 1.300 a 5.340 m.s.n.m. y, a modo general, el conjunto de los 23 glaciares rocosos y 4 glaciares cubiertos reconocidos en la zona, se encuentran desde los 3.204 m.s.n.m. hasta los 4858 m.s.n.m.

En el caso de los glaciares rocosos activos - que representan un total de 17 cuerpos gélidos -, estos forman un cinturón de 1000 m en base a la altitud mínima y máxima del conjunto de cuerpos, encontrándose específicamente entre los 3.204 a 4.180 m.s.n.m. En base a su categorización como indicador de permafrost andino, pueden identificarse otras evidencias de mantos detríticos en las laderas con marcas características, que indicarían la actual existencia de permafrost en este cinturón descrito.

A continuación, en la Fig. 42 (b) se presenta la distribución vertical de altitudes por porcentaje de cantidad acumulada de altitud máxima y mínima según rangos altitudinales, donde se reconoce que la altitud mínima de los glaciares rocosos activos se concentra entre los 3200 y 3800 m.s.n.m. con un total del 90% de ocurrencia; mientras que la altitud máxima se concentra entre los 3.401 a 4.000 m.s.n.m. con un total del 84% de los glaciares rocosos en este rango de altitud.

Fig. 43. Distribución vertical y cinturón altitudinal de distribución de los 17 glaciares rocosos activos.

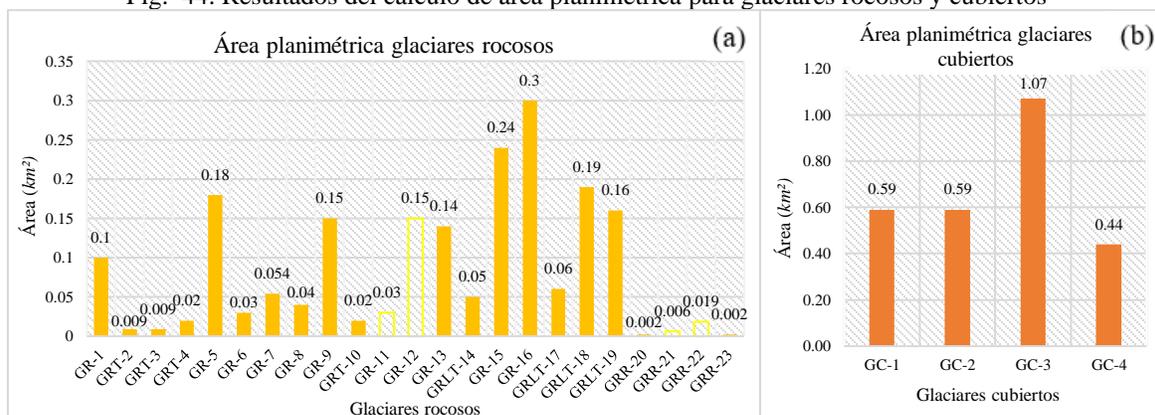


En el caso de la representación del cinturón de distribución altitudinal en la misma Fig. 42 (a), se puede reconocer que el GR-5 indica la altitud mínima para el conjunto de los glaciares rocosos en el Santuario con una altitud de 3204 m.s.n.m. En este mismo sentido, y en cuanto a la altitud máxima, GR-15 ocupa el lugar más alto dentro de la cuenca en los 4.180 m.s.n.m., por lo tanto, es en base a las altitudes de estos glaciares rocosos que se afirma la existencia del cinturón de distribución altitudinal aproximado de 1000 m.

Planimetría

El área planimétrica de la cuenca del Santuario Yerba Loca corresponde a un total de 112 km². De este total, el conjunto de los 23 glaciares rocosos y los 4 glaciares cubiertos representa un 4,15% del total de la superficie, lo que equivale a 4,65 km².

Fig. 44. Resultados del cálculo de área planimétrica para glaciares rocosos y cubiertos

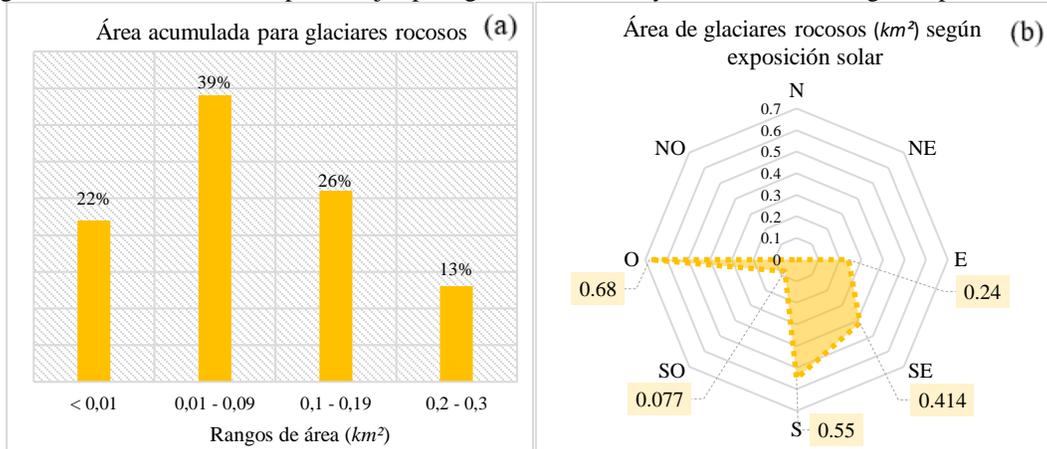


En la figura se diferencian con un borde amarillo los seis glaciares relictos (GR-11, GR-12, GRR-20, GRR-21, GRR-22 y GRR-23) de los glaciares rocosos en estado activo con barras de color amarillo.

Tal como se muestra en la Fig. 43 (a), el área de los 23 glaciares rocosos varía entre los 0,002 km² (0,2 ha) en el GRR-20 (de tipo relictos), hasta 0,3 km² (30 ha) para el glaciar rocoso de valle GR-16. En este sentido, el conjunto de glaciares rocosos medidos reúne un total de 1,96 km². Cabe destacar que, los 17 glaciares rocosos activos suman un total de 1,75 km², lo que representa un 1,6% del total de la superficie de la cuenca. En este mismo sentido, los glaciares cubiertos (Fig. 43 (b)) representan un total de 2,69 km², siendo GC-3 con 1,07 km² (107,2 ha) el que cubre mayor extensión.

A continuación, se presenta el área acumulada para los glaciares rocosos según rangos definidos por la misma autora en base a la medida estándar para ser incluido dentro de los inventarios a nivel mundial y en Chile (IPA Action Group Rock Glacier, 2020). En este sentido, un 78% del total de los 23 glaciares rocosos tienen superficie mayor a 0,01 km², mientras que el 22%, equivalente a 5 cuerpos restantes varía entre 0,009 a 0,002 km², de los cuales 3 se encuentran en la categoría de glaciar relictos.

Fig. 45. Área acumulada en porcentajes para glaciares rocosos y área acumulada según exposición solar.



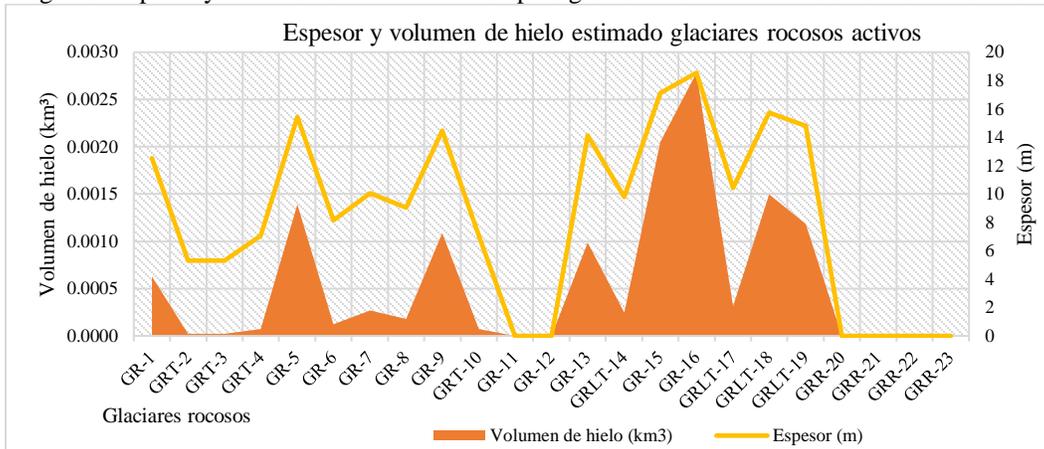
Por último, en la Fig. 44 (b) se muestra la distribución de las áreas de los glaciares rocosos antes mencionados según la exposición solar de los flujos de cada cuerpo. De esta forma, se puede afirmar que la mayor extensión de área se encuentra hacia la zona E-SE-S, con un total de 1,204 km², lo que representa un 61,4% del total de superficie ocupada por este grupo; mientras que hacia la exposición Oeste se destaca un total de 0,68 km², lo cual equivale a un 34,7%. En síntesis, casi la totalidad de área glaciar de la cuenca del Yerba Loca (96,1%) se encuentra orientada hacia el E, SE, S y O.

Espesor, volumen de hielo estimado y agua equivalente

El cálculo del volumen de hielo estimado para los glaciares rocosos activos se llevó a cabo con la fórmula de Chen & Omura (1990) para estimar en primer lugar el espesor, y luego el volumen de hielo de cada glaciar rocoso activo, considerando una proporción del 50% de hielo vs sedimento en base a Barsch (1996).

En base a los datos obtenidos, se puede concluir en primera instancia que el promedio del espesor corresponde a 11,47 m en los 17 glaciares rocosos medidos, de los cuales 7 geoformas están bajo el promedio, entre un rango de 5,3 m a 9,78 m de espesor; mientras que los 10 cuerpos restantes varían entre 10,44 m a 18,54 m de espesor. Es decir, el 41% de los glaciares rocosos activos tienen un espesor estimado bajo los 11,47 m de promedio; mientras que el 59% restante está sobre el promedio alcanzando su máximo espesor en el GR-16 con 18,54 m.

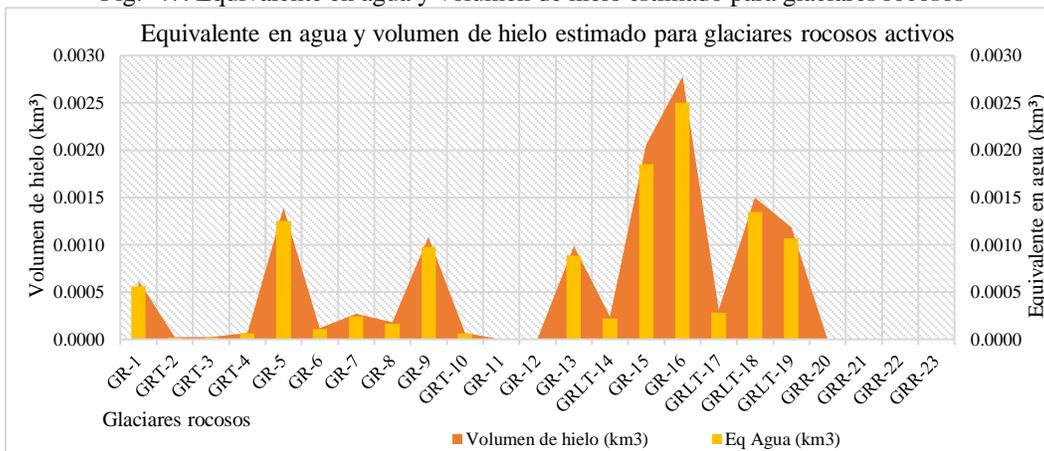
Fig. 46. Espesor y volumen de hielo estimado para glaciares rocosos en el Santuario Yerba Loca



Es importante tener en cuenta que los glaciares rocosos GR-11, GR-12, GRR-21, GRR-22, GRR-23 son categorizados dentro del grupo de los relicto o fósiles, por lo que en teoría no tendrían hielo en su interior y no estarían afectados a dicha fórmula.

En segundo lugar, el cálculo de volumen de hielo nos indica una proporción directa con respecto a los resultados de espesor explicados anteriormente. En total, los glaciares rocosos poseen un volumen estimado de hielo acumulado de 0,0129 km³, lo que equivale en agua a 0,0116 km³ considerando la densidad del hielo de 0,9 g/cm³. En este sentido, el agua líquida potencial contenida en estado sólido corresponde a 11.600.000 m³ y a 11.600.000.000 litros.

Fig. 47. Equivalente en agua y volumen de hielo estimado para glaciares rocosos



A partir de estas cifras, se puede hacer una conexión hacia lo cotidiano teniendo en cuenta la cantidad diaria promedio que es utilizada por una persona al día. Según (Marticorena, 2020) en base a estudio desarrollado por la Universidad Católica y Fundación Chile, explica que en nuestro país el promedio diario de consumo por habitante es de 172 litros (lo cual varía en comunas del cono oriente de Santiago que superan los 600 litros diarios por persona; mientras que, en comunas como Curicó y San Pedro de la Paz, se ocupa una

media de 70 litros diarios por habitante). En este sentido, el volumen de hielo en los glaciares rocosos activos equivaldría a 67.441.860 días y a 187.339 años de agua potable disponible para una persona. Así mismo, considerando la esperanza de vida en nuestro país, que corresponde a una media de 79,7 años (INE, 2020), el total de agua estimada para los glaciares rocosos, equivalen al consumo diario promedio de 2.350 personas en nuestro país durante todo el transcurso de su vida.

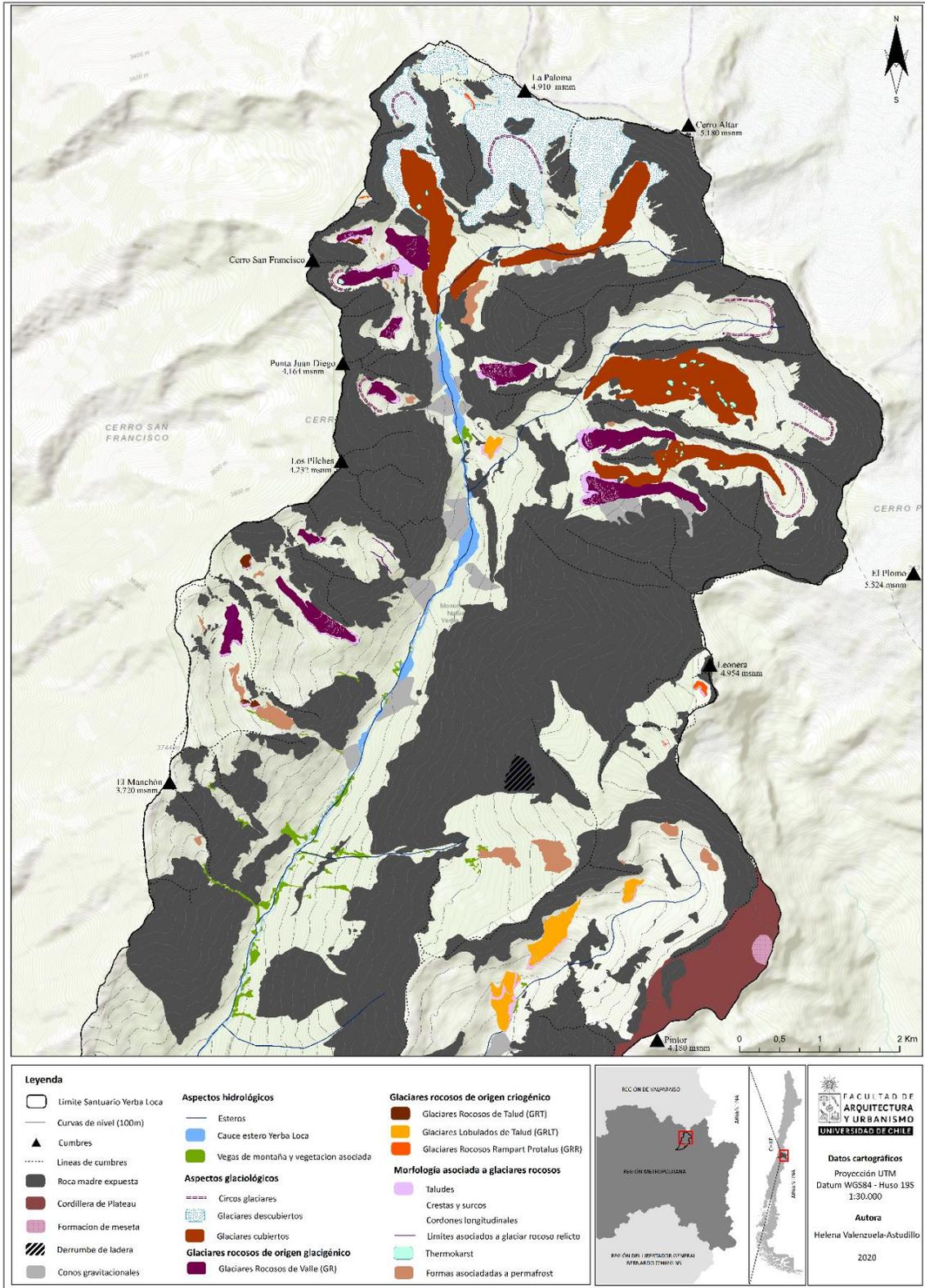
Resultado 4: Mapa Glaciomorfológico – Cuenca del Santuario Yerba Loca

Glaciogeomorfología de la cuenca del Estero Yerba Loca

En cuanto a la glacio-geomorfología identificada y mapeada en la cuenca, se puede identificar de forma rápida la presencia de un valle fluvio-glacial, con un cauce de estero estrecho y en algunos tramos, casi inexistente. Su alimentación proviene principalmente de los glaciares descubiertos, sin embargo, también es posible identificar el aporte al cauce de parte de los glaciares rocosos o de las formas asociadas a permafrost, debido a la presencia de vegas de montaña y vegetación asociada a quebradas estacionales en las laderas de las paredes montañosas de la cuenca.

También cabe mencionar que existe una predominancia en la cuenca de la presencia de laderas con roca expuesta, identificándose de forma clara los micro valles en donde se desarrollan los cuerpos glaciares. En alguno de estos, los circos glaciales poseen su forma característica, pero en otros micro valles no es posible identificar los circos, aun estando presentes formas criogénicas, lo cual puede indicar y confirmar los orígenes criogénicos de múltiples glaciares rocosos.

Fig. 48. Mapa Glaciomorfológico Cuenca del Santuario Yerba Loca



CAPITULO IV: DISCUSIONES Y CONCLUSIONES

En base a los resultados obtenidos en este trabajo, se puede discutir y concluir lo siguiente:

Los glaciares rocosos y cubiertos reconocidos en la presente memoria difieren con respecto a los inventariados por la Dirección General de Aguas al año 2015. En este último se indica la presencia de 34 glaciares rocosos y 4 glaciares de montaña; mientras que en este trabajo se reconocieron 23 glaciares rocosos y 4 glaciares cubiertos⁴. Respecto a esta diferencia, puede señalarse o interpretarse como resultado de la dificultad del mapeo de estas geoformas.

Características morfológicas, de origen y actividad dinámica

En relación a las tipologías de las geoformas reconocidas a través de la morfología, se puede concluir que en la cuenca se encuentran las cuatro clasificaciones para glaciares rocosos: 11 de ellos son de origen glaciogénico, perteneciendo al grupo de los glaciares rocosos de valle (GR); los otros 12 cuerpos son de origen criogénico, 4 catalogados como glaciares rocosos de talud (GRT), 4 como glaciares rocosos lobulados de talud (GRLT) y los últimos 4 pertenecen a los glaciares rocosos de terraplén o Rampart protalus (GRR).

Cabe destacar que la existencia de glaciares rocosos de orígenes glaciogénicos y también criogénicos, apoya la conclusión hecha por (Azócar & Brenning, 2010), donde se indica que la zona central de los andes chilenos, “tiene las condiciones para lograr que los glaciares rocosos se desarrollen desde el ambiente periglacial y también, evolucionar al último estado del continuum glacial desde un glaciar descubierto.”

En base a esta clasificación, se identifican dos estados dinámicos en los glaciares rocosos. En el caso de los glaciares activos, se reconocieron un total de 17 geoformas: 9 glaciares rocosos de valle, 4 glaciares rocosos de talud y 4 glaciares rocosos lobulados de talud; mientras que en los glaciares rocosos en estado relicto se reconocieron 2 geoformas dentro del grupo de los glaciares rocosos de valle y 4 glaciares rocosos de terraplén o rampart protalus, lo que representa la totalidad de los glaciares en esta tipología.

En otra arista, la exposición del conjunto de los glaciares rocosos y cubiertos se orienta en su totalidad hacia los cuadrantes E-S-O, donde las condiciones de umbría, las menores horas de insolación y la tangencialidad de la radiación solar, se destacan como factores importantes en el desarrollo y/o mantención de estas geoformas.

En cuanto a las alturas, límites y expresión de los taludes frontales, estas se ven directamente determinadas tanto por la actividad dinámica de los glaciares rocosos, como también por la topografía subyacente a las crioformas. En este sentido, los glaciares rocosos que alcanzan el término del valle y se encuentran con una abrupta pendiente, desarrollan

⁴ Cabe tener en cuenta la presencia de 3 glaciares descubiertos en la Cuenca del Yerba Loca (Glaciar La Paloma, Glaciar El Rincón y uno sin identificación), los cuales no son abordados en esta investigación.

taludes extendidos; mientras que los glaciares rocosos que no reúnen estas condiciones poseen en su gran mayoría, taludes frontales bien definidos y reconocibles.

Por último, en relación con las formas asociadas a morfología y dinámica, los thermokarst presentes en las geoformas estudiadas se encuentran casi en su totalidad en los glaciares cubiertos, y solamente en un glaciar rocoso de valle. Esto nos puede indicar el buen estado en que se encuentran los glaciares rocosos o también la existencia de una diferencia en la mecánica de movimiento entre los glaciares cubiertos y rocosos.

Morfometría e hidrología de los glaciares rocosos

En primer lugar, la diferencia altitudinal a partir de la posición de las geoformas, nos indica la existencia de un cinturón de 1000 m aproximadamente, el cual indica potencialmente el rango altitudinal referencial al que se puede asociar la existencia de permafrost de montaña en la cuenca, comenzando desde una altitud de 3.200 m.s.n.m.

En segundo lugar, los cálculos de área nos indican que el conjunto de los glaciares rocosos y cubiertos representan un 4,15% de la superficie total de la cuenca, donde el cuerpo de mayor extensión corresponde a un glaciar cubierto (1,07 km²), mientras que el de menor extensión a un glaciar rocoso (0,002 km²). En este mismo sentido, se identifica que la exposición solar a la que se ven orientados los glaciares rocosos en su 96,1%, corresponde al E, SE, S y O.

En tercer lugar, el espesor, el volumen y el agua equivalente estimado para los glaciares rocosos en estado activo nos muestran un gran aporte potencial de estas geoformas a la hidrología del Río Mapocho. El cálculo de volumen de hielo nos indica la presencia de 0,0129 km³, con un aporte hídrico estimado correspondiente a 0,0116 km³. Cabe mencionar que estos cálculos realizados pueden ser ampliamente discutido, sin embargo, se considera que lo presentado en esta memoria es un referente basado en metodologías ampliamente ocupadas por diferentes autores e instituciones, y que posee basta justificación en los Andes Centrales.

Para finalizar, y en base a todo lo expuesto anteriormente, es que se dan por logrados todos los objetivos específicos y, por consiguiente, el objetivo general planteados en el inicio de esta investigación.

Bibliografía

- Ahumada, A. L., & Ibañez, G. (2009). El permafrost andino, reducto de la criósfera en el borde oriental de la Puna, NO de Argentina. *XXIV Reunión Científica de la Asociación Argentina de Geofísicos y Geodestas y Primer Taller de Trabajo de Estaciones Continuas GNSS de América y del Caribe*, (págs. 254-255). Mendoza.
- Andinismo. (23 de diciembre de 2019). *Observatorio de Conflictos Mineros de America Latina*. Obtenido de <https://www.ocmal.org/anglo-american-destruye-glaciar-la-paloma-y-cerro-sendero-de-yerba-loca/>
- AngloAmerican. (s/f). *Proyecto Los Bronces Integrado*. Obtenido de <https://chile.angloamerican.com/es-es/operaciones/proyecto-los-bronces-integrado>
- Arenson, L., Hoelzle, M., & Springman, S. (2002). Borehole Deformation Measurements and Internal Structure of Some Rock Glaciers in Switzerland. *Permafrost and Periglacial Processes*, 117-135.
- Arroyo, M., Marticorena, C., Mathhef, O., & al, e. (2002). Análisis de la contribución y eficiencia del Santuario de la Naturaleza Yerba Loca, 33° S, en la protección de la flora vascular regional (regiones Metropolitana y Quinta de Chile). *Revista Chilena de Historia Natural*, 767-792.
- Azócar, G., & Brenning, A. (2010). Hydrological and Geomorphological Significance of Rock Glaciers in Dry Andes, Chile (27°-33°S). *Permafrost and Periglacial Processes*, 42-53.
- Barsch, D. (1996). *Rockglaciers: Indicators for the Present and Former Geoecology in High Mountain Environments*. Berlin: Springer Series in Physical Environment.
- Biblioteca del Congreso Nacional. (s/f). *Informacion Territorial*. Obtenido de Relieve Región Metropolitana de Santiago: <https://www.bcn.cl/siit/nuestropais/region13/relieve.htm>
- Brenning, A. (2003). La importancia de los Glaciares de Escombros en los Sistemas Geomorfológico e Hidrológico de la Cordillera de Santiago. *Revista de Geografía Norte Grande*, 7-22.
- Brenning, A., & Azócar, G. (2010). Minería y glaciares rocosos: impactos ambientales, antecedentes políticos y legales, y perspectivas futuras. *Revista de Geografía Norte Grande*, 143-158.
- Burger, K., Degenhardt, J., & Giardino. (1999). Engineering geomorphology of rock glaciers. *Geomorphology*, 93-132.
- Chen, J., & Ohmura, A. (1990). Estimation of Alpine glacier water resources and their change since the 1870s. *Hydrology in Mountainous Regions*.

- Consejo de Monumentos Nacionales de Chile. (s/f). *CMN*. Obtenido de Fundo Yerba Loca: <https://www.monumentos.gob.cl/monumentos/santuarios-de-la-naturaleza/fundo-yerba-loca>
- ESRI. (2016a). *ArcGIS for Desktop*. Obtenido de De entidad a punto: <https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/tools/data-management-toolbox/feature-to-point.htm>
- ESRI. (2016b). *ArcGIS for Desktop*. Obtenido de Orientación: <https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/tools/spatial-analyst-toolbox/aspect.htm>
- Farbrot, H., Isaksen, K., Eiken, T., & al, e. (2005). Composition and internal structures of a rock glacier on the strandflat of western Spitsbergen, Svalbard. *Norwegian Journal of Geography*, 139-148.
- Farr, T., & etal. (2007). The shuttle radar topography mission. *Reviews of Geophysics*.
- Fernandez, H., & Ferrando, F. (2018). Glaciares rocosos en la zona semiárida de Chile: relevancia de un recurso hídrico sin protección normativa. *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía*, 338-355.
- Ferrando, F. (1992). Clasificación Hidrodinámica de Chile. *Cuadernos Investigación Geográfica*, 55-74.
- Ferrando, F. (2002). Geomorphic evolution of rock glaciers: Analysis of the semi-arid Andes, Chile. *Revista Geográfica de Chile Terra Australis*, 43-74.
- Ferrando, F. (2003a). Aspectos conceptuales y genético-evolutivos de los glaciares rocosos: análisis de caso en los andes semiáridos de Chile. *Revista Geográfica de Chile Terra Australis*, 1.
- Ferrando, F. (2003b). First approach to dynamic aspects of the rock glaciers of "Quebrada Angosta", Andean western slope of the semi-arid Chilean region. *Symposium on mass balance of Andean glaciers & 1st mass balance workshop on Andean Glaciers*. Valdivia: CECS.
- Ferrando, F. (2013). Water resources in Chile: The critical relation between glaciers and mining for sustainable water management. *Investigaciones Geográficas - Universidad Nacional, Autónoma de México*, 3-24.
- Ferrando, F. (2017). Sobre la distribución de Glaciares Rocosos en Chile, análisis de la situación y reconocimiento de nuevas localizaciones. *Revista Investigaciones Geográficas*, 127-144.
- Frauenfelder, Laustela, & Kääh. (2005). Relative age dating of Alpine rockglacier surfaces. *Z. Geomorph. N. F.*, 145-166.
- Fyffe, C., Reid, Brock, & etal. (2014). A distributed energy-balance melt model of an alpine debris-covered glacier. *Journal of Glaciology*, 587-602.
- García, J. C. (s/f). *Tema 7. El mosaico de las regiones de montaña*. Obtenido de Open course ware: Biogeografía:

https://ocw.unican.es/pluginfile.php/2318/mod_resource/content/1/7%2C%20los%20ambientes%20de%20montana.pdf

- Giardino, J., & Vitek, J. (1988). The significance of rock glaciers in the glacial-periglacial landscape continuum. *Journal of Quaternary Science*, 97-103.
- Giardino, J., Regmi, N., & Vitek, J. (2011). *Rock glaciers*. UK: Springer.
- Giardino, R., & Regmi, N. (2014). Rock Glacier. En *Encyclopedia of Ice Snow and Glaciers*.
- Google Earth Engine. (2020). *NASA SRTM Digital Elevation 30m*. Obtenido de https://explorer.earthengine.google.com/#detail/USGS%2FSRTMGL1_003
- Gruber, S., & Haerberli, W. (2009). Mountain Permafrost. *Springer - Permafrost Soils*, 33-44.
- Guía Minera de Chile. (2020). *Codelco - División Andina*. Obtenido de <http://www.guiaminera.cl/codelco-division-andina/>
- Harris, & et al. (1988). Glossary of Permafrost and Related Ground-Ice Terms. *National Research Council of Canada*, No. 142.
- Huenante, J. (2018). *Procesamiento y análisis de radio eco-sondaje (RES) sobre glaciares chilenos: Relación entre volumen de hielo y área superficial*. Universidad de Chile, Santiago.
- INE. (2020). *Esperanza de Vida*. Obtenido de Instituto Nacional de Estadísticas: <https://www.ine.cl/ine-ciudadano/definiciones-estadisticas/poblacion/esperanza-de-vida>
- International Permafrost Association. (2019). *IPA Action Group: Rock glacier inventories and kinematics*. Suiza: Department of Geosciences - University of Fribourg.
- IPA Action Group Rock Glacier. (2020). *Towards standard guidelines for inventoryng rock glaciers*.
- Ives, M. &. (1997). *Mountains of the World: A Global Priority*. *Parthenon Publishing*, 495.
- Janke, J., Bellisario, A., & Ferrando, F. (2015). Classification of debris-covered glaciers and rock glaciers in the Andes of central Chile. *Geomorphology - Elsevier*, 98-121.
- Krainer, K., & Ribis, M. (2012). A rock glacier inventory of the tyrolean alps (Austria). *Austrian Journal of Earth Sciences*, 32-47.
- Lliboutry, L. (1956). *Fundamentos de Glaciología*. Santiago de Chile: Ediciones de la Universidad.
- Lo Barnechea noticias. (16 de mayo de 2017). Lo Barnechea lanza innovadora plataforma sobre flora y fauna cordillerana. Santiago de Chile.
- Marangunic, C. (1976). El glaciar de roca Pedregoso, Rio Colorado, V Región. (págs. D71 - D80). Primer Congreso Geológico Chileno.

- Marticorena, J. (2 de Febrero de 2020). CONSUMO DE AGUA PROMEDIO POR PERSONA EN CHILE SUPERA LA MEDIA DE EUROPA, aunque está muy por debajo de la de Estados Unidos. *El Mercurio - Cuerpo B*, pág. 10.
- Municipalidad de Lo Barnechea. (s/f). *Yerba Loca*. Obtenido de El Proyecto: <https://yerbaloca.cl/el-proyecto/>
- Muñoz-Schick, M., Moreira-Muñoz, A., Villagrán, C., & Luebert, F. (2000). CARACTERIZACIÓN FLORÍSTICA Y PISOS DE VEGETACION EN LOS ANDES DE SANTIAGO, CHILE CENTRAL. *Boletín del Museo de Historia Natural*, 9-50.
- Owen, L., & England, J. (1998). Observations on rock glaciers in the Himalayas and Karakoram Mountains of northern Pakistan and India. *Geomorphology*, 199-213.
- Pandey, P. (2019). Inventory of rock glaciers in Himachal Himalaya, India using high-resolution Google Earth imagery. *ELSEVIER*, 103-115.
- Paskoff, R. (1970). *Recherches géomorphologiques dans le Chili semi-aride*. Santiago de Chile: Biscaye.
- Payne, D. (1998). Climatic implications of rock glaciers in the arid Western Cordillera of the Central Andes. *Glacial Geology & Geomorphology*.
- Prensa Minagri. (18 de marzo de 2020). *INDAP - Ministerio de Agricultura*. Obtenido de Noticias y Eventos: <http://www.indap.gob.cl/noticias/detalle/2020/03/19/ampl%C3%ADan-zona-de-emergencia-agr%C3%ADcola-por-escasez-h%C3%ADdrica-a-24-comunas-de-la-regi%C3%B3n-metropolitana>
- Rivera, A., Bown, F., Napoleoni, Muñoz, C., & Vuille, M. (2016). *Balance de masa glaciar*. Valdivia: CECs.
- Santuario de la Naturaleza Yerba Loca. (s/f). *Flora y Fauna Lo Barnechea*. Obtenido de <http://florayfaunalobarnechea.cl/mapa-yerba-loca/>
- Sarricolea, P., Herrera Osandón, M., & Meseguer-Ruiz, O. (2017). Climatic regionalisation of continental Chile. *Journal of Maps*, 66-73.
- Schaffer, N., Macdonell, S., Réveillet, M., & al, e. (2019). Rock glaciers as a water resource in a changing climate in the semiarid Chilean Andes. *Springer*, 1263-1279.
- Segovia, A., & Videla Giering, Y. (2017). Caracterización glaciológica de Chile. *Investigaciones Geográficas de Chile*, 3-24.
- Singh, V., Singh, P., & Haritashya, U. (2011). Encyclopedia of snow, ice and glaciers. *Springer*.
- Soto Bäuerle, M. V., Ferrando, F., & Vieira, R. (2002). Características geomorfológicas de un sistema de glaciares rocosos y de su cuenca de sustentación en Chile semiarido. *Investigaciones Geográficas de Chile*.

- Umatu. (10 de marzo de 2020). *UMATU - Panoramas con niños*. Obtenido de <https://umatu.cl/yerba-loca-camping-picnic-villa-paulina/>
- UNESCO. (2018). *El Atlas de Glaciares y Aguas Andinos: el impacto del retroceso de los glaciares sobre los recursos hídricos*. UNESCO.
- Universidad Católica. (s.f.). *Cartografía Interactiva*. Obtenido de http://www7.uc.cl/sw_educ/geografia/cartografiainteractiva/Inicio/Paginas/Untitled-1.htm
- Vergara Dal Pont, I., Moreiras, S., Santibañez, F., Araneo, D., & Ferrando, F. (2019). Debris flows triggered from melt of seasonal snow and ice within the active layer in the semi-arid Andes. *Permafrost and Periglacial Process*. Wiley., 1–12.
- Vergara Dal Pont, I., Santibañez, F., Araneo, D., Ferrando, F., & Moreiras, S. (2018). Determination of probabilities for the generation of high discharge flows in the middle basin of Elqui River, Chile. *Springer*, 531-546.
- Whalley, & Azizi. (2003). Rock glaciers and protalus landforms: Analogous forms and ice sources on Earth and Mars. *Geophysics*.

Anexos

Tabla de resumen de datos obtenidos para glaciares rocosos y cubiertos en el Santuario Yerba Loca

Identificación del Glaciar	Coordenadas centrales (centroide)		Estado dinámico	Exposición	Altitud (m.s.n.m)		Altura talud frontal (m)	Área		Longitud (m)	Ancho (m)	Thermokarst (N° de formas)
	Latitud Sur	Longitud Oeste			Máxima	Mínima		(km ²)	(há)			
GR.-1	33°14'32.87"	70°18'19.16"	Activo	S	3.667	3.513	22	0,1	10,8	555	145	-
GRT-2	33°15'2.33"	70°18'13.08"	Activo	S	3.451	3.417	23	0,009	0,9	57	81	-
GRT-3	33°15'3.16"	70°18'8.39"	Activo	S	3.430	3.395	18	0,009	0,95	90	77	-
GRT-4	33°14'5.08"	70°18'11.60"	Activo	S	3.723	3.659	21	0,02	2,04	169	98	-
GR-5	33°14'27.83"	70°17'37.18"	Activo	SE	3.527	3.204	37	0,18	18,13	948	130	-
GR-6	33°13'55.65"	70°17'40.32"	Activo	SE	3.851	3.697	11	0,03	2,23	213	71	-
GR-7	33°12'56.57"	70°17'4.48"	Activo	SE	3.800	3.630	35	0,054	5,46	336	118	-
GR-8	33°12'30.95"	70°16'59.90"	Activo	E	3.725	3.624	14	0,04	4,4	342	113	-
GR-9	33°12'8.52"	70°17'6.45"	Activo	E	3.965	3.556	110	0,15	15,61	752	126	1
GRT-10	33°11'55.04"	70°17'16.49"	Activo	E	3.888	3.811	29	0,02	2	196	52	-
GR-11	33°11'52.39"	70°17'17.58"	Relicto	E	3.923	3.820	50	0,03	3,66	430	61	-
GR-12	33°11'58.66"	70°16'50.61"	Relicto	SE	3.700	3.523	10	0,15	15,61	662	255	-
GR-13	33°12'49.58"	70°16'5.67"	Activo	O	3.800	3.572	10	0,14	14,2	600	183	-
GRLT-14	33°13'19.72"	70°16'12.76"	Activo	SO	3.410	3.233	29	0,05	5,06	254	152	-
GR-15	33°13'16.68"	70°15'12.44"	Activo	O	4.180	3.669	44	0,24	24	1.205	165	-
GR-16	33°13'37.73"	70°15'15.32"	Activo	O	4.145	3.731	36	0,3	30,72	1.626	157	-
GRLT-17	33°16'20.12"	70°15'8.22"	Activo	S	3.859	3.749	11	0,06	6,42	303	130	-
GRLT-18	33°16'38.63"	70°15'46.80"	Activo	S	3.714	3.440	18	0,19	19,84	883	137	-
GRLT-19	33°17'3.73"	70°16'9.52"	Activo	S	3.448	3.237	34	0,16	16,51	659	195	-
GRR-20	33°11'37.81"	70°17'12.95"	Relicto	S	4.133	4.129	<i>not data</i>	0,002	0,20	124	19	-
GRR-21	33°10'58.19"	70°16'21.39"	Relicto	SO	4.580	4.566	9	0,006	0,63	167	19	-
GRR-22	33°14'59.26"	70°14'31.88"	Relicto	SO	4.858	4.810	19	0,019	1,85	157	48	-
GRR-23	33°15'21.32"	70°14'50.76"	Relicto	SO	4.602	4.576	13	0,002	0,23	80	13	-
GC-1	33°11'47.04"	70°16'41.56"	-	S	3.994	3.398	-	0,59	58,8	2.109	280	2
GC-2	33°11'48.81"	70°15'19.90"	-	O	4.155	3.741	-	0,59	59	2.436	184	-
GC-3	33°12'54.67"	70°14'40.80"	-	O	4.375	3.720	-	1,07	107,2	2.173	480	12
GC-4	33°13'27.49"	70°14'38.46"	-	O	4.575	3.732	-	0,44	44	2.633	181	13