



Facultad de Ciencias Naturales y Exactas
Departamento de Ciencias y Geografía
Carrera de Geografía

**CARACTERIZACIÓN GEOMORFOLÓGICA
Y NUEVOS ANTECEDENTES SOBRE EL PAISAJE
EN LA CUENCA DEL GLACIAR ORIENTAL (48°45' S - 73°05' O).
CAMPO DE HIELO PATAGÓNICO SUR, SECTOR “BAHÍA ESPERANZA”,
BRAZO DEL DESAGÜE DEL LAGO O’HIGGINS, REGIÓN DE AYSÉN, CHILE.**

Seminario de Título para optar al Título de Geógrafo
Mención en Gestión y Ordenamiento Territorial

Gabriel Alejandro Santana Sepúlveda

Profesor Guía: Dr. Jean Pierre Francois Sepúlveda

Valparaíso, Chile

2024

“La mitad de la belleza depende del paisaje
y la otra mitad del hombre que la mira”

Lin Yutang

AGRADECIMIENTOS

En primera instancia, quisiera agradecer cordialmente al Instituto Chileno de Campos de Hielo (ICCH), y a su director Enrique Zamora M., por brindarme la oportunidad de embarcarme junto a ellos en este viaje a Campos de Hielo, en la Patagonia chilena, y poder recorrer junto a un increíble grupo de trabajo por lugares que, sin duda, quedaran para siempre en la memoria de cada uno de nosotros.

Quisiera agradecer también a mi profesor guía, Dr. Jean Pierre Francois, por el tiempo y trabajo dedicado para lograr los objetivos propuestos en este viaje. Destaco su disposición y compromiso por el bienestar de la investigación durante todo el desarrollo del trabajo.

Quiero dar gracias especialmente a mi madre, mi abuela, mi padre y mi hermana, y a todos los familiares que me brindaron sus muestras de apoyo, deseando siempre lo mejor para mí durante este proceso y siempre dispuestos a ayudarme en lo que fuese necesario.

Quiero mencionar también a mis compañeros, amigos y personas queridas que por algún momento fueron parte de este desafío. Gracias por el cariño demostrado y los mensajes de ánimo siempre presentes y necesarios en momentos de dificultad.

Por último, quisiera dar gracias a la vida, a la Tierra y a la geografía, por abrirme las puertas del mundo, darme las herramientas y permitirme conocer lugares, paisajes y personas maravillosas a través del camino, siendo mi hoja de ruta para lo que viene a futuro y a continuación, muchas gracias.

TABLA DE CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS	4
TABLA DE CONTENIDO	5
ÍNDICE DE FIGURAS.....	7
ÍNDICE DE TABLAS	14
ÍNDICE DE ANEXOS.....	15
RESUMEN.....	16
1. INTRODUCCIÓN	18
1.1 Planteamiento del Problema	18
1.2 Hipótesis	19
1.3 Objetivos	19
1.3.1 Objetivo General.....	19
1.3.2 Objetivos Específicos	19
1.4 Antecedentes Generales del Área de Estudio	20
1.4.1 Tectónica.....	20
1.4.2 Geología.....	22
1.4.3 Geomorfología.....	26
1.4.4 Clima	27
1.4.5 Hidrografía y Glaciología	31
1.4.6 Suelos	33
1.4.7 Vegetación, Fauna y Microorganismos	34
1.4.8 Antecedentes Antrópicos.....	35
2. MARCO TEÓRICO	37
2.1 Glaciaciones	37
2.2 Geomorfología Glacial	40
2.2.1 Identificación y Caracterización de Geoformas Glaciales.....	42

3.	MATERIALES Y MÉTODOS.....	46
3.1	Área de Estudio	47
3.2	Trabajo de Gabinete Pre-Terreno	48
3.2.1	Recopilación de Información Geoespacial	48
3.2.2	Delimitación del Área de Estudio.....	55
3.2.3	Confección Preliminar de Cartografías.....	62
3.3	Trabajo de Terreno	66
3.3.1	Levantamiento y Validación de Datos en Terreno	66
3.4	Trabajo de Gabinete Post-Terreno.....	71
3.4.1	Análisis de Muestras y Datos de Terreno.....	71
3.4.2	Digitalización de Estructuras y Geoformas Reconocidas	73
3.4.3	Clasificación Supervisada	74
4.	RESULTADOS	79
4.1	Delimitación y Descripción de la Cuenca	79
4.2	Fluctuaciones del Glaciar Oriental	82
4.3	Caracterización Geomorfológica de la Cuenca.....	88
4.4	Clasificación de las Coberturas Terrestres	98
5.	DISCUSIONES	105
5.1	Comprobación de la Información Geoespacial en Terreno	105
5.2	Delimitación de Cuencas y Dinámica de Geoformas en Ambientes Glaciales	107
5.3	Estructura de las Formaciones Vegetales.....	108
6.	CONCLUSIONES	110
	BIBLIOGRAFÍA.....	112
	ANEXOS	117

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Entorno geodinámico del sistema de convergencia Nazca-Sudamérica. (A) Modelo Digital de Elevación (DEM de ESRI) de Sudamérica y datos batimétricos (GEBCO 2014, ESRI) con la cinemática actual de las placas (según el modelo global NUVEL1); principales características estructurales de la Cordillera, principalmente fallas de cabalgamiento (Ramos, 1999) y localización de la zona volcánica activa (Gutscher et al., 2000). (B) Configuración geodinámica de la dorsal activa Chile Spreading Ridge bajo la Placa Sudamericana en un punto denominado Chile Triple Junction (CTJ). La migración de la CTJ se indica mediante el círculo de color que migra hacia el norte a través del tiempo a lo largo de la fosa. Modificado de Genge, 2021.	21
Figura 2 – Mapa de localización del batolito sur patagónico (SPB) en los Andes patagónicos. También se indican los complejos metamórficos de finales del Paleozoico a principios del Mesozoico en los que está instruido el SPB, los complejos ofiolíticos mesozoicos que se formaron en la cuenca de Rocas Verdes, incluido el complejo Sarmiento, situado más al norte, y la Formación Tobífera, principalmente volcánica silícica del Jurásico Tardío. Extraído de (Hervé et al., 2007).	23
Figura 3 – Mapa geológico del sector nororiental de CHPS, delimitado para nuestra área de estudio. Modificado de <i>Geología del área oriental de las hojas Cochrane y Villa O'Higgins</i> (SERNAGEOMIN, 2004).	25
Figura 4 – Temperatura y Precipitación media mensual para estaciones ubicadas al oeste (Barlovento) y al este (Sotavento) de CHP, entre 1949 - 1994 (Carrasco et al., 1998).	28
Figura 5 – Diagrama climático Walter Lieth para la zona de Villa O'Higgins, Región de Aysén, Chile. Mediciones entre los años 1948-2020. Fuente de datos: GHCN CAMS & GPCC v2022. Elaborado en Climate Charts, 2023.	30

Figura 6 – Propuestas de cronologías neoglacial para fluctuaciones de los glaciares patagónicos en el Holoceno por Mercer (1970, 1976, 1982) y por Aniya (1995, 1996). Las áreas sombreadas en el diagrama representan períodos de expansión glaciar. La cronología ‘tipo Mercer’ indica avances glaciares en aprox. 4700 - 4200 14C años BP, 2700 - 2000 14C años BP y durante la Pequeña Edad de Hielo. La cronología “tipo Aniya” presenta avances glaciares aprox. en 3600 14C años BP, 2300 14C años BP, 1600 - 1400 14C años BP y durante la Pequeña Edad de Hielo (Aniya, 1995).	37
Figura 7 – Resumen del avance glaciar identificado al sur de Sudamérica durante el periodo Neoglacial (5.000 14C años BP) (N. F. Glasser et al., 2004).	38
Figura 8 – Modelo geológico conceptual de un valle glaciar (Fookes et al., 2007). Extraído de Giles et al. (2017).	41
Figura 9 – Diagrama de Flujo de los Materiales y Métodos. Elaboración propia. .	46
Figura 10 – Vista general de Patagonia y ubicación del área de estudio (límites topográficos de la cuenca del glaciar Oriental, en CHPS, en base a la información obtenida a través del DEM de la región de Aysén). Elaboración propia.	47
Figura 11 – Fotografías aéreas Proyecto CORFO Chile 60; SAF 79, capturadas en el paso del vuelo sobre el glaciar Oriental (6683) y por su paso sobre el sector de Bahía Esperanza y el desagüe del Lago O’Higgins (6685). Fuente: SAF, 1979. ..	48
Figura 12 – Mosaico digital de A) fotografías aéreas históricas “6683” y “6685”, del SAF; y mosaico digital B) confeccionado de las cartografías “ <i>Ventisquero Gabriel Quiroz o Pascua</i> ” y “ <i>Río Ventisquero</i> ”, del IGM; ajustado a los límites topográficos de la cuenca del glaciar Oriental. El área en blanco representa las zonas sin información fotográfica (A) o cartográfica (B) para los datos presentados. Elaboración propia.	50
Figura 13 – Porcentaje de píxeles con nubes de la colección de imágenes satelitales Sentinel-2 entre los meses de Diciembre (2021) y Marzo (2022), (A) previo al filtro	

de nubes y (B) posterior al filtro de nubes aplicado a la colección. Elaboración propia. 53

Figura 14 – Secuencia de herramientas de GRASS en QGIS para la delimitación de una cuenca hidrográfica. Modificado de Duarte Angarita & Sierra Bernal (2022). 55

Figura 15 – Clasificación de los valores de compacidad. Extraído de Lombaida & Israel (2020). 57

Figura 16 – Clasificación de forma de la cuenca, con relación al rango de valores del factor de forma de Horton (Lombaida & Israel, 2020). 58

Figura 17 – Representación de modelos de terreno y clasificación de los valores de A) Pendiente B) Orientación de Laderas C) Índice de Irregularidad del Terreno y D) Índice de Posición Topográfica; obtenidos del DEM del área de estudio. Elaboración propia. 60

Figura 18 – Cartografía satelital de terreno, escala 1:15.000, ajustado al área de planicie proglacial de lavado o sandur, como lugar establecido para el reconocimiento de geoformas en terreno. Mapa base ESRI World Imagery (2023). Elaboración propia. 62

Figura 19 – Modelo de terreno, elaborado a partir del DEM y del modelo de pendientes. Se ajustaron los valores de visualización del DEM para resaltar el sandur mediante una gradiente de colores, a fin de destacar las estructuras de origen glacial. Elaboración propia. 63

Figura 20 – Mapa del NDVI ajustado a la cuenca del glaciar Oriental. El objetivo cartográfico es representar el estado de la vegetación y el emplazamiento de las estructuras vegetales sobre la planicie proglacial de lavado. Elaboración propia. 65

Figura 21 – Fotografías del trabajo efectivo en terreno junto al ICCH. En la imagen A) se analizan las cartografías de terreno confeccionadas en este estudio, y en B)

se visitó uno de los complejos morrénicos identificados en gabinete para su reconocimiento. Elaboración propia. 67

Figura 22 – Levantamiento de datos en terreno, mediante A) la captura fotogramétrica del área de estudio y de B) la barrenación de turberas. Elaboración propia. 68

Figura 23 – Rutas de reconocimiento y de trabajo en la parte media (Lago Oriental) y baja de la cuenca del glaciar Oriental (Planicie proglacial de lavado). Elaboración propia. 70

Figura 24 – Mapa de ubicación de las muestras tomadas en terreno y georreferenciación de los registros fotográficos aéreos (RPA). Estos registros muestran complejos morrénicos, bosques, turberas y playa de acreción. Elaboración propia. 72

Figura 25 – Diagrama de flujo sobre metodología para la Clasificación Supervisada. Modificado de Mohammadpour, P., et al. 2022. 74

Figura 26 – A la izquierda, la figura A) muestra la combinación de las bandas 4-3-2 de los Componentes Principales de la escena para el área de estudio, y a la derecha B) el resultado del análisis de textura de las bandas de la escena empleando el GLCM. Elaboración propia. 76

Figura 27 – Comparación de los índices de vegetación, utilizados para ajustar la clasificación de la vegetación, mediante los índices A) NDVI, B) GNDVI, C) SAVI y D) GCI. Elaboración propia. 78

Figura 28 – Mapa de delimitación de la cuenca del glaciar Oriental, elaborado a partir de información del DEM del área de estudio; además, se extraen las subcuencas dentro de la cuenca y la red hidrográfica. Elaboración propia. 80

Figura 29 – Comparación del frente desprendente del glaciar Oriental, utilizando la información geoespacial histórica recopilada. La imagen A) corresponde a la composición de las fotografías aéreas del SAF, con los límites del glaciar Oriental

el año 1979. La imagen B) fue capturada por el satélite Landsat 5 y muestra el estado del glaciar el año 1984. Las imágenes C) y D) fueron captadas por el satélite Sentinel-2 el año 2016 (más antiguo) y el año 2022 (más actual al momento de la recopilación de imágenes), respectivamente. 83

Figura 30 – A) Frente desprendente del glaciar Oriental, captado mediante un RPA; se observa la superficie del glaciar que emerge sobre el lago proglacial y el desprendimiento de témpanos. B) Acumulación por relieve y pendiente de témpanos acarreados por la corriente de desagüe del lago proglacial. 84

Figura 31 – Área afectada por la pérdida de masa y volumen de la lengua de desbordamiento del glaciar Oriental, entre los años 1979 y 2022. 85

Figura 32 – Fotografía de RPA del glaciar Oriental (2022). Se observa el deslizamiento de laderas junto a la deposición del material en la superficie de la lengua de desbordamiento, y la reptación de una enorme formación boscosa por efecto de la gravedad y del adelgazamiento del manto glaciar. Elaboración propia. 86

Figura 33 – Límites de extensión de la lengua de desbordamiento y frente desprendente del glaciar Oriental en los años 1979 – 1984 – 2016 – 2022. Elaboración propia. 87

Figura 34 – Modelo Digital de Terreno de la cuenca del glaciar Oriental. Confeccionado a partir de la elevación, pendientes de terreno y curvas de nivel (30 m), obtenidos del DEM de la región de Aysén. En el recuadro se muestra la ubicación de los cortes transversales A-A' y B-B' para el análisis del perfil topográfico de los “Complejo Morrénico I” y “Complejo Morrénico IV”. Elaboración propia. 90

Figura 35 – Registro del patrón de flujo trenzado de las corrientes de agua del frente glaciar sobre la planicie proglacial de lavado, captada desde un RPA y georreferenciado al área de estudio, tal como se muestra en la Figura 25. Elaboración propia. 91

Figura 36 – Ubicación de los complejos morrénicos en el valle, sobre la planicie proglacial de lavado. Cada complejo corresponde a un periodo neoglacial, siendo el Complejo Morrénico I el más antiguo, avanzando en tiempo geológico hacia el Complejo Morrénico IV, formado en un periodo Neoglacial más reciente. Elaboración propia.	92
Figura 37 – Perfil Topográfico A - A' (emplazamiento del corte se muestra en la Figura 35) e identificación de geoformas. Elaboración propia.....	93
Figura 38 – Fotografía aérea de la planicie proglacial de lavado, con la ubicación de las geoformas identificadas en el Perfil Topográfico A - A', representado en la Figura 38. Elaboración propia.	93
Figura 39 – Perfil Topográfico B - B' (emplazamiento del corte se muestra en la Figura 35) e identificación de geoformas. Elaboración propia.....	94
Figura 40 – Fotografía aérea del lago y glaciar Oriental, con la ubicación de las geoformas identificadas en el Perfil Topográfico B - B', representado en la Figura 40. Elaboración propia.	94
Figura 41 – Rocas aborregadas y lineamientos glaciares, indicando la dirección de flujo del glaciar Oriental, captado mediante un RPA, en el valle del glaciar Oriental. Elaboración propia.	95
Figura 42 – Mapa geomorfológico de la cuenca del glaciar Oriental, en base a la identificación de geoformas en gabinete y en terreno. Se complementa con información geológica en formato shape de SERNAGEOMIN (2004), junto al último Inventario Público de Glaciares de la DGA (2022). Elaboración propia.	97
Figura 43 – Distribución espacial de las muestras tomadas de las distintas cubiertas de terreno establecidas. Elaboración propia.	99
Figura 44 – Coberturas terrestres obtenidas de la Clasificación Supervisada del área de estudio en Google Earth Engine, aplicando el clasificador Random Forest. Elaboración propia.	102

Figura 45 – Área en km ² para cada cubierta identificada de terreno. Elaboración propia.	103
Figura 46 – Área en porcentaje para cada cubierta identificada de terreno. Elaboración propia.	104
Figura 47 – Bloque errático y turberas emplazadas sobre un complejo morrénico, identificado durante el reconocimiento en terreno del área de estudio. Elaboración propia.	106
Figura 48 – Muestra de la quema de árboles para el uso maderero y ganadero de la extensión de la planicie de lavado, en el valle de la cuenca del glaciar Oriental. Elaboración propia.	109

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 – Geoformas identificadas utilizando imágenes de satélite y los criterios usados para su identificación. Extraído de Pino Dahmen (2022). Modificado de Glasser & Jansson (2008).....	44
Tabla 2 – Modelo de Elevación Digital (DEM) ALOS-PALSAR, seleccionado para el análisis geomorfológico de la cuenca del glaciar Oriental.....	51
Tabla 3 – Imagen satelital Landsat 5 (TM) seleccionada para el análisis multitemporal del área de estudio y para el cálculo de índices espectrales.	52
Tabla 4 – Imágenes satelitales Sentinel-2 seleccionadas para el análisis multitemporal del área de estudio y para el cálculo de índices espectrales.	54
Tabla 5 – Morfometría de la cuenca del glaciar Oriental a partir de datos del DEM del área de estudio. Elaboración propia.	88
Tabla 6 – Número de muestras por clases para la Clasificación Supervisada en GEE. Elaboración propia.	98
Tabla 7 – Resultados de la Matriz de Confusión y Coeficiente Kappa de la clasificación supervisada del área de estudio Random Forest. Elaboración propia.	100

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1 – Datos climáticos disponibles para la comuna de Villa O'Higgins, entre los años 1948 - 2022, utilizados en la elaboración del diagrama climático Walter Lieth, tal como se muestra en la Figura 5. Fuente de datos: GHCN CAMS & GPCC v2022. Fuente: Climate Charts (2022).	118
--	-----

RESUMEN

El Campo de Hielo Patagónico Sur (CHPS), junto a sus áreas limítrofes, son posiblemente uno de los parajes más inexplorados y desconocidos del territorio continental chileno, a causa de su intrincada morfología, su clima hostil y las limitadas vías de acceso, entre otros. Esto resulta en escasa información relacionada con diferentes aspectos de geografía y territorio, lo que dificulta el valorar y gestionar estos lugares.

El siguiente trabajo pretende aportar con nueva y relevante información asociada a aspectos de geografía física y ambiental, presentes en un pequeño valle y cuenca glacial, anexo al CHPS.

En específico, el área de estudio se emplaza al sureste de la región de Aysén ($48^{\circ}45'S$ - $73^{\circ}05'O$; 250 m s.n.m.), en la zona transandina oriental, aledaña al Lago O'Higgins y adyacente a los límites nororientales del Parque Nacional Bernardo O'Higgins.

Los hallazgos indican el origen glacial de la cuenca, encontrándose a lo largo del valle los vestigios resultantes de los procesos de erosión, transporte y sedimentación asociados al movimiento del glaciar Oriental.

Entre estos hallazgos se destaca la presencia de cuatro cordones morrénicos asociados, posiblemente, a actividad Neoglacial. Se encuentran emplazados sobre una extensa planicie proglacial de lavado que cubre el valle en la parte baja de la cuenca.

Adicionalmente, la comparación entre imágenes multitemporales (aéreas y satelitales) permitieron evidenciar que la posición del frente del glaciar Oriental ha variado mínimamente en los últimos 40 años, situación que contrasta con la mayoría de los otros glaciares presentes en la zona de Campos de Hielo Patagónicos (CHP).

Con relación al paisaje biótico, es de destacarse que la distribución de las formaciones vegetales sigue las formas del relieve presentes en el área de estudio.

De este modo, se observa la predominancia de turberas en los depósitos de morrenas de fondo y planicie de lavado, mientras que las formaciones más leñosas (i.e. matorral y bosque) se emplazan sobre depósitos con mejor drenaje, como lo son los complejos morrénicos y las laderas de valle.

Finalmente, la evidencia de árboles quemados en diversos sectores del área de estudio da cuenta de la actividad humana asociada al uso ganadero extensivo del terreno. Esto, nos habla de la naturaleza alterada y degradada en estos ambientes y la impronta del Antropoceno en la Patagonia y CHP.

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Planteamiento del Problema

Durante la última década, diversas investigaciones científicas y estudios multidisciplinarios se han llevado a cabo en CHPS, enfocados principalmente en estudios hidrológicos, glaciológicos, geológicos, ecológicos, antropológicos y ambientales de esta zona.

Estos trabajos han sido motivados con el objetivo de conocer la génesis, evolución y respuesta de los distintos componentes y elementos que conforman el medio biótico y abiótico de una zona o área en específico, especialmente en ambientes glaciares y periglaciares, ante su alta tendencia a los cambios y perturbaciones antropogénicas, pero también por su rol atingente en la lucha contra problemas como el cambio climático y/o calentamiento global; además de su papel significativo en la preservación y conservación de los ecosistemas y del medioambiente a escala local y global.

Lamentablemente, el difícil acceso y la acotada posibilidad de estadía en estos ambientes glaciales de CHP, dificulta la generación de información actualizada y detallada sobre territorio y paisaje, resultando en una escasa protección y gestión con visión a futuro de estos lugares, pensando en las consecuencias que podrían ejercer los efectos del cambio climático y/o calentamiento global sobre estas zonas en un tiempo próximo.

En particular para este estudio, nos centraremos en un área del sector noreste de CHPS (48°45' S – 73°05' O), en la cuenca y valle del glaciar Oriental, para el desarrollo de un estudio geomorfológico y ambiental del paisaje, mediante la combinación del trabajo exploratorio en terreno y el uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG) para el análisis espacial y multitemporal de la cuenca, a fin de elaborar nueva y detallada información sobre esta área de CHPS, escasamente estudiada debido a su acceso remoto, identificando los cambios y perturbaciones del paisaje y de las coberturas terrestres en el área durante los últimos 40 años.

1.2 Hipótesis

Los antecedentes recopilados indican la influencia del glaciar Oriental como principal agente modelador de la estructura del paisaje, el que, mediante los procesos de erosión, transporte y sedimentación, definió la morfología y el componente ambiental de la cuenca.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Caracterizar la cuenca del glaciar Oriental, a través de un estudio geomorfológico y ambiental del paisaje.

1.3.2 Objetivos Específicos

- A. Delimitar la cuenca del glaciar Oriental y las subcuencas presentes en el área de estudio, mediante el uso de SIG.
- B. Identificar la geomorfología glacial de la cuenca, mediante el análisis morfométrico y morfológico del paisaje.
- C. Establecer los principales cambios en la estructura y en los componentes del paisaje, a través de un análisis multitemporal de la cuenca.
- D. Definir el área y porcentaje de uso de suelo de las distintas coberturas terrestres identificadas en el área de estudio.

1.4 Antecedentes Generales del Área de Estudio

1.4.1 Tectónica

El marco tectónico de la región de Aysén, donde ubicamos nuestra área de estudio, destaca por su emplazamiento dentro de la zona de conjunción de las placas tectónicas “Antártica – Pacífico Sur”, “Nazca” y “Sudamericana”, en la denominada “Triple Unión de Chile” (CTJ), donde la colisión y subducción de las placas oceánicas bajo la placa continental dio origen al levantamiento de la Cordillera de los Andes y de la fragmentación de la corteza continental, resultando en la formación de valles, fiordos y canales (Genge, 2021).

La causa de la actual dinámica de las placas es que, en el tiempo, varios segmentos de dorsales oceánicas han chocado con el borde occidental de América del Sur.

El primero fue el que separaba las placas Farallón y Aluk durante el Paleoceno-Eoceno.

El segundo corresponde al Neógeno-Cuaternario y se trata de la dorsal llamada Chile Spreading Ridge, que divide las actuales placas de Nazca y Antártica.

Esta dorsal colisionó con el borde hace 15 millones de años (Mioceno) y desde entonces ha ido desplazándose desde el sur hacia el norte, hasta llegar al punto donde está hoy en día, 46°12' S, frente a la Península de Taitao (Fernández Quezada, 2022).



Figura 1 - Entorno geodinámico del sistema de convergencia Nazca-Sudamérica. (A) Modelo Digital de Elevación (DEM de ESRI) de Sudamérica y datos batimétricos (GEBCO 2014, ESRI) con la cinemática actual de las placas (según el modelo global NUVEL1); principales características estructurales de la Cordillera, principalmente fallas de cabalgamiento (Ramos, 1999) y localización de la zona volcánica activa (Gutscher et al., 2000). (B) Configuración geodinámica de la dorsal activa Chile Spreading Ridge bajo la Placa Sudamericana en un punto denominado Chile Triple Junction (CTJ). La migración de la CTJ se indica mediante el círculo de color que migra hacia el norte a través del tiempo a lo largo de la fosa. Modificado de Genge, 2021.

1.4.2 Geología

La Cordillera de los Andes tiene una línea de cumbres altas que marca el eje central del Batolito Patagónico, el cual está compuesto principalmente por rocas graníticas.

La intrusión del Batolito Patagónico (Orogénesis Andinas) causó un levantamiento que afectó las rocas de contacto, como los estratos de los Cordones Subandinos en la vertiente oriental de CHPS (Hervé et al., 2007).

Las rocas más antiguas de la Región se encuentran al sur del Lago General Carrera y en el litoral, y fueron formadas por procesos de transformación en el Paleozoico (Orogénesis Herciniana entre el Devónico, 408 a 360 millones de años; y el Carbonífero, 360 a 286 millones de años) (Godoy Gellepiani, 2017).

Estas rocas se denominan en su conjunto Basamento Metamórfico.

Dos tipos de formaciones de rocas se encuentran en la comuna de O'Higgins, las rocas del Grupo Ibáñez en el norte del territorio comunal, formadas principalmente por lavas, brechas tobáceas, areniscas y conglomerados.

En el sur de la comuna se sitúa el Complejo Metamórfico Andino Oriental, que contiene mármol, micas esquistos, pizarras, metaconglomerados y metabrechas (SERNAGEOMIN, 2004).

Los aluviones son uno de los riesgos geológicos más importantes, como el aluvión de mayo de 1966 en Coyhaique.

También existen otros riesgos como el desprendimiento de rocas debido a la acción del agua, hielo y viento, la erosión de las riberas de los ríos con mayor demanda de uso ribereño, las inundaciones causadas por la baja capacidad de absorción de precipitaciones de la mayoría de las rocas y las emanaciones volcánicas de gases nocivos como los óxidos de azufre y el fluoruro de hidrógeno (Aysén, 2005).

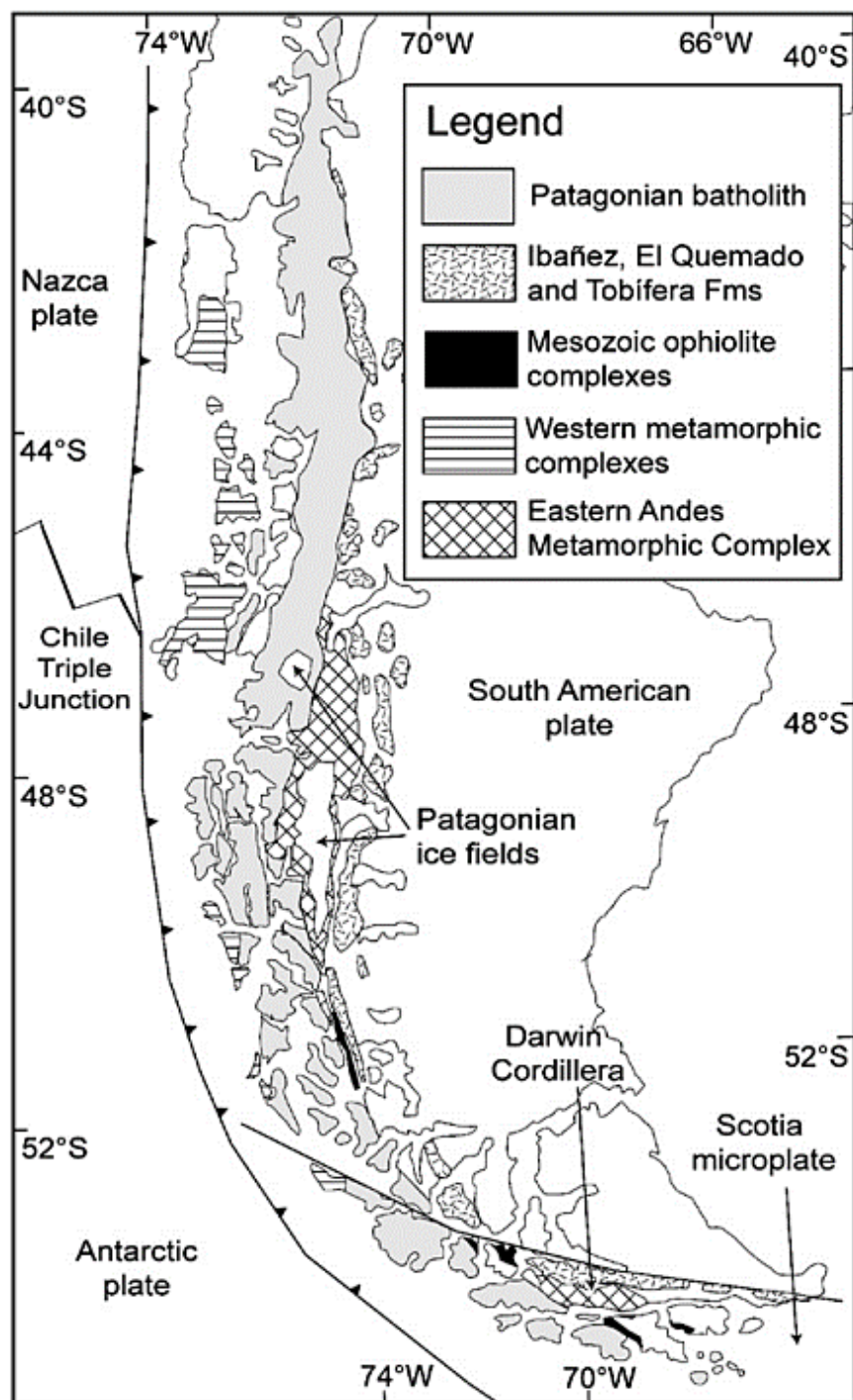
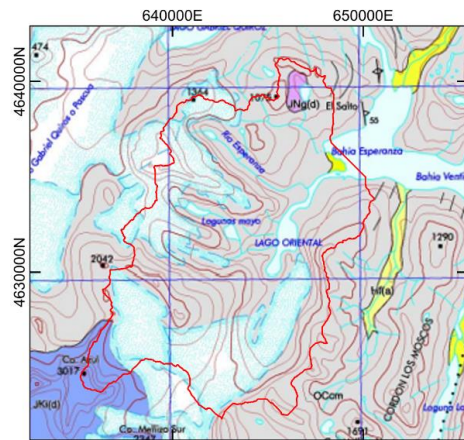


Figura 2 – Mapa de localización del batolito sur patagónico (SPB) en los Andes patagónicos. También se indican los complejos metamórficos de finales del Paleozoico a principios del Mesozoico en los que está instruido el SPB, los complejos ofiolíticos mesozoicos que se formaron en la cuenca de Rocas Verdes, incluido el complejo Sarmiento, situado más al norte, y la Formación Tobífera, principalmente volcánica silícica del Jurásico Tardío. Extraído de (Hervé et al., 2007).

En base al Mapa Geológico de Chile, confeccionado por el Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN, 2004), para el área de estudio se describen e identifican las siguientes formaciones rocosas (Fig.3):

- A. **DC4:** Rocas metamórficas tales como metaareniscas, filitas y, en menor proporción, mármoles, cherts, metabasaltos, y metaconglomerados; metaturbiditas con facies de 'mélange'.
- B. **Hf:** Sedimentos no consolidados, generados por cursos de agua, depositados, en general, en valles de origen glacial.
- C. **Kig:** Rocas intrusivas del Cretácico Inferior, compuestas por Granitos, granodioritas y tonalitas de hornblenda y biotita.
- D. **J3a:** Secuencias y centros volcánicos: rocas piroclásticas dacíticas a riolíticas, lavas andesíticas e intercalaciones sedimentarias.



- Hf**
(a) Depósitos fluviales actuales (Holoceno).
(b) Sedimentos no consolidados, generados por cursos de agua, depositados, en general, en valles de origen glacial.
(a) Depósitos de barras: Gravas clastosoportadas, localmente imbricada, con estratificación mal desarrollada. Arenas con estratificación plana y cruzada y lentes de limos.
(b) Depósitos de llanura de inundación: Constituidos por limo, arcilla y abundante materia orgánica, acumulados en zonas planas y depřimidas, durante las crecidas de ríos.
- JKI**
(b) Formación Ibáñez (En la Carta Jurásico Medio alto-Superior; ca. 160-144 Ma)
(c) Rocas principalmente piroclásticas y lávicas, de composición riolítica, dacítica y andesítica; localmente en la base, rocas sedimentarias.
(a1) Asociación sedimentario-volcánica basal bien estratificada: Areniscas, conglomerados, brechas sedimentarias, ignimbritas y brechas volcánicas.
(a2) Asociación sedimentario-volcánica basal de brechas caóticas: Brechas, con fragmentos principalmente metamórficos.
(b) Asociación lávica y piroclástica: lavas riolíticas y andesíticas, brechas piroclásticas, ignimbritas, tobas de caída y tuffas. Cuerpos subvolcánicos andesíticos.
(c) Asociación piroclástica: tobas riolíticas de ceniza, cristales y lapilli (de flujo y caída), localmente, lavas andesíticas y niveles calcáreos.
(d) Asociaciones lávicas y volcanoclasticas indiferenciadas: lavas y rocas volcanoclasticas riolíticas, andesíticas y dacíticas.
- JNg**
Granitoides y dioritoides O'Higgins (Jurásico - Neógeno?)
Plutones y stocks aislados.
(a) Microdiorita.
(b) Granodiorita.
(c) Filón granítico.
(d) Granito.
- OCcm**
Complejo Metamórfico Andino Oriental (Ordovícico - Carbonífero)
(a) Complejo polideformado compuesto principalmente por esquistos de mica y cuarzo-muscovita, filitas y metacuarzitas, subordinadamente mármol, esquistos calcáreos, metacherts y metabasitas.
(a) Mármol y esquistos calcáreos.
(b) Metacherts.
(c) Metabasitas.
(d) Metaareniscas cuarcíferas.
(e) Metaconglomerados.
(f) Metaareniscas y metapelitas.
(g) Metapelitas.

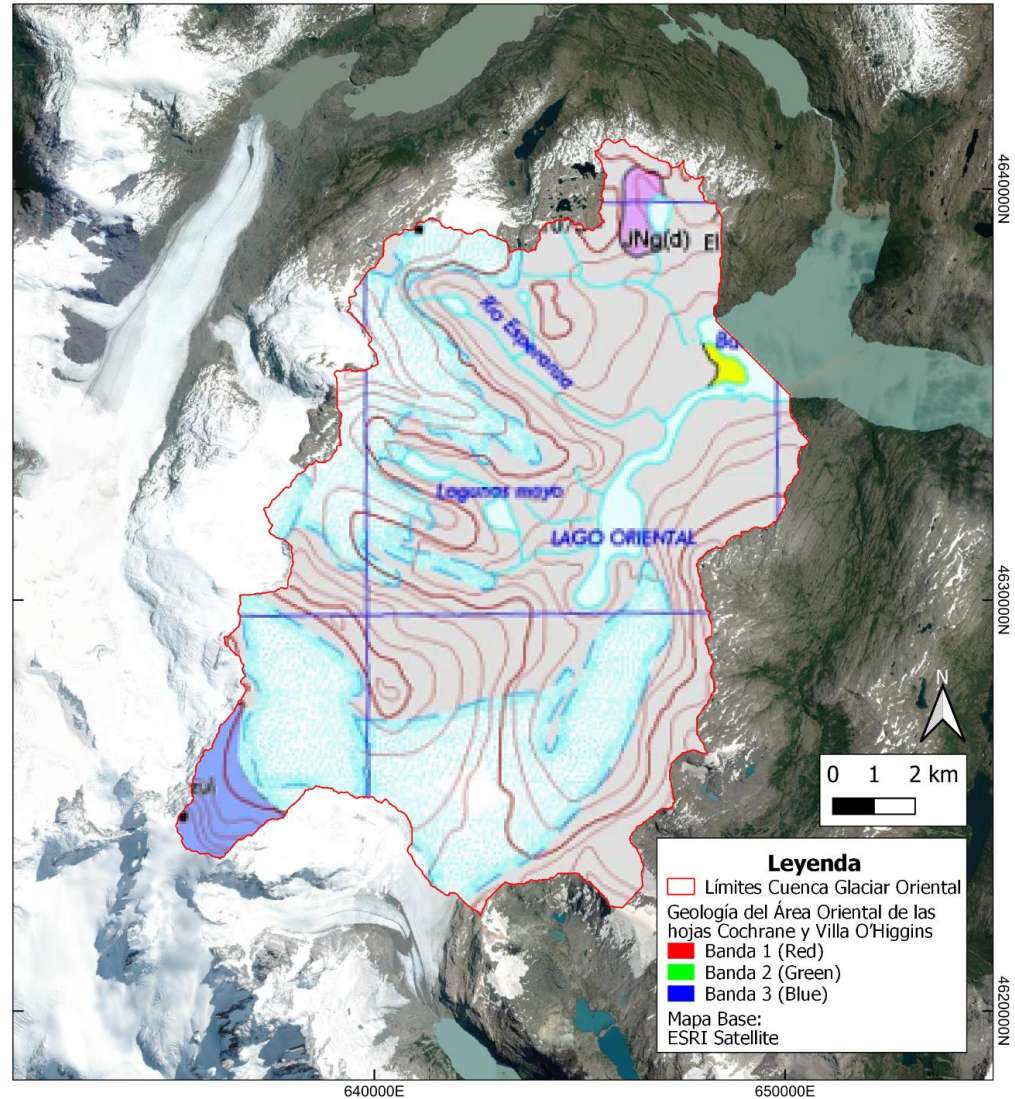


Figura 3 – Mapa geológico del sector nororiental de CHPS, delimitado para nuestra área de estudio. Modificado de *Geología del área oriental de las hojas Cochrane y Villa O'Higgins* (SERNAGEOMIN, 2004).

1.4.3 Geomorfología

La morfología regional corresponde en un 90% a la marca producida por la erosión glacial, desde principio del Pleistoceno, proceso que aún persiste en amplios sectores, modelando la cordillera de los Andes para irse suavizando lentamente hacia los relieves estepáricos, constituidos por amplios planos deposicionales, en los cuales sobresalen algunos relieves residuales (e.g. morrenas) (Aysén, 2005).

Dos grandes formas de relieve, la Cordillera Principal y el Cordón Patagónico Oriental, conforman el paisaje de la comuna de O'Higgins, donde se alternan pendientes y valles formados por glaciares, con abundantes ríos y lagos (Aysén, 2005).

La primera (Cordillera Principal) destaca por su relieve escarpado y sus altas montañas, como el Volcán Lautaro (3.380 msnm), ubicado en el centro del CHPS, presentándose como la cumbre más alta de la cuenca del Lago O'Higgins (Opazo, 2016).

Un área de montañas que no sobrepasan los 2.000 m s.n.m. conforman la segunda mayor unidad geomorfológica del área (Cordón Patagónico Oriental), bajando de altitud hasta convertirse en las amplias mesetas patagónicas, zona de transición donde se ubica la capital comunal, Villa O'Higgins (265 m s.n.m.), en una llanura aluvial que se forma por la confluencia de los ríos Mayer y Mosco (Opazo, 2016).

1.4.4 Clima

El contexto climático de CHPS, en general, es poco conocido. Esto en términos relacionados a su clima actual o al de los últimos 30 años, debido principalmente a su gran extensión y complejos accesos, lo que dificulta su monitoreo.

Los datos que se manejan de Campos de Hielo Patagónico Norte (CHPN) y CHPS no son lo suficiente contundentes en tiempo y espacio para realizar una caracterización de las condiciones meteorológicas promedio, su variabilidad y su tendencia (Carrasco et al., 2021).

De este modo, la información climatológica disponible describe a escala regional las principales condiciones meteorológicas y glaciológicas de CHP.

La región de CHPS se ve frecuentemente afectada por un “... *régimen de vientos del oeste de latitudes medias... El comportamiento global anual indica que los vientos son más débiles durante el invierno, con dirección suroeste en comparación con el verano, cuando el régimen de vientos se hace más fuerte y con dirección norte-noroeste.*” (Carrasco et al., 2002).

Otra de las características de CHP es su escarpada topografía orientada en dirección norte-sur, que, sumada al paso de los sistemas de latitudes medias impregnados del viento oeste, condicionan un marcado efecto de incremento orográfico de las precipitaciones a barlovento y sombra orográfica a sotavento. Este contraste marca un clima templado e hiper-húmedo al oeste de CHP, mientras que el este se caracteriza por su clima continental y seco (Carrasco et al., 2021).

El régimen de precipitación anual en el lado oeste de CHPS excede los 7.000 mm en el nivel de costa, llegando hasta los 10.000 mm en el plateau, luego, estos valores disminuyen hacia el este de CHPS, donde el monto anual de pp es inferior a los 400 mm (Carrasco et al., 2002).

Un análisis a las estaciones atmosféricas cercanas a CHP realizado por Carrasco et al. (1998) (Fig. 4), muestra una ligera diferencia en el comportamiento de la temperatura entre las estaciones costeras influenciadas por el Océano Pacífico (San

Pedro, Puerto Edén y Faro Evangelistas), y las estaciones interiores influenciadas por el entorno continental (Cochrane, Lago Argentino y Punta Arenas).

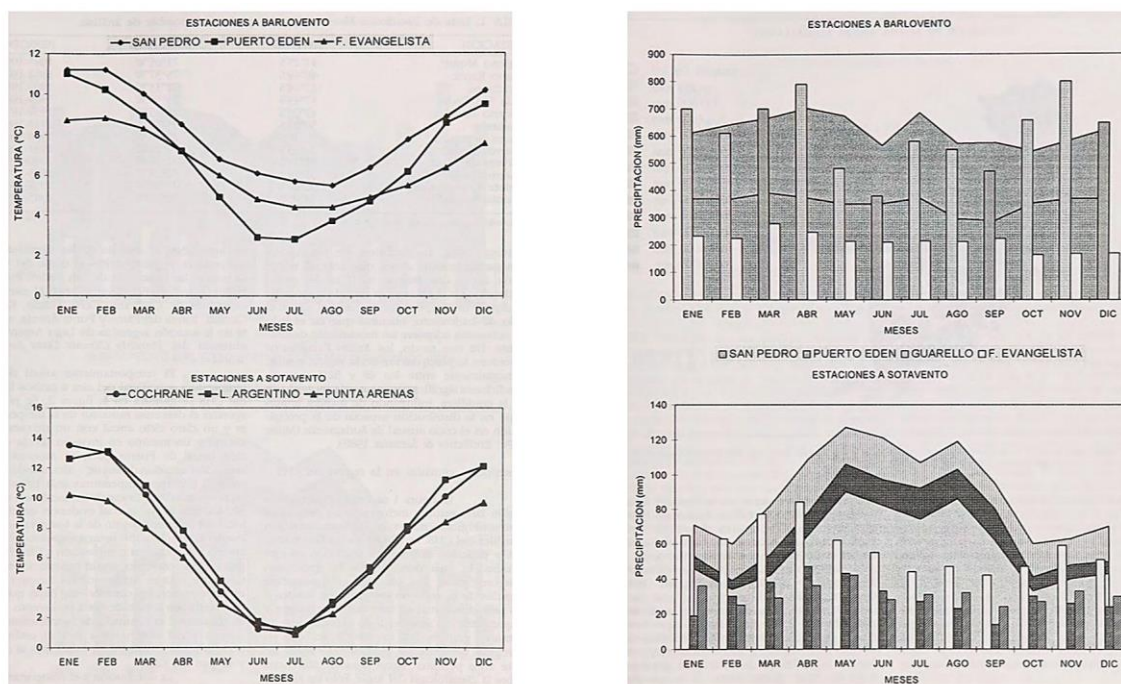


Figura 4 – Temperatura y Precipitación media mensual para estaciones ubicadas al oeste (Barilovento) y al este (Sotavento) de CHP, entre 1949 - 1994 (Carrasco et al., 1998).

El clima de O'Higgins está influenciado por la cordillera de los Andes Patagónicos, que divide el litoral del Pacífico de clima frío oceánico (del sector de archipiélagos e islas y vertiente occidental de los Andes Patagónicos), de las pampas orientales con clima de estepa fría (vertiente oriental de los Andes Patagónicos o transandinos) (Opazo, 2016).

En cuanto a las temperaturas, la media anual en la comuna varía entre 7 °C y 0 °C desde su extremo norte hasta el CHPS y sus alrededores.

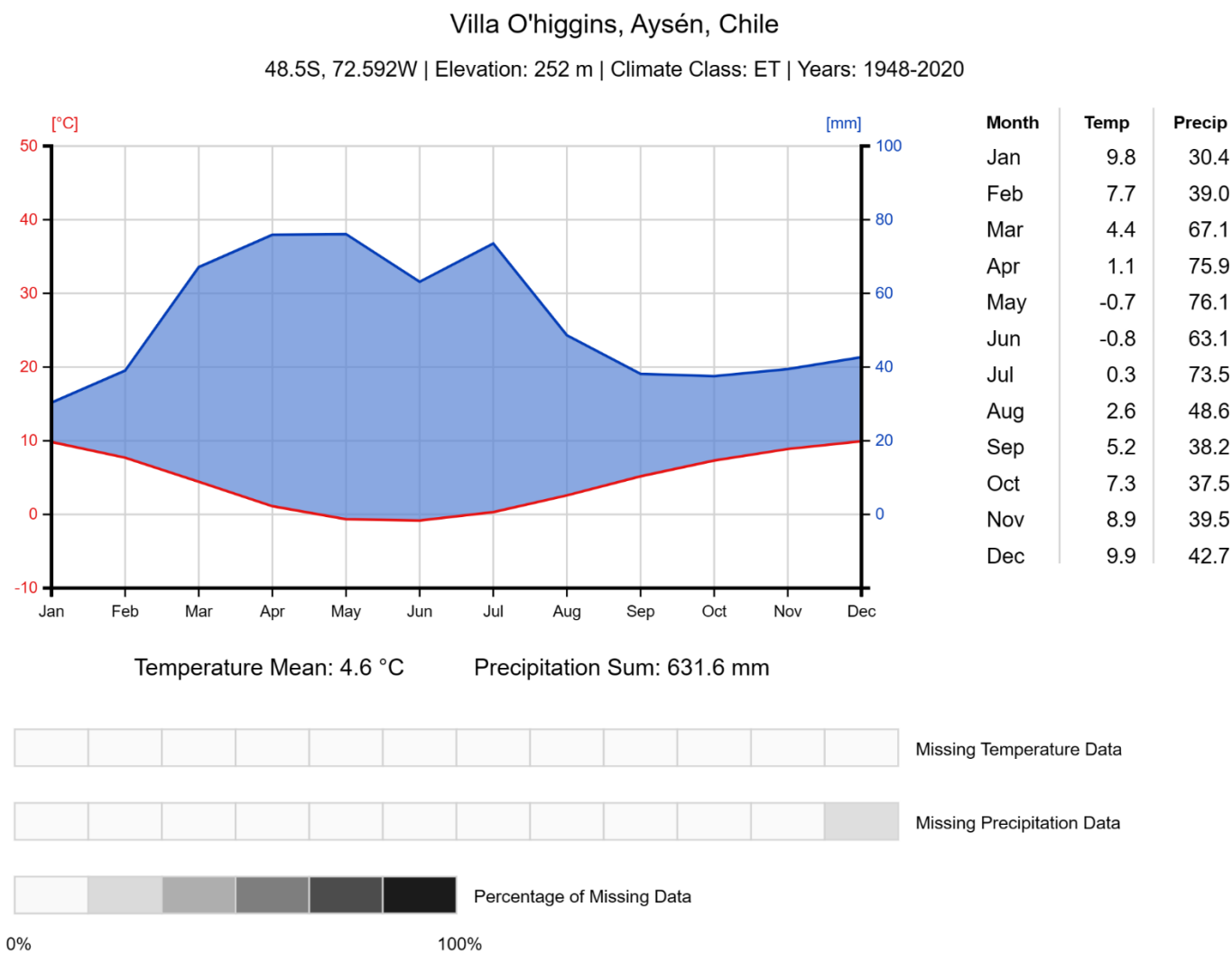
En términos estacionales, las temperaturas en el periodo estival (diciembre - marzo) oscilan entre 4 °C y 15 °C, pudiendo descender a temperaturas bajo 0 °C durante la noche.

En el mes de noviembre y abril las temperaturas pueden ser un poco más frías, con altas posibilidades de un clima estable y con menos viento que en invierno, donde se aprecia la existencia de nevadas con temperaturas que oscilan entre los -15 °C y 8 °C (Opazo, 2016).

En el sector de CHPS se registran precipitaciones de nieve en donde se puede alcanzar aproximadamente hasta 8.000 mm anuales, que descienden gradualmente hasta los 1.500 mm en forma de lluvia en los extremos del lago O'Higgins.

Sin embargo, en Villa O'Higgins se registran precipitaciones anuales que fluctúan entre los 850 y 1.000 mm, distribuidas durante todos los meses del año, siendo el mes de julio el más lluvioso (Opazo, 2016).

La Figura 5 muestra un diagrama climático Walter Lieth, con mediciones de temperatura y precipitación media, entre los años 1948 y 2020 (el Anexo 1 muestra la disponibilidad de los datos climáticos), para la comuna de Villa O'Higgins, donde se observa un patrón similar en el comportamiento de las variables analizadas por Carrasco et al. (1998) y los datos representados en el diagrama Walter Lieth, donde destaca el incremento de las temperaturas mínimas entre los meses de mayo – junio, llegando a valores inferiores a los 0 °C.



Data Source: GHCN CAMS and GPCC v2022
<https://dx.doi.org/10.1029/2007JD008470>

ClimateCharts.net

Figura 5 – Diagrama climático Walter Lieth para la zona de Villa O'Higgins, Región de Aysén, Chile. Mediciones entre los años 1948-2020. Fuente de datos: GHCN CAMS & GPCC v2022. Elaborado en Climate Charts, 2023.

1.4.5 Hidrografía y Glaciología

Campo de Hielo Patagónico Sur se encuentra entre las latitudes 48°20' S y 51°30' S, en el meridiano 73°30' O, con una extensión de 350 km, un ancho medio de 35 km y un mínimo de 8 km (Casassa Rogazinski et al., 2000).

Está constituido por 48 grandes glaciares, estos se extienden entre el glaciar Jorge Montt por el norte (Tortel) y el Parque Nacional Torres del Paine por el sur (región de Magallanes y la Antártica Chilena).

Corresponde a una amplia extensión glaciar localizada en los Andes Patagónicos, y es considerada como una de las grandes reservas de agua dulce del planeta.

La comuna de O'Higgins tiene bajo su jurisdicción alrededor de 2.114 km² de territorio, lo que equivale al 16% del área total de CHPS (Opazo, 2016).

Los glaciares en CHPS (i.e. glaciar Oriental) son del tipo temperado o templado, esto debido a la alta temperatura media anual de los márgenes del campo de hielo, que es de aproximadamente 6 °C (Carrasco et al., 1998), lo que significa que el hielo glaciar está todo el año en su punto de fusión.

De las seis hoyas principales que conforman la estructura hidrográfica de la región de Aysén, tanto la cuenca del río Bravo como la del río Pascua son las que se ubican inmediatamente al nororiente del CHPS.

La cuenca del glaciar Oriental se emplaza dentro de la hoya del Río Pascua; *“El Río Pascua drena una cuenca de 14.525 km² de los cuales 7.155 km² están en el territorio nacional. Nace en el Lago O'Higgins y después de un recorrido de 63 km desemboca en el fiordo Steele, con un caudal medio estimado de 400 m³/seg.”* (Aysén, 2005).

Los cuerpos lacustres también están muy presentes en el área de estudio, entre ellos se encuentra el lago O'Higgins destacado por su carácter binacional (llamado lago San Martín en territorio argentino).

El lago O'Higgins presenta una superficie de 1.049 km², de los cuales, 529 km² pertenecen a Chile, con una profundidad máxima de 836 m en el territorio nacional, se ubica como el quinto lago con mayor profundidad a nivel mundial.

Posee ocho "brazos", encontrándose cinco de ellos en la comuna de O'Higgins: brazo nororiental, poniente, del desagüe, glaciar O'Higgins y glaciar Chico (Opazo, 2016).

La comuna se encuentra inserta en una zona caracterizada por la presencia de ríos caudalosos trasandinos y la presencia de los CHP. Los principales exponentes son los ríos Mayer, Pascua y Bravo.

El río Mayer nace en Argentina y posee una superficie de 3.366 km², en el territorio nacional cuenta con una longitud de 51 km, y una cuenca que bordea los 1.358 km², misma que fluye en dirección predominante del norte al sur, el cual desemboca cerca de la localidad de Villa O'Higgins.

El río Pascua nace en el lago O'Higgins y es el segundo río más caudaloso de aquellos que drenan hacia el océano Pacífico en Chile (700 m³/s), además de constituir la principal cuenca en la zona, con una superficie que supera los 7.155 km².

Otro afluente de importancia es el río Bravo, localizado en el acceso norte de la comuna, nace en la vertiente sur del cordón montañoso del Cerro San Lorenzo (Cochrane) y tiene su desembocadura en el fiordo Mitchell (Tortel), constituyendo una cuenca hidrográfica independiente del lago O'Higgins (Opazo, 2016).

1.4.6 Suelos

Sobre los tipos y usos del suelo presentes dentro del área de estudio, se consultó directamente al Centro de Información de Recursos Naturales (CIREN), del Ministerio de Agricultura del Gobierno de Chile (MINAGRI), sobre información disponible asociada a nuestra área de estudio, confirmando que no se mantiene información sobre tipos o usos de suelo para el área de la cuenca del glaciar Oriental en específico.

A través del Departamento de Agricultura de Estados Unidos (USDA), se logró obtener una clasificación de suelos a escala regional categorizando los terrenos según sus riesgos y limitaciones, *“asignando el uso más factible desde el punto de vista productivo asociado a actividades agropecuarias”*, identificando para la cuenca del glaciar Oriental la existencia de suelos de Clases VII y VIII, definidos por el USDA como:

- A. **Clase VII:** *“son terrenos no aptos para empastadas con serias limitantes para la ganadería y de aptitud mayormente forestal, pero únicamente mediante un manejo cuidadoso, ya que, dadas sus fuertes pendientes, presentan mayor erodabilidad; además de poca profundidad, pedregosidad, rocosidad, entre otras limitantes. Se identifican como cerrilladas, conos aluviales y piedemontes.”*

- B. **Clase VIII:** *“son aptos sólo para vida silvestre, recreación y/o protección de cuencas hidrográficas, ya que cualquier actividad consuntiva de recursos naturales presenta una alta probabilidad de generar fuertes impactos. Funcionan como corredores biológicos y reservorios de nieve. Se identifican como bardas, candongos, cañadones, cajas de río y arroyos, mallines inundados, altas cumbres, glaciares y turberas.”*

1.4.7 Vegetación, Fauna y Microorganismos

De las formaciones vegetacionales descritas por Gajardo Michell (1994), se identifican para el área de estudio, tres tipos de formaciones vegetales, siendo la principal el Matorral periglaciario, seguido por el Bosque caducifolio de Aysén y el Bosque siempreverde mixto del Baker.

Sobre los pisos vegetacionales descritos por Luebert & Pliscoff (2017), para la cuenca del glaciar Oriental, se identifican tres tipos de pisos, estos están dominados por Matorral caducifolio templado andino de Ñirre (*Nothofagus antártica*), los Bosques caducifolios templado andino de Lenga (*Nothofagus pumilio*) y por último el Herbazal templado andino de *Nassauvia dentata*.

Según el catastro de vegetación de Conaf, para la región de Aysén, se describen a lo menos cinco formaciones vegetales, siendo el Matorral de pradera quien ocupa la mayor extensión sobre la cuenca, mientras que el resto estaría formado por Bosque Nativo Achaparrado, Bosque Nativo Adulto, Renovales y Turbales.

En el texto “*Tendencias de calentamiento en el bosque subantártico patagónico*” de Olivares-Contreras et al. (2019), se analizaron los cambios tras un periodo de 35 años de los bosques de Patagonia, identificando un notable aumento en las formaciones de tipo caducifolio, a consecuencia del incremento en las temperaturas mínimas y a la disminución de las precipitaciones en la zona oriental de Patagonia, sector donde se ubica nuestra área de estudio.

Los registros de fauna se obtuvieron en base al “*Expediente Técnico para la Creación del Bien Nacional Protegido Río Pascua*”, estudio llevado a cabo en la cuenca del río Pascua, por la organización Round River Conservation Studies, en un documento preparado para la Secretaría Regional Ministerial del Ministerio de Bienes Nacionales de la región de Aysén, donde se incluye parte de la cuenca del glaciar Oriental dentro de su zona de visita y registro de fauna.

De los registros, destaca una importante población de Huemules (*Hippocamelus bisulcus*) en las cercanías del Parque Nacional Bernardo O'Higgins, conexo a nuestra área de estudio.

1.4.8 Antecedentes Antrópicos

Los primeros relatos sobre esta área de CHPS fueron escritos por Hans Steffen, científico alemán que recorrió la Patagonia y los CHP; siendo en 1898, durante la época de navidad, que Steffen en su visita, nombró al cauce formado por el drenaje del lago O'Higgins como "Pascua", en honor a la festividad.

Pero no fue hasta 1914, que comenzaron los primeros asentamientos en la zona, siendo el sector de Bajo Pascua, poblado por primera vez en 1967, junto a otros sectores del lago Quetru y alrededores del lago O'Higgins, los lugares que concentraría a la mayoría de los habitantes de la cuenca del denominado río Pascua.

La cuenca del glaciar Oriental, actualmente se encuentra en un estado libre de asentamientos o presencia humana, aunque existen rastros de la quema y tala de bosque, para el uso ganadero de la zona, junto a otros rastros encontrados, como basura y/o árboles talados, dejados por el paso de HidroAysén en el desarrollo de sus estudios de línea base en la periferia del área de estudio.

También es posible encontrar una casa, cercana a la desembocadura del río Brazo Esperanza, perteneciente a una antigua pobladora del sector de Bahía Esperanza, pero que dejó de habitar hace muchos años este lugar.

Se pudo confirmar a través del estudio realizado por Round River Conservation Studies y cartografías provistas por el Instituto de Desarrollo Agropecuario (INDAP) del Ministerio de Agricultura, que una gran parte de la cuenca corresponde a predios de carácter privado y el resto a propiedad fiscal.

Información provista en el Plan Regional de Ordenamiento Territorial (PROT) de la región de Aysén, muestra que el área de estudio forma parte de la Zonificación Regional propuesta en el PROT, específicamente en la Zonificación Terrestre, definido como un "producto" que busca, entre otras cosas:

"... generar, mediante un proceso eminentemente participativo, una visión regional integrada frente a aspectos como la asignación de recursos de fomento e inversión, así como servir de orientación para los instrumentos de planificación territorial

consagrados en la Ley General de Urbanismo y Construcciones a través de la vinculación con el Plan Regional de Desarrollo Urbano, el cual empleó este producto como base.”

Las zonas dentro de las que se enmarca la cuenca del glaciar Oriental cumplen funciones específicas en base a la propuesta de Zonificación Terrestre, estas son:

- A. **Zona de Funciones Exclusivas:** Preservación.
- B. **Zona de Funciones Prioritarias:** Fragilidad Ambiental Sujeta a Estudios.
- C. **Zona de Funciones Preferentes:** Forestal.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Glaciaciones

Las glaciaciones son periodos prolongados de tiempo donde las variables atmosféricas experimentan variaciones debido al descenso de las temperaturas superficiales de la Tierra (Tarbuck & Lutgens, 2005).

En Patagonia las glaciaciones más recientes se dieron en el Holoceno, existiendo dos esquemas propositivos sobre los periodos de duración de estas glaciaciones, siendo Mercer (1965) y Aniya (1995), quienes toman el término “Neoglaciación” propuesto por Porter & Denton (1967) para definir los periodos de tiempo de avance de los glaciares en Patagonia durante el Último Máximo Glacial (UGM).

Mercer propone tres períodos de avance Neoglacial, mientras que Aniya, de acuerdo con las dataciones obtenidas a partir de muestras sedimentológicas de varios complejos morrénicos en valles glaciales entre CHPN y CHPS, propone cuatro períodos de avance Neoglacial.

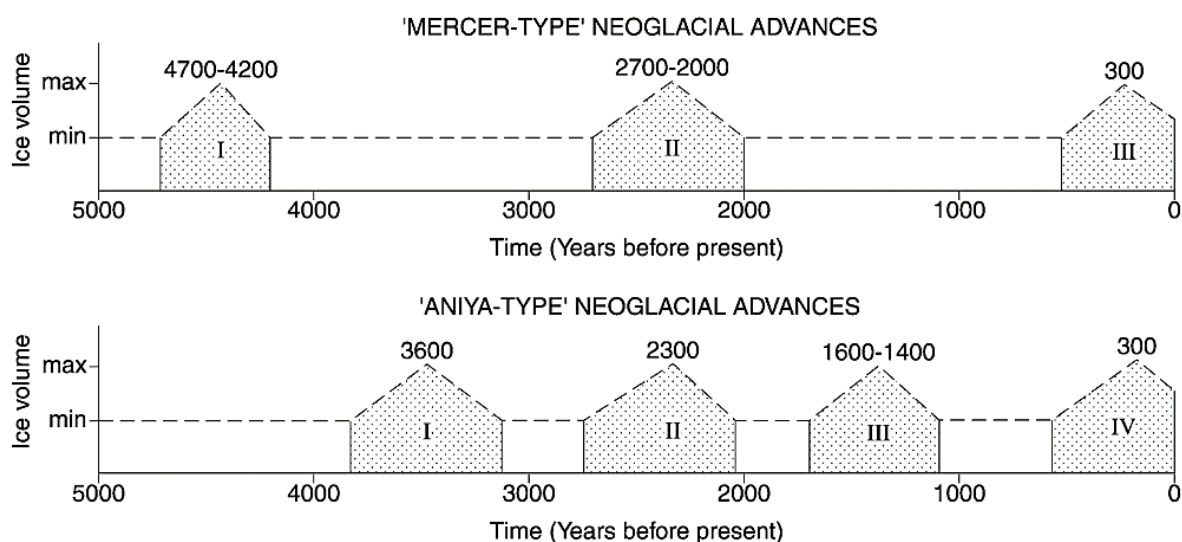


Figura 6 – Propuestas de cronologías neoglacial para fluctuaciones de los glaciares patagónicos en el Holoceno por Mercer (1970, 1976, 1982) y por Aniya (1995, 1996). Las áreas sombreadas en el diagrama representan periodos de expansión glaciár. La cronología ‘tipo Mercer’ indica avances glaciares en aprox. 4700 - 4200 14C años BP, 2700 - 2000 14C años BP y durante la Pequeña Edad de Hielo. La cronología “tipo Aniya” presenta avances glaciares aprox. en 3600 14C años BP, 2300 14C años BP, 1600 - 1400 14C años BP y durante la Pequeña Edad de Hielo (Aniya, 1995).

En el trabajo presentado por N. F. Glasser et al. (2004), se elaboró un resumen cronológico con los períodos de avance Neoglacial presentados por Mercer (1965) y por Aniya (1995), junto a las edades y ubicación de los glaciares que cuentan con registro de avance durante alguno de los periodos de Neoglaciación, esto de acuerdo con las dataciones de carbono-14 obtenida de las muestras de morrenas presentes en los valles y cuenca de cada glaciar.

Chronology	Glacier	Age (author)
Neoglacial Advance I “Tempanos” glaciation	San Rafael Glacier, Hielo Patagónico Norte	Before 3610 ¹⁴ C years BP, possibly as early as 5000 ¹⁴ C years BP (Heusser, 1960; Muller, 1960)
	O’ Higgins Glacier, Hielo Patagónico Sur	4700–3300 ¹⁴ C years BP (Geyh and Röthlisberger, 1986)
	San Lorenzo Este Glacier (satellite glacier to east of Hielo Patagónico Sur)	4590 BP ¹⁴ C years BP (Mercer, 1968)
	Various Precordilleran glaciers (to east of Hielo Patagónico Sur)	4500–4200 ¹⁴ C years BP (Wenzens, 1999)
	Narvaez Glacier (satellite glacier to east of Hielo Patagónico Sur)	4300 ¹⁴ C years BP (Mercer, 1968)
	Ofhidro Sur Glacier, Hielo Patagónico Sur	4060 ¹⁴ C years BP (Mercer, 1970, 1978)
	Tempano Glacier, Hielo Patagónico Sur	4120 ¹⁴ C years BP (Mercer, 1970, 1978)
	Frias Glacier, Hielo Patagónico Sur	3465 ¹⁴ C years BP (Mercer, 1976)
	Tyndall Glacier, Hielo Patagónico Sur	3600 ¹⁴ C years BP (Aniya, 1995)
	Cordillera Darwin, Tierra del Fuego	3060 ¹⁴ C years BP (Kuylenstierna et al., 1996)
Neoglacial Advance II “Pearson I” of Mercer (1965) “Hermanita” of Aniya (1995)	Precordilleran glaciers	3600–3300 ¹⁴ C years BP (Wenzens, 1999)
	Hammick Glacier, Hielo Patagónico Sur	2800 ¹⁴ C years BP (Mercer, 1970)
	Upsala Glacier, Hielo Patagónico Sur	2310 ¹⁴ C years BP (Mercer, 1965)
	Upsala Glacier, Hielo Patagónico Sur	2400–2200 ¹⁴ C years BP (Aniya, 1995)
	Huemul Glacier, Volcan Hudson	2500 ¹⁴ C years BP (Geyh and Röthlisberger, 1986)
Neoglacial Advance III	Tyndall Glacier, Hielo Patagónico Sur	2300 ¹⁴ C years BP (Aniya, 1995)
	Dos Lagos Glacier	1600 ¹⁴ C years BP (Mercer, 1965)
	Upsala Glacier, Hielo Patagónico Sur	1600–900 ¹⁴ C years BP (Aniya, 1995)
	Subantarctic islands	1300–1000 ¹⁴ C years BP (Clapperton and Sugden, 1988)
	Soler Glacier, Hielo Patagónico Norte	1300 ¹⁴ C years BP (Aniya and Naruse, 1999)
Neoglacial Advance IV “Pearson II” of Mercer (1965) “Little Ice Age”	Tyndall Glacier, Hielo Patagónico Sur	1400 ¹⁴ C years BP (Aniya, 1995)
	Soler Glacier, Hielo Patagónico Norte	AD 1220–1340 (Glasser et al., 2002)
	Huemul Glacier, Volcan Hudson	AD 1180–1295 (Röthlisberger, 1987)
	Perro Glacier	AD 1250 (Röthlisberger, 1987)
	Ofhidro Glacier, Hielo Patagónico Sur	AD 1290 (Mercer, 1970)
	Francés Glacier, Torres del Paine	AD 1305 (Röthlisberger, 1987)
	Ameghino Glacier, Hielo Patagónico Sur	AD 1600–1700 (Aniya, 1996)
	Hielo Patagónico Sur	AD 1600–1890 (Marden and Clapperton, 1995)
	Hielo Patagónico Sur	AD 1650 (Heusser and Streeter, 1980)
	Tyndall Glacier, Hielo Patagónico Sur	AD 1700 (Aniya, 1995)
	Soler Glacier, Hielo Patagónico Norte	AD 1730 (Aniya and Naruse, 1999)
	Tempano Glacier, Hielo Patagónico Sur	AD 1750–1800 (Mercer, 1970)

To avoid ambiguity, dates and ages are quoted directly from the literature with no attempt to convert these into calibrated ages. Note that most of these dates are ¹⁴C dates of glacier advances and that most only provide a minimum age for the advance.

Figura 7 – Resumen del avance glaciar identificado al sur de Sudamérica durante el periodo Neoglacial (5.000 ¹⁴C años BP) (N. F. Glasser et al., 2004).

Aniya (2013) presenta una breve revisión de las glaciaciones ocurridas durante el Holoceno en Patagonia, donde analiza y compara los datos presentados por diversos autores acerca de los períodos de avance Neoglacial, para luego proponer un nuevo periodo de Neoglaciación de acuerdo a las nuevas dataciones recopiladas, centrándose nuevamente en el esquema presentado por Mercer (1965), donde interpreta que, la Neoglaciación I se extendió por un prolongado periodo de tiempo, o que esta, en realidad, representa dos Neoglaciaciones. De esta forma, las dataciones obtenidas, parecerían más razonables de entender.

Este cambio implica que el esquema propuesto por Mercer en 1965 pasaría a contar con cuatro Neoglaciaciones, mientras que el esquema de Aniya (2013), quedaría de la siguiente manera:

- A. **Neoglaciación I:** 4500-4000 años BP;
- B. **Neoglaciación II:** 3600-3300 años BP;
- C. **Neoglaciación III:** 2700-2000 años BP;
- D. **Neoglaciación IV:** 1600-900 años BP;
- E. **Neoglaciación V:** Siglos 17-19 (Pequeña Edad de Hielo o PEH).

2.2 Geomorfología Glacial

La geomorfología glacial es una rama de la geomorfología que se enfoca en el estudio de los paisajes y procesos relacionados con la acción de los glaciares y el hielo.

Los glaciares son masas de hielo que se originan en la superficie terrestre por la transformación de la nieve y que se desplazan por la gravedad.

La geomorfología glacial analiza cómo los glaciares erosionan, transportan y depositan materiales, dando lugar a formas y depósitos característicos tanto en la superficie como en el subsuelo (Giles et al., 2017).

Un estudio geomorfológico se basa en el análisis morfométrico y morfológico de una cuenca.

La caracterización morfométrica de una cuenca se define como *“la aplicación de procedimientos que caracterizan los rasgos propios de las cuencas hidrográficas en valores numéricos, los cuales permiten comparar en forma exacta una parte de la superficie terrestre con otra”* (Aparicio, F., 1992, como se citó en Duarte Angarita & Sierra Bernal, 2022).

Mientras que el análisis morfológico se encarga de estudiar las formas del relieve y describir su estructura interna (en el caso que sea posible) y externa en contacto con las perturbaciones y alteraciones del medio ambiente en que se emplaza.

La geomorfología glacial también se interesa por la evolución de los glaciares a lo largo del tiempo, especialmente durante las glaciaciones del Cuaternario, y por su relación con el clima y la tectónica.

Utiliza diversas fuentes de información, como la observación directa, la cartografía, la fotografía aérea, la teledetección, la batimetría, la sismología, la geocronología y la modelización numérica.

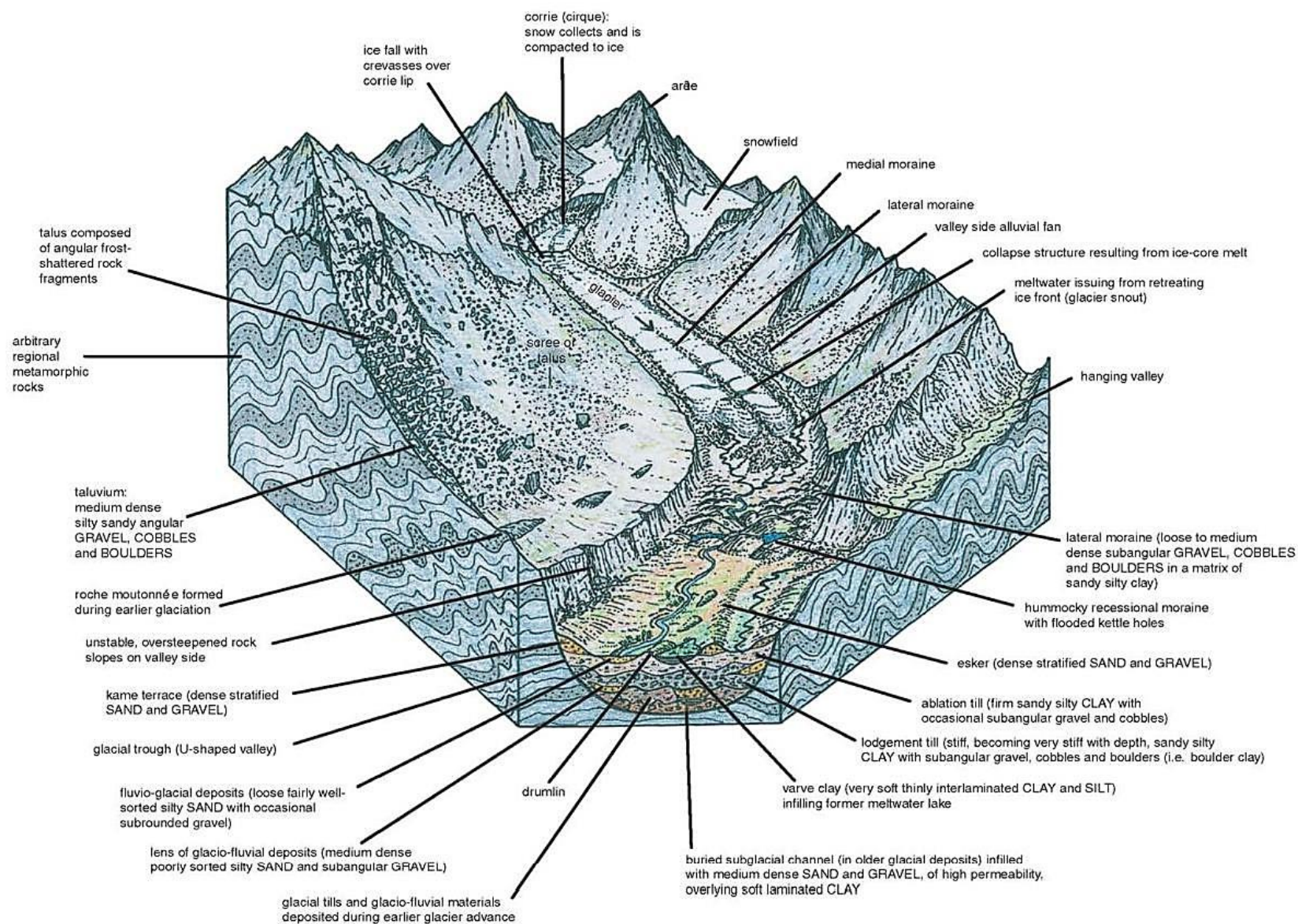


Figura 8 – Modelo geológico conceptual de un valle glacial (Fookes et al., 2007). Extraído de Giles et al. (2017).

2.2.1 Identificación y Caracterización de Geoformas Glaciales

Para reconocer, identificar, caracterizar y confeccionar un mapa con la geomorfología glacial de la cuenca del glaciar Oriental, se utilizó como base el trabajo realizado por Glasser & Jansson (2008), quienes lograron identificar a gran escala, las principales estructuras de origen glacial en Sudamérica (entre las latitudes 38°S y 56°S), elaborando un listado, como se muestra en la Tabla 1, con las geoformas caracterizadas y el criterio utilizado para su identificación.

Además de que, este es el único trabajo que presenta una cartografía geomorfológica glacial que incluya a la cuenca del glaciar Oriental dentro de su área de análisis, logrando incluso identificar a gran escala algunas de las geoformas de origen glacial presentes en el área de estudio.

A grandes rasgos, Glasser & Jansson (2008) lograron identificar tres geoformas asociadas al paso del glaciar Oriental y a la formación del valle glaciofluvial, donde se encontraron líneas de corte o trimlines en las laderas del valle, en la parte media de la cuenca, y sandur o planicie de lavado, en la parte baja de la cuenca, además del glaciar Oriental, como la principal geoforma del área de estudio, junto con ser el agente modelador contemporáneo del relieve y del paisaje en la cuenca.

Geoforma/Rasgo	Criterios de identificación		Posibles errores de identificación	Importancia
	Morfología	Color/Estructura/Textura		
Glaciares contemporáneos y detritos glaciares	Hielo desnudo, nieve y detritos. Estructuras superficiales (e.g. crevasses, foliación) son comunes.	Nieve y hielo aparecen de color blanco a azul claro. Superficie suave o áspera. Los detritos presentan una coloración de gris a negra.	Posible sobre-estimación menor de la extensión glaciar confundida con cubierta de nieve.	Foco para descarga de hielo desde los campos de hielo contemporáneos.
Rocas del basamento erosionadas por hielo (Ice-scoured bedrock)	Exposiciones de amplias extensiones de basamento rocoso desnudo o levemente vegetado. Numerosas cuencas de pequeños lagos y diaclasas abiertas visibles.	Gris a rosado claro cuando hay cubierta vegetal presente. Estructuras y fallas del basamento rocoso están presentes a menudo. La superficie superior presenta, a menudo, una textura áspera e irregular.	Posible sub-estimación donde el basamento rocoso esté oscurecido por una cubierta vegetal.	Evidencia de áreas extensas de hielo anterior y su punto de fusión por presión.
Lineas de corte (Trimlines)	Lineas sub-horizontales en los flancos de los valles separando áreas de terreno vegetado y no-vegetado, o áreas cubiertas por diferentes tipos de vegetación.	Cambio altitudinal abrupto en el color y textura de la superficie debido cambios de la cubierta vegetal.	Confusión posible, pero poco probable, con otras unidades horizontales a sub-horizontales como costas de lagos glaciares.	Dimensiones verticales anteriores de los glaciares. posible límite terminal englacial
Lineamientos glaciares	Rasgos paralelos indicando la dirección del flujo de hielo. Formado por la erosión glaciar o por acumulación de sedimentos sobre el basamento rocoso.	Cambios de la estructura superficial en el basamento rocoso en comparación al terreno circundante.	Posible sub-estimación en áreas con cubierta detrítica fina.	Muestra la dirección del flujo de hielo y puede indicar altas velocidades del hielo anterior, cuando están altamente atenuadas
Morrenas y complejos morrénicos	Crestas prominentes de relieve positivo que cortan los valles, únicas o múltiples. Lineares, curvas, sinuosas o acerradas en vista de planta. Pueden ocurrir como morrenas únicas o en sistemas morrénicos complejos. A menudo asociadas con otros rasgos marginales al hielo como los canales de agua de deshielo, geoformas en contacto con el hielo y sandur.	Sombreado debido a cambios en la altura o relieve relativo. Cambio de color por suelos diferentes y cubierta vegetal, en comparación al terreno circundante.	Confusión posible, pero poco probable, con las líneas de corte, donde las morrenas tienen baja altura relativa. Posible confusión con las líneas de costa alrededor de los márgenes de lagos y en áreas costeras. Posible confusión con deslizamientos de tierra bajo el Plateaux Volcánico.	Las morrenas marcan la posición terminal anterior de los glaciares.
Sandur/sedimento fluvial	Acumulación de sedimento en el fondo de los valles, que está comúnmente diseccionada por un patrón de flujo trenzado.	Áreas planas de coloración rojiza clara con un gris medio donde la cubierta vegetal es fina. Cicatrices erosivas y límites agudos con el terreno cercano.	Confusión posible, pero poco probable, con deltas o depósitos de contacto con hielo.	Marcan rutas de drenaje mayores de glaciares contemporáneos y arroyos alimentados por glaciares.
Borde de terraza en sandur	Quiebre de pendiente en depósitos de sandur. Terrazas de niveles pueden gradar a la misma elevación que las morrenas.	Los bordes de las terrazas tienen límites agudos. Quiebre obvio de pendiente con el terreno circundante.	Posible, pero poco probable, confusión con líneas de costa cercanas a lagos.	Terrazas individuales indican eventos de rebaje (down-cutting) y agradacionales.
Deltas o depósitos de contacto con hielo (Ice-contact deposits)	Acumulaciones de sedimento de techo plano sobre el suelo de valle actual, comúnmente con un frente deltaico empinado.	Textura superficial homogénea con superficies superiores planas, cicatrices erosionales y el terreno circundante.	Posible, pero poco probable, confusión con sandur y abanicos aluviales.	Sedimentos depositados por flujos de deshielo drenando en valles tributarios hacia/en contra del hielo glaciar en valles principales. Indican el grosor y extensión del hielo en el valle principal. Muestra los niveles de lago glaciar anteriores.
Abanicos aluviales	Abanicos sub-horizontales en los flancos de los valles. Típicamente alimentados por canales de deshielo o por un arroyo.	Acumulación en forma de abanico con límites agudos con el terreno debido al cambio en la cubierta vegetal circundante. Patrón de arroyos trenzados en la superficie superior.	Posible mal interpretación como delta fósil o un depósito de contacto con hielo.	Retrabajo del material no-consolidado por canales de deshielo contemporáneos y arroyos.
Modificado de Glasser et al. (2008)				

Geoforma/Rasgo	Criterios de identificación		Posibles errores de identificación	Importancia
	Morfología	Color/Estructura/Textura		
Volcanes y conos de ceniza	Cumbres conicas aisladas asociadas con volcanismo anterior o contemporáneo.	Los volcanes ascienden de manera aguda sobre el terreno circundante, están cubiertos por nieve o hielo y contienen cráteres superficiales abiertos.	Posible, pero poco probable, confusión con montañas no-volcánicas.	Indican volcanismo anterior o contemporáneo.
Líneas de orilla (Shorelines)	Quiebres de pendiente paralelos o subparalelos a las líneas de costa en áreas costeras (líneas de orilla marinas) o alrededor de lagos (líneas de orilla lacustres).	Sombreado debido al cambio de altura o del relieve relativo. Cambios en la coloración si es que las anteriores líneas de costa se encuentran vegetadas. Muchas líneas de orilla reflejan la forma de líneas de costa (coastlines) existentes o márgenes de lagos.	Posible confusión con morrenas, especialmente cerca de lagos mayores donde tanto líneas de orilla como morrenas puedan estar presentes.	Indican niveles anteriores de lago o mar. Algunas líneas de orilla de lagos indican la presencia de lagos anteriores represados por hielo.
Atisbos de Inundación por explosión de lago glaciar (IELG) (Glacial Lake Outburst Flood: GLOF)	Acumulaciones prominentes de arena y grava, a menudo en pendientes empinadas y localizados bajo glaciares contemporáneos o morrenas rotas (breached).	Acumulación de sedimento con límites agudos con el terreno debido al cambio de la cubierta vegetal circundante. A menudo localizada bajo una morrena rota o un lago drenado.	Posible, pero poco probable, confusión con sandur o abanicos aluviales.	Fallo catastrófico de lagos represados por morrenas o glaciares.
Circos	Grandes huecos con forma de anfiteatro en los flancos de montañas o incididos en los bordes de meseta.	Límites agudos con el terreno circundante, incluyendo acantilados.	Posible, pero poco probable, confusión con remosiones en masa y cicatrices de deslizamientos de tierra especialmente bajo el Plateaux Volcánico.	Indican la presencia de montañas sometidas a glaciación localizada o restringida.
Canales de agua de deshielo	Rasgos lineares con inceptión y término abruptos. A menudo no contienen drenaje contemporáneo. Los canales pueden seguir o cortar a través de la dirección de la pendiente.	Bordes de canal bien definidos y límites agudos con el terreno circundante. Sombreado debido al cambio de altura o del relieve relativo. Los pisos de canales pueden tener un colorido diferente respecto del terreno circundante.	Posible, pero poco probable, confusión con rutas de drenaje contemporáneas.	Indican grandes volúmenes de producción de agua de deshielo. Los canales pueden indicar la posición anterior del margen glaciar, especialmente al ser visto en asociación con sandur y morrenas.
Lagos	Grandes cuerpos de agua fresca dentro de cuencas cerradas.	Los lagos aparecen como azul, negro y otros colores oscuros debido a la alta reflectancia. Límites agudos con el terreno circundante. Variedad de formas posibles.	Áreas sombreadas dentro de regiones de alto relieve relativo o sombras de nubes que pueden ser confundidas por lagos.	Los lagos indican drenaje impedido. Una alta frecuencia de lagos puede indicar presencia de cuencas de roca formadas por sobreprofundización glacial.
Bordes de meseta (Plateau edges)	Quiebre en la pendiente alrededor de los bordes de la meseta; particularmente común cerca de plateaux de basalto.	Los bordes de meseta tienen límites agudo. Quiebre de pendiente obvio con el terreno circundante.	-	¿Indica retroceso de los escarpes?
Límite de la deriva	Líneas de pendiente gentil o sub-horizontal en los flancos de los valles separando diferentes tipos de deriva, o separando pendientes cubiertas por deriva del basamento rocoso.	Cambios agudos verticales u horizontales en la coloración y texturas superficiales debido a cambios en la cubierta vegetal o cambio de las pendientes cubiertas por la deriva hacia basamento rocoso.	Posible, pero poco probable, confusión con otros rasgos sub-horizontales u horizontales como líneas de orilla de lago glaciar.	Anteriores dimensiones verticales y horizontales de los glaciares.
Modificado de Glasser et al. (2008)				

Tabla 1 – Geoformas identificadas utilizando imágenes de satélite y los criterios usados para su identificación. Extraído de Pino Dahmen (2022). Modificado de Glasser & Jansson (2008).

Este trabajo fue complementado con el texto presentado por Chandler et al. (2018), titulado “*Cartografía geomorfológica glacial: Una revisión de los enfoques y marcos para las buenas prácticas*”. Este ayudó a potenciar de buena manera la caracterización y digitalización de las geoformas identificadas en este estudio.

Este distingue dos metodologías o flujos de trabajo que reconocen las diversas formas de acercamiento normalmente usados en el mapeo de las geoformas producidas por las masas de hielo glaciar:

- A. Cartografiar las huellas geomorfológicas de los mantos de hielo mediante un enfoque combinado de teledetección, con algunas comprobaciones sobre el terreno (cuando sea posible);
- B. Cartografiar las huellas geomorfológicas de las masas de hielo alpinas y de tipo meseta (glaciar de circo, glaciar de valle, campo de hielo y casquete de hielo) mediante la teledetección y una cartografía de campo considerable.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

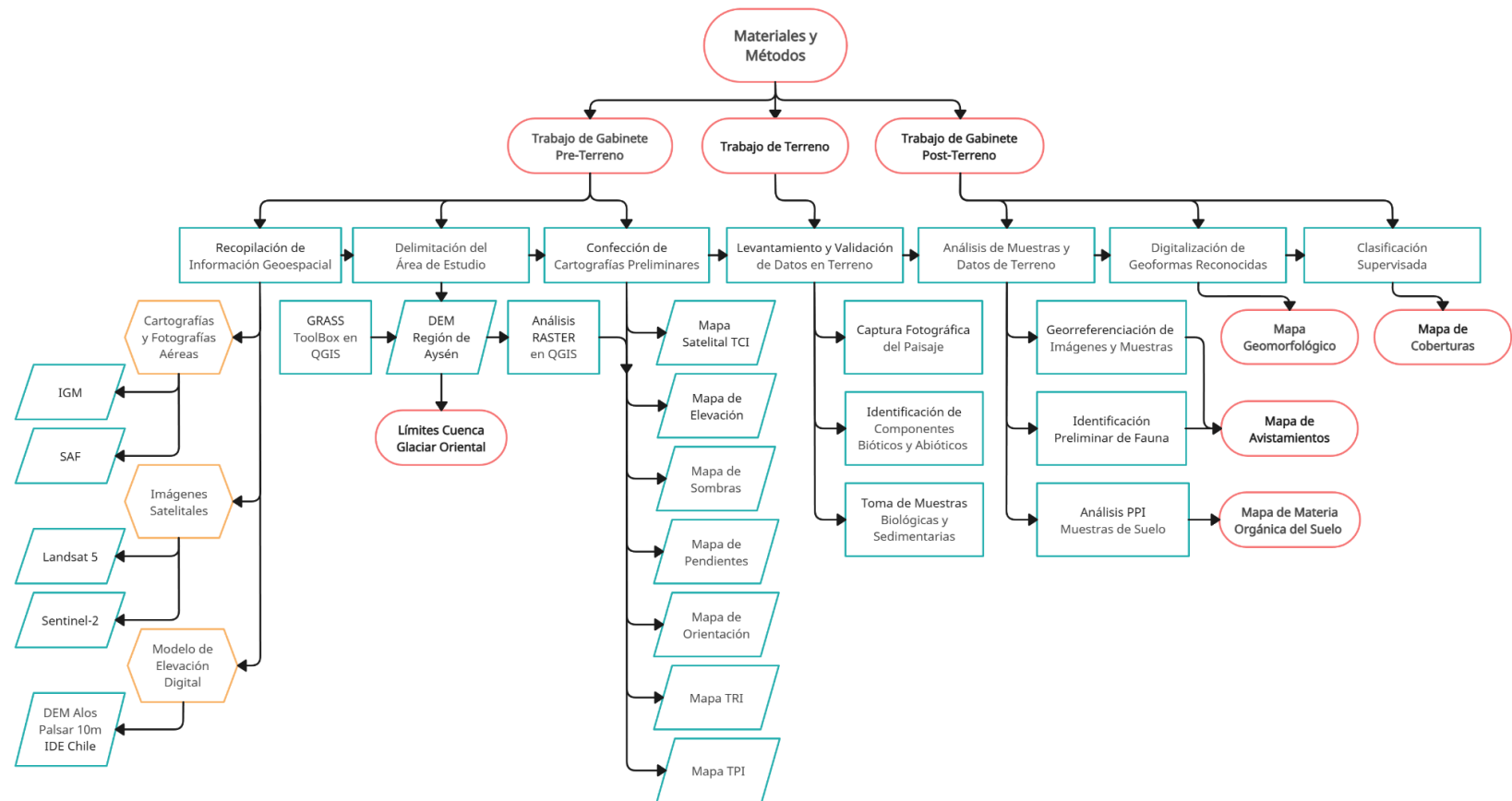


Figura 9 – Diagrama de Flujo de los Materiales y Métodos. Elaboración propia.

3.1 Área de Estudio

La cuenca del glaciar Oriental se localiza al sur de la región de Aysén, dentro de los límites político-administrativos de la provincia de Capitán Prat, en la comuna de O'Higgins; emplazada en la zona trasandina oriental, al noreste de CHPS, en las latitudes 48°S y 73°O.

Posee una altitud que sobrepasa los 250 m s.n.m., pasando por encima de los 3.155 m s.n.m. en su cota más alta. Cubre un área de 172 km² aproximadamente, y posee una longitud cercana a los 20 km².

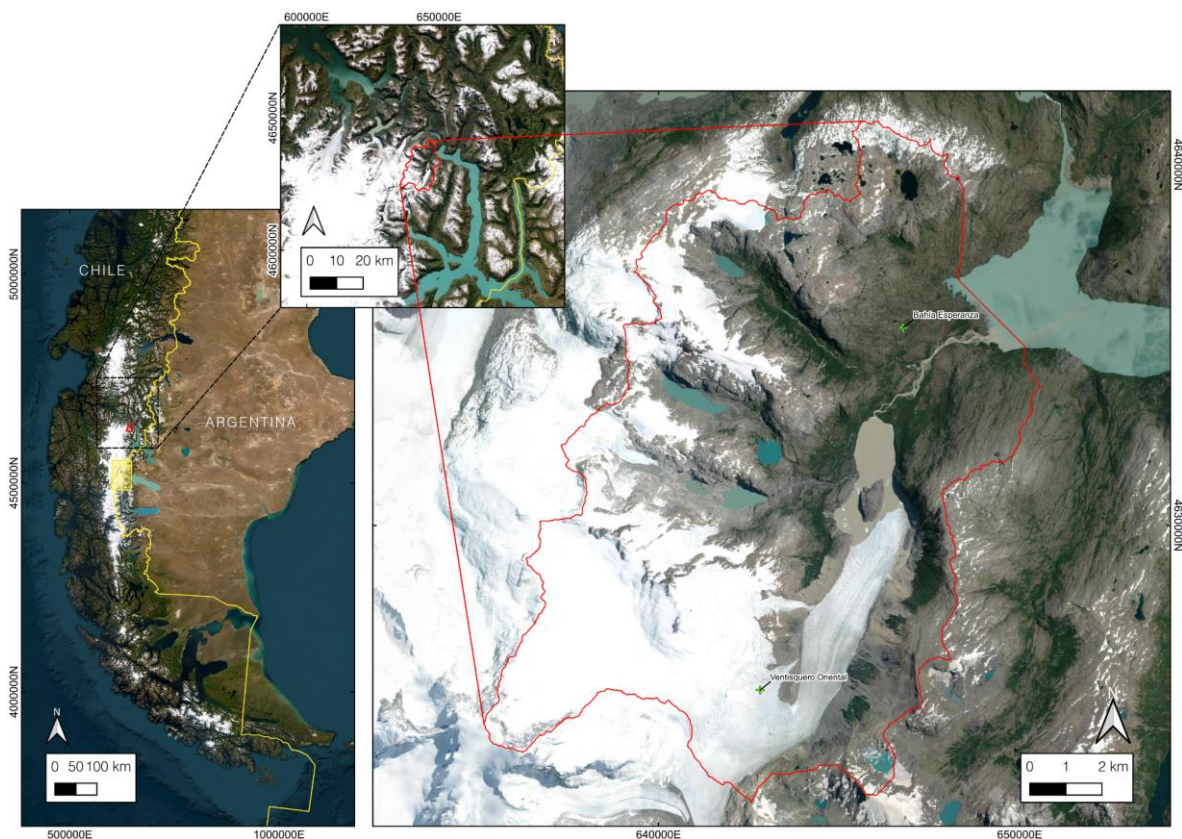


Figura 10 – Vista general de Patagonia y ubicación del área de estudio (límites topográficos de la cuenca del glaciar Oriental, en CHPS, en base a la información obtenida a través del DEM de la región de Aysén). Elaboración propia.

3.2 Trabajo de Gabinete Pre-Terreno

3.2.1 Recopilación de Información Geoespacial

Para la obtención de información geoespacial de la cuenca del glaciar Oriental, se visitó el Instituto Geográfico Militar (IGM) del Ejército de Chile, y el Servicio Aerofotogramétrico (SAF) de la Fuerza Aérea de Chile, para la compra de cartografías y fotografías aéreas históricas del área de estudio.

Desde el IGM se obtuvieron las cartografías denominadas como “*Ventisquero Gabriel Quiroz o Pascua*” y “*Río Ventisquero*”, correspondientes a las hojas J-111 ($48^{\circ} 15' - 73^{\circ} 00'$) y J-112 ($48^{\circ} 15' - 72^{\circ} 40'$), ambas proyectadas a escala 1:50.000.

Desde el SAF se rescataron dos fotografías aéreas históricas (Proyecto CORFO Chile 60; SAF 79), denominadas como “6683” y “6685” (Fig. 11), tomadas el año 1979.

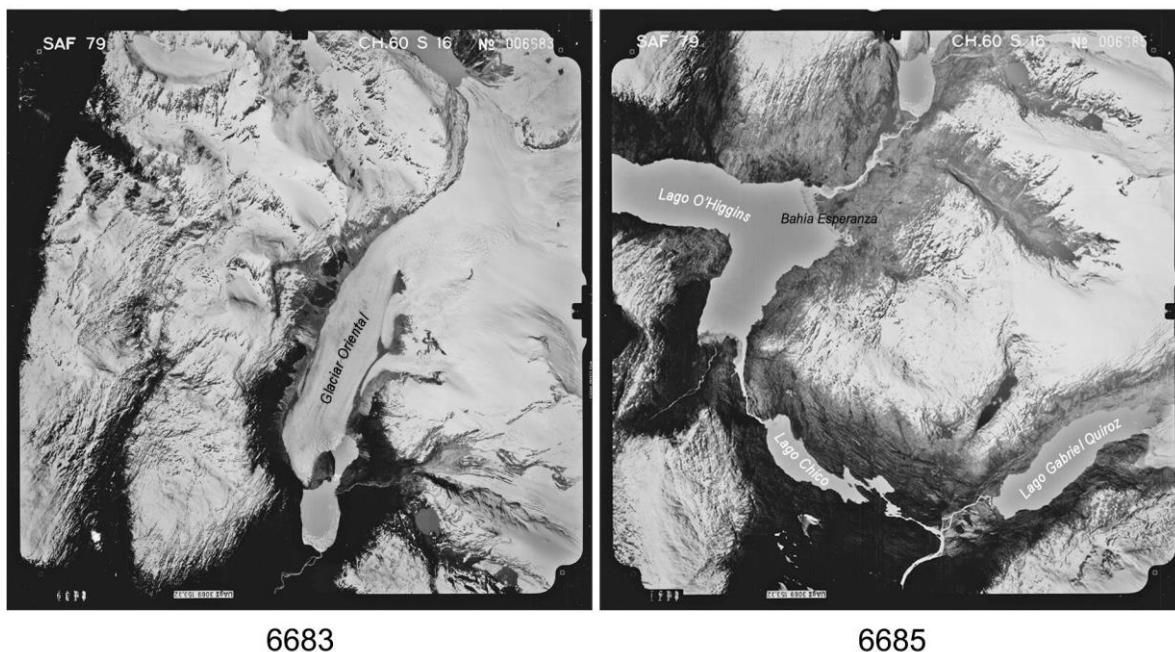


Figura 11 – Fotografías aéreas Proyecto CORFO Chile 60; SAF 79, capturadas en el paso del vuelo sobre el glaciar Oriental (6683) y por su paso sobre el sector de Bahía Esperanza y el desagüe del Lago O'Higgins (6685). Fuente: SAF, 1979.

Lamentablemente, debido a la escala en la que fueron capturadas las fotografías aéreas del SAF (escala 1:60.000), y al igual que las cartografías del IGM, estas no superponen la totalidad del área de estudio por si solas, lo que suscitó la necesidad de unir digitalmente ambas fotografías y ambo material cartográfico

Esto se resolvió mediante las herramientas *Georreferenciador*, *Clip* y *Combinar*, del software de libre acceso QGIS (versión 3.28.1-Firenze), el que derivó en una imagen casi completa de la cuenca del glaciar Oriental (Fig. 12), siendo este el registro aéreo más antiguo (i.e.1979) que se tenga de esta área en estudio.

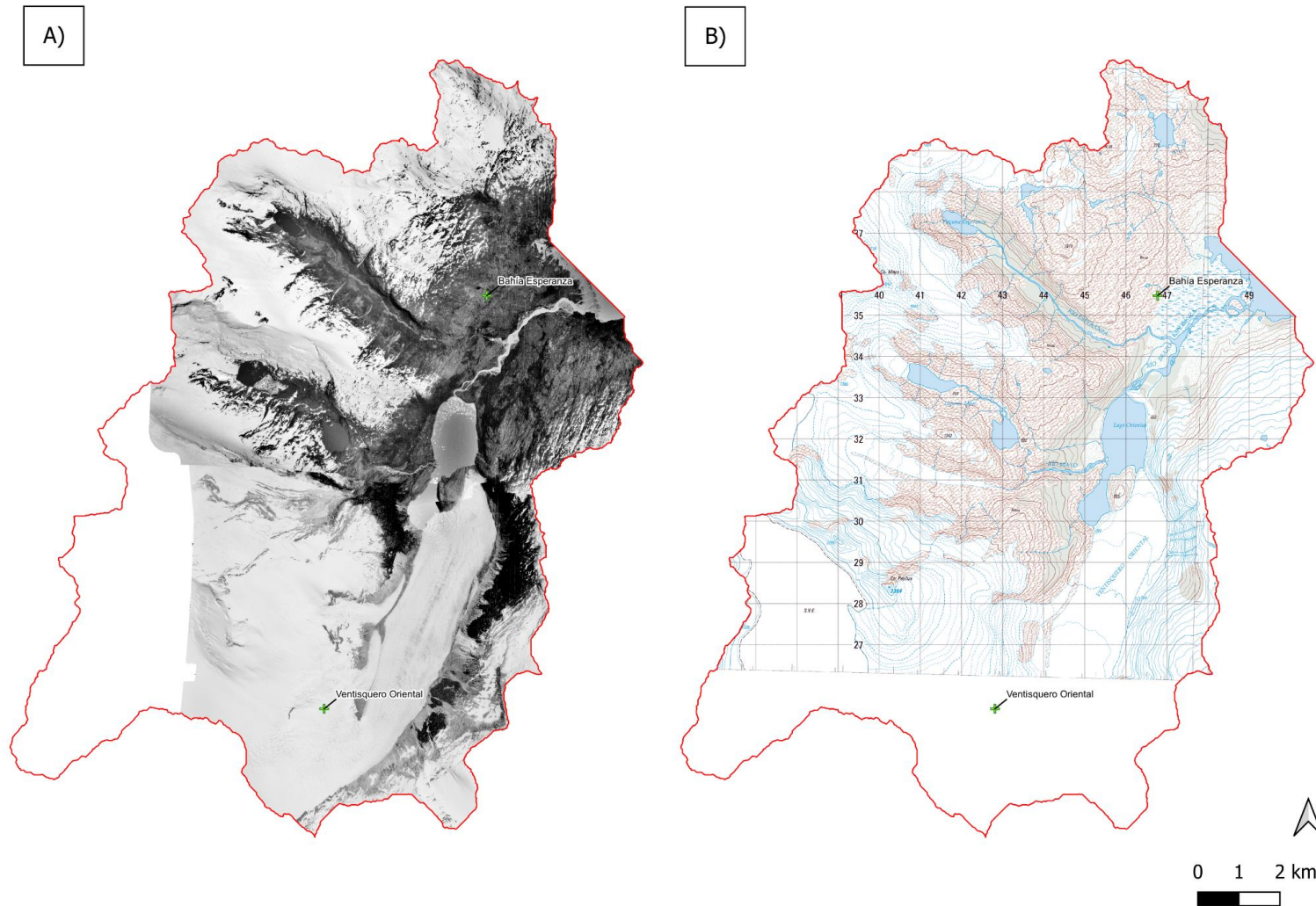


Figura 12 – Mosaico digital de A) fotografías aéreas históricas “6683” y “6685”, del SAF; y mosaico digital B) confeccionado de las cartografías “*Ventisquero Gabriel Quiroz o Pascua*” y “*Río Ventisquero*”, del IGM; ajustado a los límites topográficos de la cuenca del glaciar Oriental. El área en blanco representa las zonas sin información fotográfica (A) o cartográfica (B) para los datos presentados. Elaboración propia.

Las cartografías y fotografías aéreas fueron complementadas con la obtención de imágenes satelitales de alta resolución Landsat 5 (TM) y Sentinel-2, más un Modelo de Elevación Digital (DEM) (Tabla 2) de la región de Aysén, entregado por la Infraestructura de Datos Geoespaciales de Chile (IDE), disponible en su página web (<http://www.ide.cl>).

Se decidió utilizar este modelo de elevación (DEM ALOS-PALSAR), por ser de libre acceso, siendo distribuido ampliamente por organismos e instituciones públicas del Estado (e.g. IDE); además, cuenta con una resolución espacial de 12.5 metros por píxel, suficiente para los fines metodológicos y los objetivos de esta investigación.

Satélite	Sensor	Resolución Espacial	Resolución Temporal	Fecha de Captura
ALOS (DEM)	PALSAR	12.5 m x píxel	45 días	Entre 16 de mayo de 2006 y 22 de abril de 2011 (periodo de operación del satélite).

Tabla 2 – Modelo de Elevación Digital (DEM) ALOS-PALSAR, seleccionado para el análisis geomorfológico de la cuenca del glaciar Oriental.

Se decidió utilizar las imágenes del satélite Landsat 5 (TM) debido a la disponibilidad de escenas del área de estudio desde el año 1984, lo que permitió comparar mediante fotointerpretación y el cálculo de índices espectrales, los principales cambios en la composición del paisaje, desde el año de su captura, al presente de esta investigación.

Satélite	Sensor	Resolución Espacial	Resolución Temporal	Fecha de Captura
Landsat 5	Thematic Mapper (TM)	30 m x píxel	16 días	26/12/1984

Tabla 3 – Imagen satelital Landsat 5 (TM) seleccionada para el análisis multitemporal del área de estudio y para el cálculo de índices espectrales.

La elección de las imágenes satelitales Sentinel-2, se hizo luego de un análisis simple del porcentaje de píxeles nublados específicos del gránulo, presente en cada escena de la colección de imágenes *“Harmonized Sentinel-2 MSI: MultiSpectral Instrument, Level-2A”*, disponible en la plataforma de Google Earth Engine (GEE) (<https://earthengine.google.com/>).

Para nuestra área de estudio, se trabajó sólo con aquellas escenas que tuvieran un porcentaje menor al 10% de píxeles con nubes (Fig. 13), tomado de los metadatos originales de cada imagen (i.e. *“system:time_start”* y *“CLOUDY_PIXEL_PERCENTAGE”*, en las propiedades de la imagen), mediante el editor de códigos de GEE (<https://code.earthengine.google.com/>).

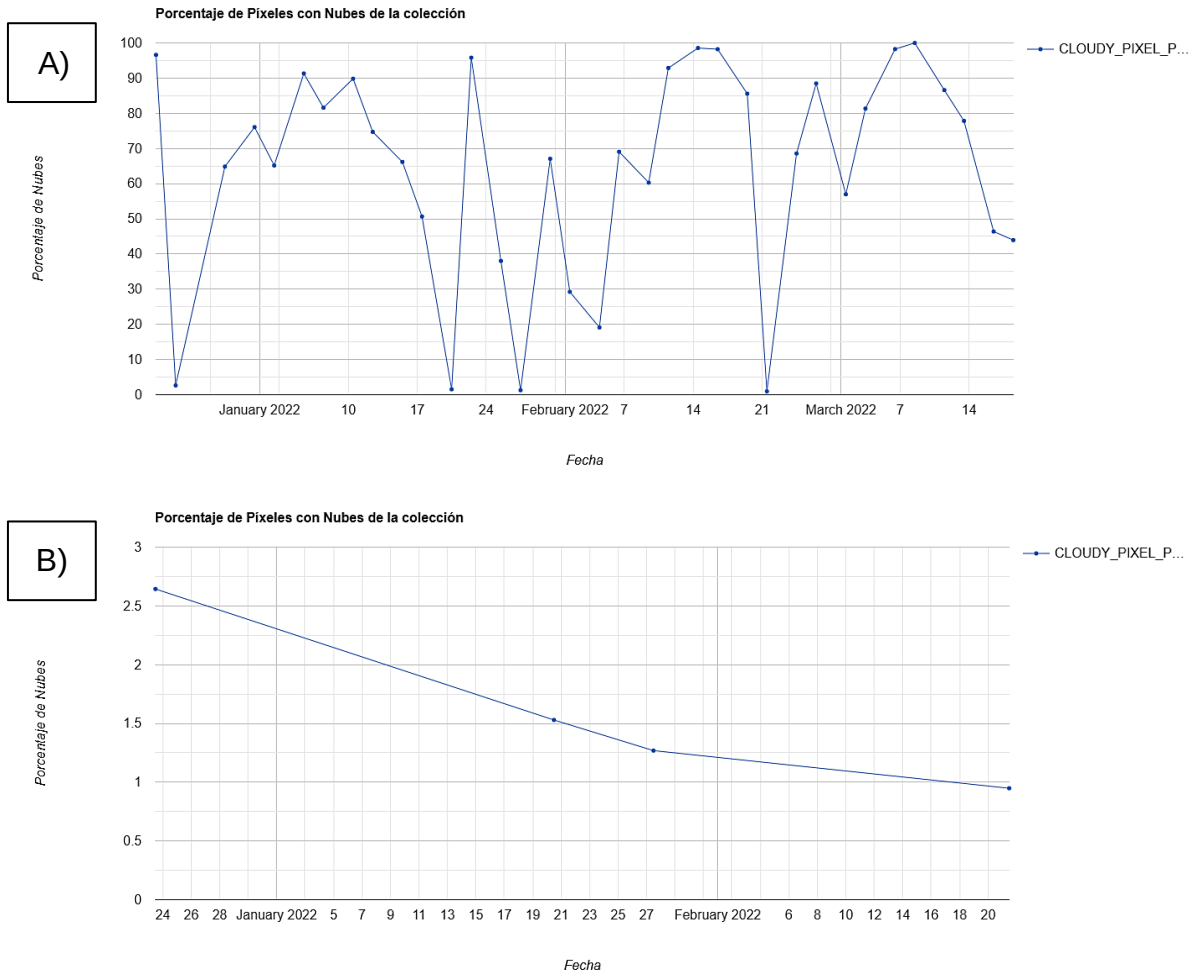


Figura 13 – Porcentaje de píxeles con nubes de la colección de imágenes satelitales Sentinel-2 entre los meses de Diciembre (2021) y Marzo (2022), (A) previo al filtro de nubes y (B) posterior al filtro de nubes aplicado a la colección. Elaboración propia.

Una vez aplicado el filtro para reducir el número de imágenes en relación con el porcentaje de píxeles con nubes de la colección de imágenes de nuestra área de estudio, el número de imágenes satelitales pasó de 35 escenas con valores muy altos de porcentaje de nubes (sobre 20%), a tan solo 4 escenas con valores bajo al 10% de píxeles con nubes por escena (i.e. bajo 3%).

Satélite	Sensor	Resolución Espacial	Resolución Temporal	Fecha de Captura
Sentinel-2B	MSI	10 m x píxel	10 días	23/12/2021
Sentinel-2A	MSI	10 m x píxel	10 días	20/01/2022
Sentinel-2A	MSI	10 m x píxel	10 días	27/01/2022
Sentinel-2B	MSI	10 m x píxel	10 días	21/02/2022

Tabla 4 – Imágenes satelitales Sentinel-2 seleccionadas para el análisis multitemporal del área de estudio y para el cálculo de índices espectrales.

El material, en su conjunto, permitió generar una aproximación preliminar a la cuenca del glaciar Oriental en su estado “pasado” y “presente”, logrando identificar las primeras estructuras y geoformas asociadas a procesos de origen glacial, como también se identificaron los cambios en la composición del paisaje a través de un análisis multitemporal de la cuenca; lo que ayudó a establecer zonas de interés para la planificación del trabajo efectivo de reconocimiento en terreno.

3.2.2 Delimitación del Área de Estudio

La delimitación del área de estudio se realizó utilizando la información del DEM de la región de Aysén y el software QGIS, mediante el cual, y en conjunto a las herramientas de geoprocesamiento de GRASS (Geographic Resources Analysis Support System; incluidas dentro del software QGIS), se logró delimitar la cuenca del glaciar Oriental y extraer la red hidrográfica de esta, ejecutando la siguiente secuencia de herramientas de hidrología de GRASS en QGIS (Fig. 14):

A. Processing Toolbox > GRASS > Rasters (r.*) >

- a. **r.fill.dir**
- b. **r.watershed**
- c. **r.water.outlet**
- d. **r.to.vect**
- e. **r.stream.extract**

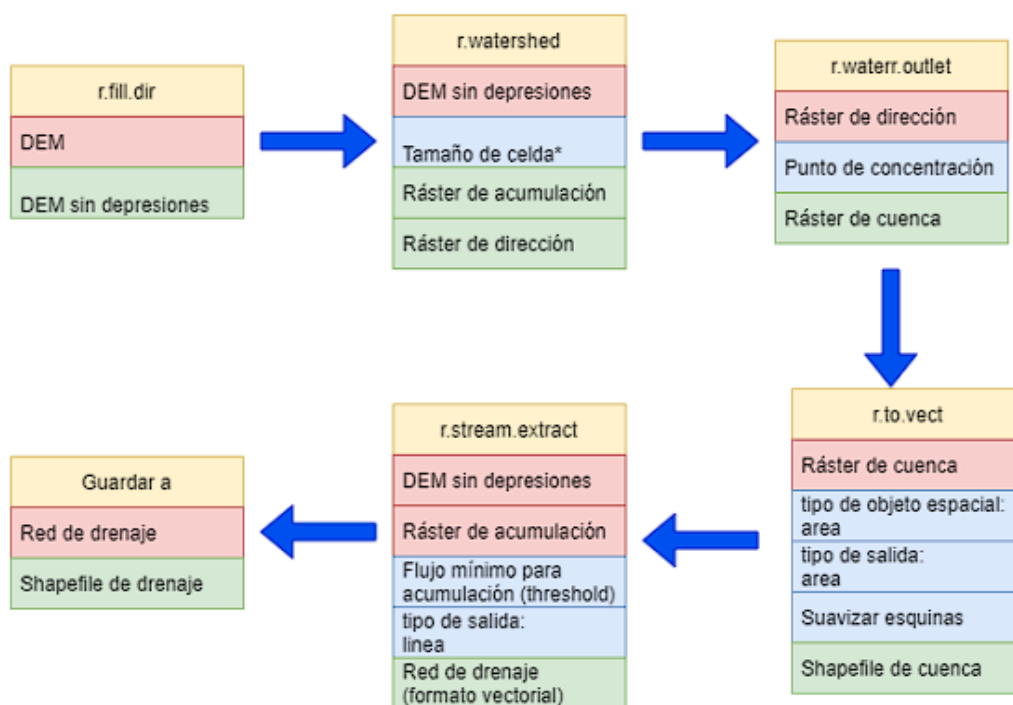


Figura 14 – Secuencia de herramientas de GRASS en QGIS para la delimitación de una cuenca hidrográfica. Modificado de Duarte Angarita & Sierra Bernal (2022).

3.3.1 Morfometría de la Cuenca

La morfometría de la cuenca se consiguió utilizando el software QGIS, mediante la calculadora de campos, en conjunto a las herramientas de análisis ráster y vectorial, sobre la información adquirida a través del DEM de la cuenca, la red de drenaje y el polígono con los límites de la cuenca, obtenido de la delimitación del área de estudio.

La definición sobre los conceptos de morfometría y su aplicación en QGIS, se obtuvieron de los trabajos presentados por Huamani De la Cruz & Lazo Colqui (2020), Alves et al. (2021) y Ortiz Revelo (2022).

Los parámetros y las características morfométricas analizadas se enlistan a continuación:

A. Parámetros físicos de la cuenca

- a. Área (km²)
- b. Perímetro (km)
- c. Longitud (km)
- d. Ancho máximo (km)

B. Características del relieve de la cuenca

- a. Altitud mínima (msnm)
- b. Altitud máxima (msnm)
- c. Altitud media (msnm)
- d. Pendiente media (porcentaje)

C. Parámetros de forma de la cuenca

- a. Índice de Compacidad o Índice de Gravelius (adimensional)
- b. Factor de Forma (adimensional)

D. Características del cauce principal de la cuenca

- a. Longitud (km)
- b. Longitud hasta la divisoria (km)
- c. Cota mayor (msnm)
- d. Cota menor (msnm)
- e. Pendiente media (porcentaje)

E. Características de la red de drenaje

- a. Longitud total de la red de drenaje (km)
- b. Densidad de drenaje (km/km²)

El Índice de Compacidad o Índice de Gravelius, es la razón entre el perímetro y el área de la cuenca, dando como resultado valores que nunca serán inferiores a 1 (Fig. 15); mientras su grado de aproximación sea más cercano a 1 indicará una tendencia a concentrar grandes volúmenes de agua de escurrimientos (Meza Aliaga et al., 2014).

Kc	Clasificación	Interpretación Ambiental
1 a 1,25	Casi redonda a oval-redonda	Alta tendencia a inundaciones
1,25 a 1,5	Oval redonda a oval-alargada	Mediana tendencia a inundaciones
1,5 a 1,75	Oval alargada a alargada	Baja tendencia a la inundación
> 1,75	Alargada	Cuencas propensas a la conservación

Figura 15 – Clasificación de los valores de compacidad. Extraído de Lombaida & Israel (2020).

Por otro lado, el Factor de Forma de Horton, es la razón entre el área de la cuenca y el cuadrado de la longitud máxima o longitud axial de la misma (Fig. 16) (Lombaida & Israel, 2020).

Rango de Valores	Forma de la Cuenca
< 0,22	Muy Alargada
0,22 – 0,30	Alargada
0,3 – 0,37	Ligeramente alargada
0,37 – 0,45	Ni alargada ni ensanchada
0,45 – 0,60	Ligeramente ensanchada
0,60 – 0,80	Ensanchada
0,80 – 1,12	Muy Ensanchada
> 1,20	Rodeando el desagüe

Figura 16 – Clasificación de forma de la cuenca, con relación al rango de valores del factor de forma de Horton (Lombaida & Israel, 2020).

3.3.2 Morfología de la Cuenca

El análisis morfológico inicial de la cuenca se realizó mediante las herramientas preestablecidas de análisis ráster en QGIS, utilizando el DEM de la cuenca, se obtuvieron: mapas de Sombras, Pendientes, Relieve, Orientación, Índice de Irregularidad del Terreno (TRI) e Índice de Posición Topográfica (TPI) (Fig. 17) y Curvas de Nivel del área de estudio.

El Índice de Irregularidad del Terreno (TRI) y el Índice de Posición Topográfica (TPI) son medidas cuantitativas de la heterogeneidad del terreno.

Ambos se calculan para cada ubicación, resumiendo el cambio de elevación dentro de la cuadrícula de 3x3 píxeles. Cada píxel contiene la diferencia en elevación desde una celda central y sus 8 celdas de alrededor (QGIS Documentation v: 3.28, 2023).

El resultado se da como porcentajes, los valores negativos corresponden a condiciones de flujo convergentes, positivas a divergentes. Menos 100 sería como la punta de un cono, más 100 un hoyo, y 0 una pendiente pareja.

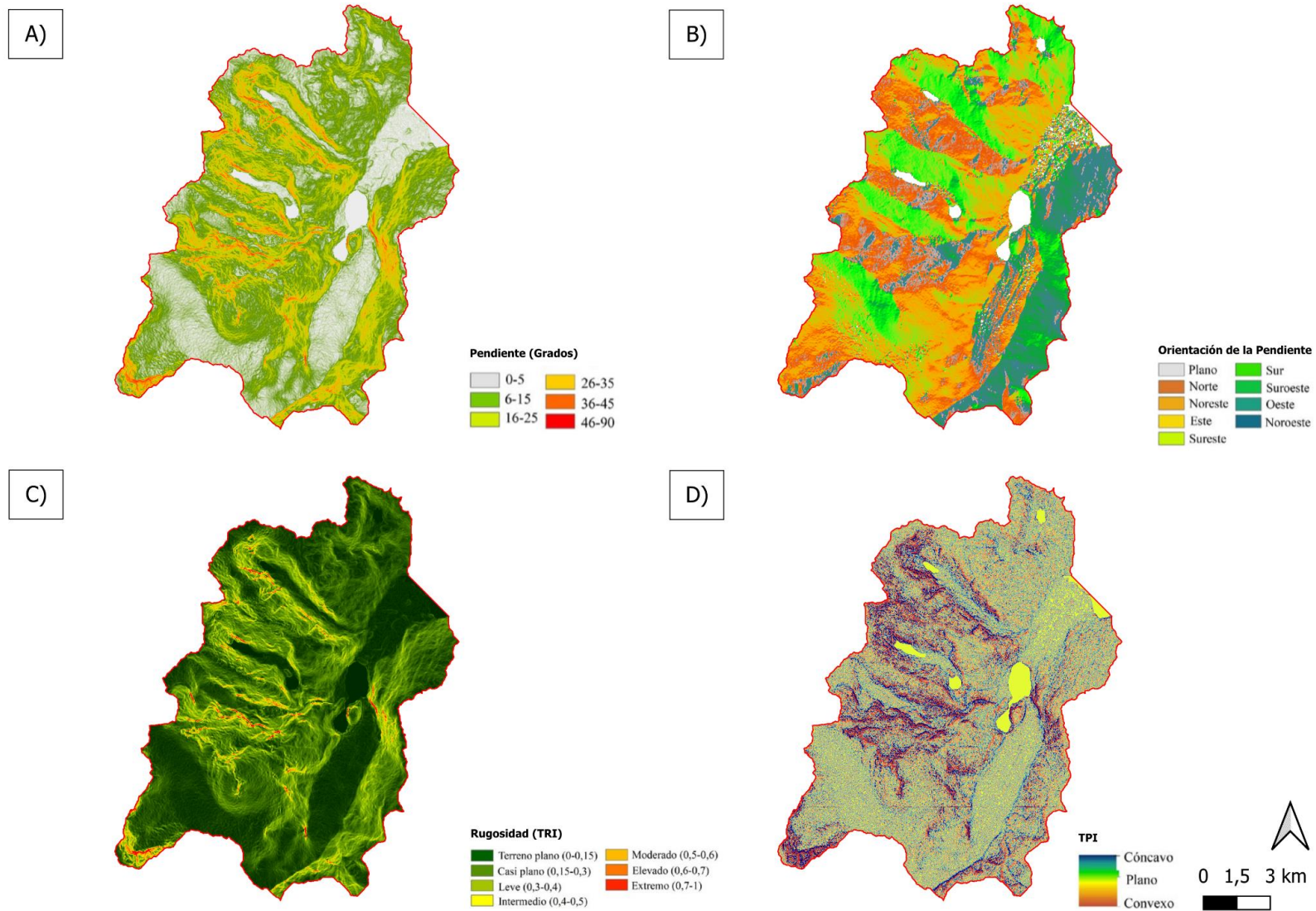


Figura 17 – Representación de modelos de terreno y clasificación de los valores de A) Pendiente B) Orientación de Laderas C) Índice de Irregularidad del Terreno y D) Índice de Posición Topográfica; obtenidos del DEM del área de estudio. Elaboración propia.

La composición y combinación de los modelos de terreno, elaborados con información raster de la cuenca, permitió identificar mediante fotointerpretación las primeras estructuras y geoformas de origen glacial, donde destaca una secuencia de complejos morrénicos, los cuales indicarían la extensión que mantuvo el frente de la lengua de desbordamiento del glaciar Oriental, durante uno o varios eventos de actividad Neoglacial ocurridos en CHP.

De este mismo modo, se detectó la presencia de morrenas laterales cercanas a la extensión actual de la lengua del glaciar Oriental, otras morrenas de fondo donde los registros más antiguos muestran la presencia de cuerpos de hielo, donde hoy se emplazan lagos de fusión glacial; además de otras formaciones sedimentarias, donde se logró confirmar la existencia de un sandur o planicie de lavado (Fig. 19), según lo cartografiarían Glasser & Jansson (2008), y las líneas de corte o trimlines, también visibles en terreno tanto como en las imágenes de satélite.

3.2.3 Confección Preliminar de Cartografías

La confección preliminar de cartografías tuvo como objetivo principal elaborar material que facilitara el trabajo efectivo en terreno.

Esto, por ejemplo, para establecer la ubicación espacial de las estructuras de origen glacial, previamente identificadas en el análisis morfológico de la cuenca.

Mediante el uso de un mapa en base a imágenes de alta resolución (Fig. 18), en conjunto a mapas de elevación y pendiente (Fig. 19), se lograron establecer las mejores rutas de reconocimiento en terreno, en relación con las variables del relieve de terreno.

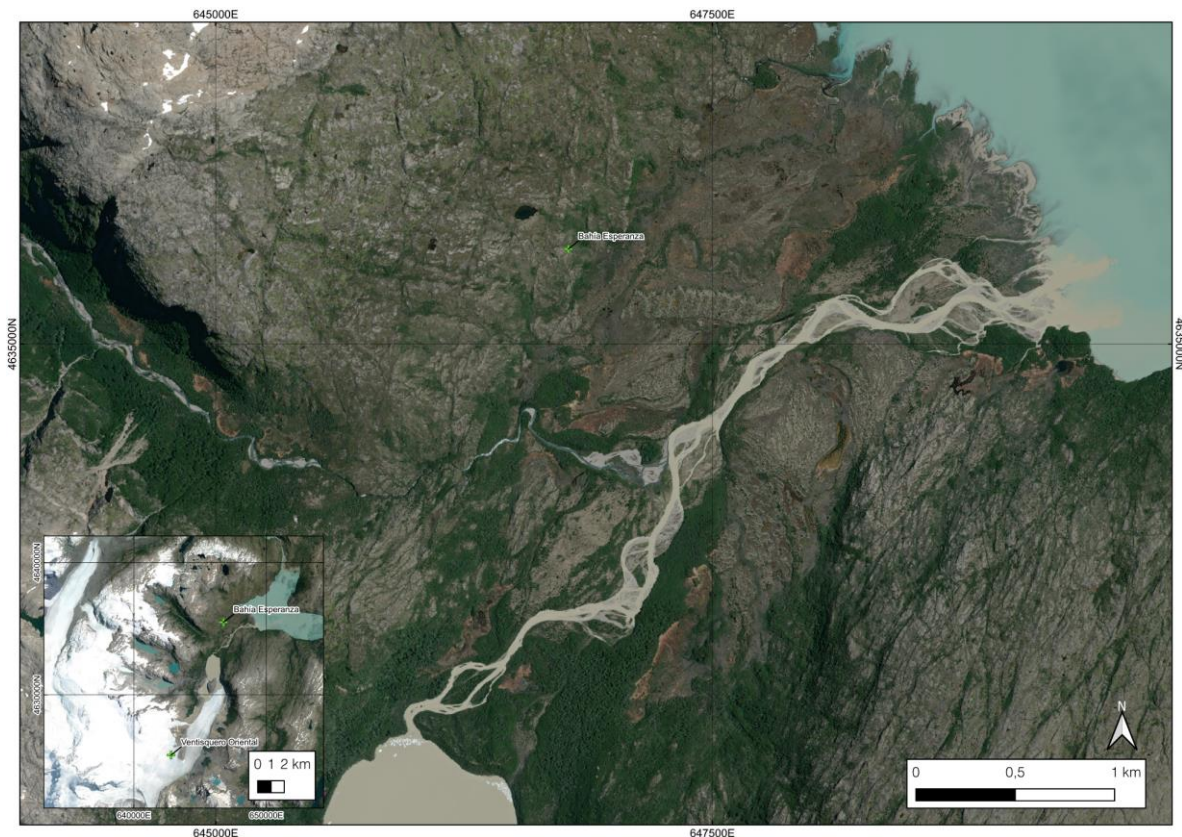


Figura 18 – Cartografía satelital de terreno, escala 1:15.000, ajustado al área de planicie proglacial de lavado o sandur, como lugar establecido para el reconocimiento de geoformas en terreno. Mapa base ESRI World Imagery (2023). Elaboración propia.

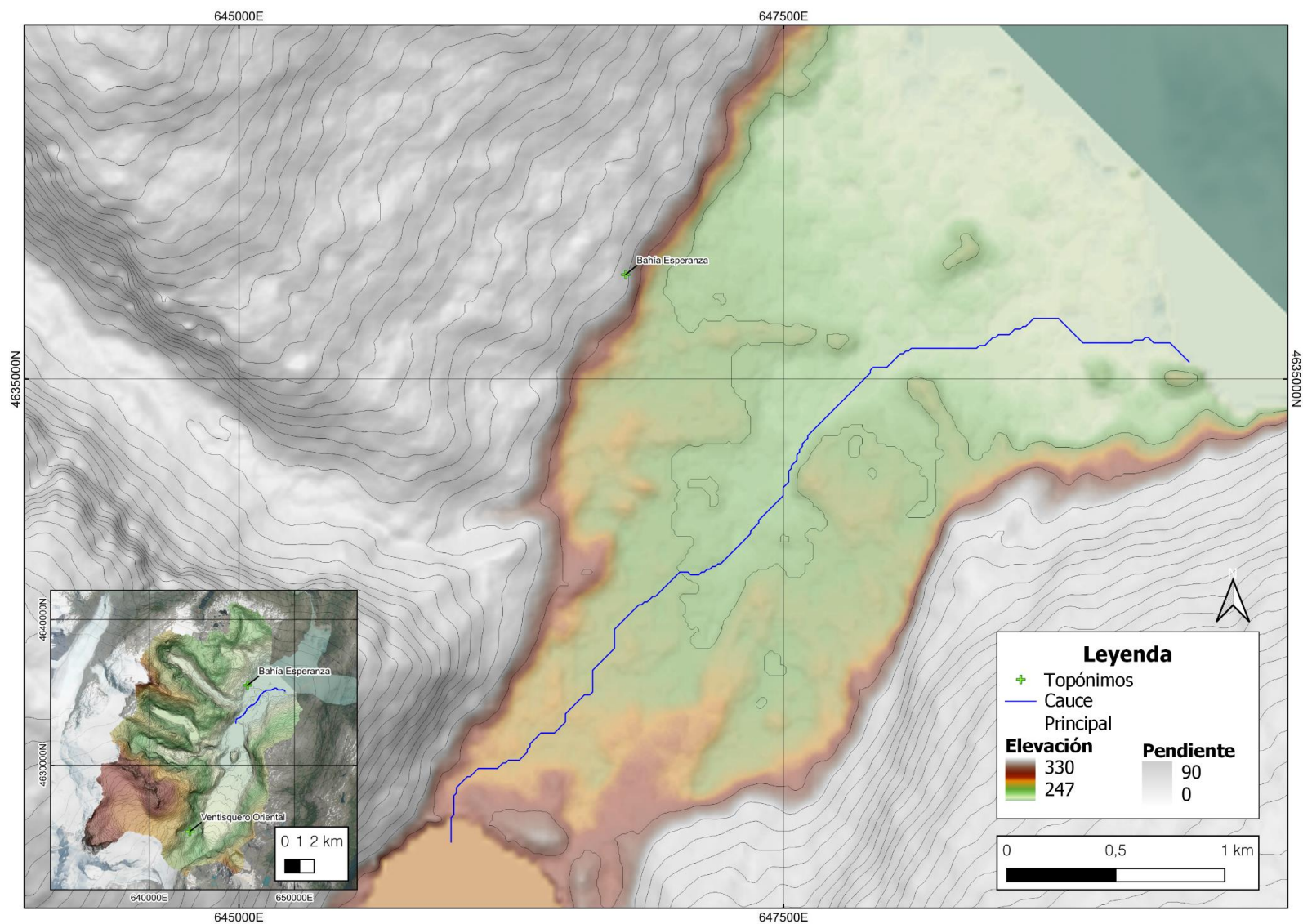


Figura 19 – Modelo de terreno, elaborado a partir del DEM y del modelo de pendientes. Se ajustaron los valores de visualización del DEM para resaltar el sandur mediante una gradiente de colores, a fin de destacar las estructuras de origen glacial. Elaboración propia.

Por otro lado, se confeccionaron mapas de vegetación que permitieran identificar las zonas de interés para el reconocimiento de flora y fauna de nuestra área de estudio y así establecer su relación con la dinámica del paisaje glacial de montaña.

El mapa que muestra el estado de la vegetación de la cuenca se calculó utilizando el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), este: *“mide el verdor y la densidad de la vegetación captada en una imagen de satélite. La vegetación sana tiene una curva de reflectancia espectral muy característica de la que podemos sacar partido calculando la diferencia entre dos bandas: la del rojo visible y la del infrarrojo cercano. El NDVI es esa diferencia expresada numéricamente entre -1 y 1”* (EOSDA, 2022).

El cálculo del índice NDVI se hizo mediante la *calculadora de bandas* del software QGIS, empleando la siguiente fórmula:

$$NDVI = (NIR - RED) / (NIR + RED)$$

Los valores del NDVI oscilan entre -1 y 1, donde los valores negativos cercanos a -1 corresponden a cuerpos de agua, nieve y nubes, mientras que los valores cercanos a cero corresponden a rocas y suelo descubierto.

Los valores muy pequeños (0,1 o menos) de la función NDVI corresponden a áreas sin rocas, arena o nieve. Los valores moderados (de 0,2 a 0,3) representan arbustos y praderas, mientras que los valores grandes (de 0,6 a 0,8) indican bosques templados y tropicales (EOSDA, 2022).

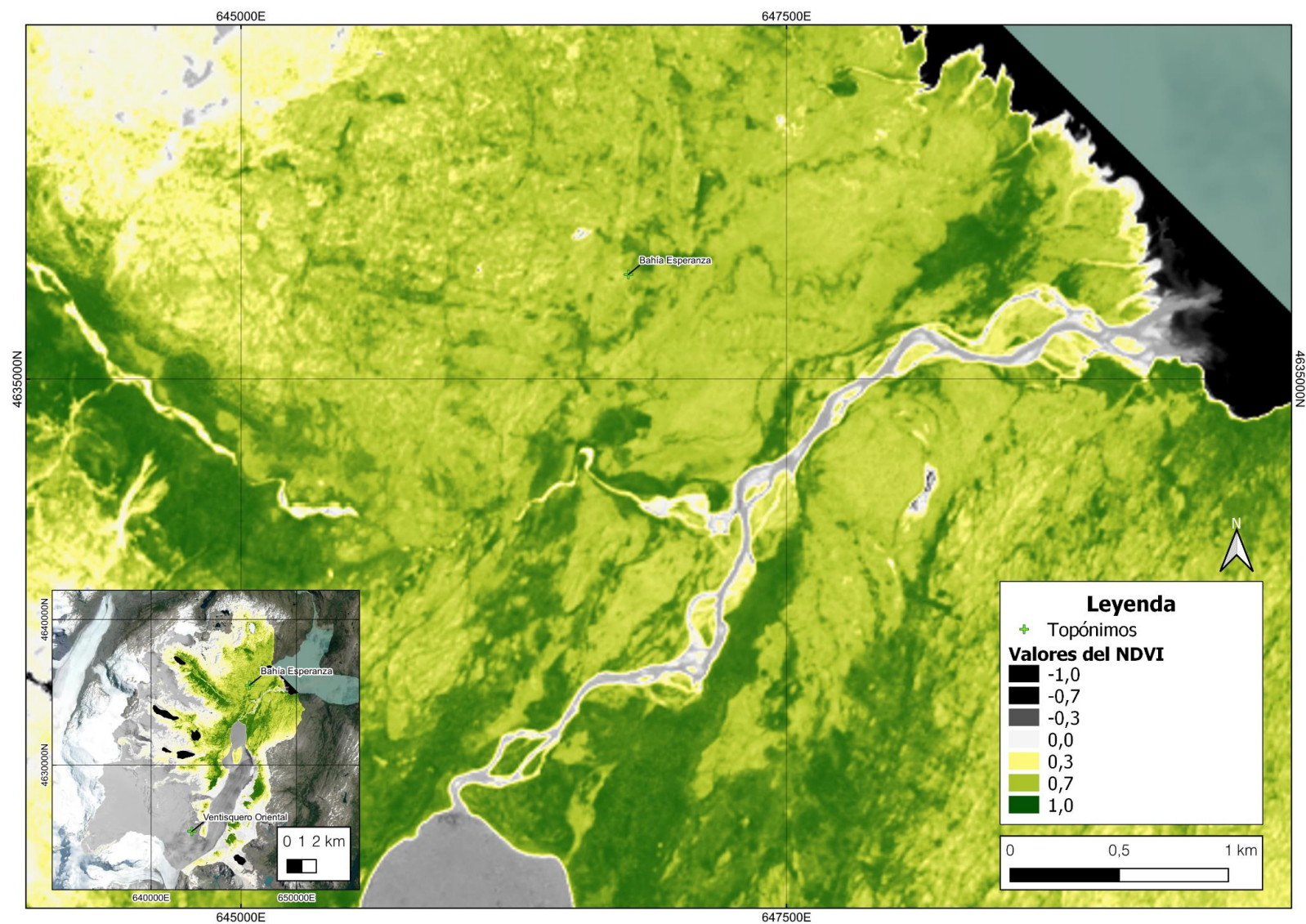


Figura 20 – Mapa del NDVI ajustado a la cuenca del glaciar Oriental. El objetivo cartográfico es representar el estado de la vegetación y el emplazamiento de las estructuras vegetales sobre la planicie proglacial de lavado. Elaboración propia.

3.3 Trabajo de Terreno

3.3.1 Levantamiento y Validación de Datos en Terreno

El trabajo en terreno se llevó a cabo gracias al subprograma Ciencia Joven, del Instituto Chileno de Campos de Hielo (ICCH), junto a quienes nos embarcamos en una expedición cívico-militar hacia la cuenca y valle del glaciar Oriental.

El cronograma contemplaba 16 días de trabajo efectivo en terreno, más 12 días destinados al traslado y descanso del personal durante el trayecto al área de estudio.

La expedición se realizó entre el lunes 17 de enero y domingo 13 de febrero del año 2022, durante la denominada “época estival” en Chile (el termino *estival* hace referencia a la época del año en la cual las temperaturas suben y el clima se vuelve más cálido).

Este dato es relevante, ya que durante esta época del año las condiciones atmosféricas y ecológicas en Patagonia sufren transformaciones debido a la estacionalidad climática, lo que se traduce en un aumento en las temperaturas y disminución del régimen hídrico, alterando notoriamente el paisaje durante esta época, en contraste con el periodo invernal.

En base a los antecedentes anteriormente recopilados, el área muestreada se centró en la parte media y baja de la cuenca, con especial énfasis en el valle y planicie proglacial de lavado.

El objetivo general era recorrer las zonas de interés para identificar, registrar y describir las principales geoformas glaciales detectadas en primera instancia en el trabajo de gabinete pre-terreno, y comparar los resultados obtenidos con la información previa del análisis morfológico y ambiental de la cuenca.



Figura 21 – Fotografías del trabajo efectivo en terreno junto al ICCH. En la imagen A) se analizan las cartografías de terreno confeccionadas en este estudio, y en B) se visitó uno de los complejos morrénicos identificados en gabinete para su reconocimiento. Elaboración propia.

En primera instancia, se analizaron las cartografías de terreno confeccionadas en gabinete (Fig. 21 A), y luego se realizó un reconocimiento del paisaje, identificando y registrando las principales estructuras y geoformas observadas en terreno.

En segundo lugar, se visitaron las zonas de interés establecidas previamente en el análisis geomorfológico y ecológico en gabinete, para su reconocimiento y analizar cualitativamente el medio en el que se encuentran emplazados estos lugares dentro de nuestra área de estudio (Fig. 21 B).

Para el registro y toma de muestras en terreno, se utilizaron cámaras fotográficas, cámaras trampa y un RPA (Fig. 22 A), adicionalmente, se obtuvieron muestreo de suelos y sedimentos mediante el uso de calicatas y de la barrenación de turberas (Fig. 22 B); junto a la confección de un herbario con muestras de vegetación, lo que permitió conocer el estado, además de obtener nuevos antecedentes sobre la ocupación del suelo en el área.



Figura 22 – Levantamiento de datos en terreno, mediante A) la captura fotogramétrica del área de estudio y de B) la barrenación de turberas. Elaboración propia.

Las áreas de muestreo fueron definidas en terreno, y se seleccionaron en base a las características de las zonas de interés identificadas en gabinete, por su relevancia morfológica y ambiental, por lo demás, siempre y cuando las condiciones atmosféricas y de seguridad lo permitieran.

Las rutas de reconocimiento en terreno fueron registradas utilizando un GPS (i.e. Garmin trex1001), mediante puntos de control tal como muestra la Figura 24, se marcan las rutas que parten desde el campamento base, en la parte baja de la cuenca, hasta el desagüe del lago Oriental, en la parte media de la cuenca, logrando abarcar una extensión amplia de la planicie proglacial de lavado.

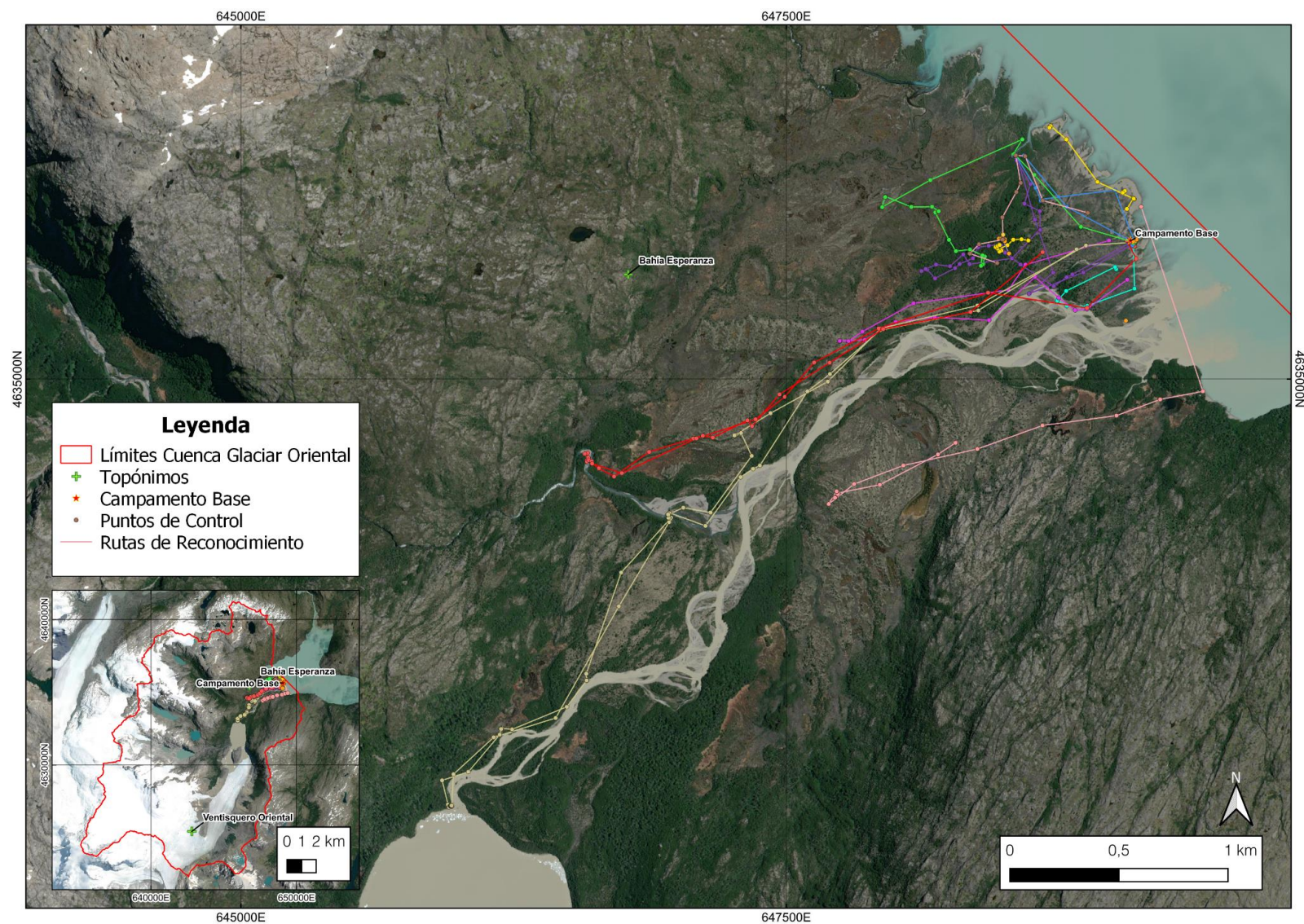


Figura 23 – Rutas de reconocimiento y de trabajo en la parte media (Lago Oriental) y baja de la cuenca del glaciar Oriental (Planicie proglacial de lavado). Elaboración propia.

3.4 Trabajo de Gabinete Post-Terreno

3.4.1 Análisis de Muestras y Datos de Terreno

El trabajo de gabinete post-terreno se basó principalmente en la georreferenciación de todos los registros fotográficos aéreos obtenidos en terreno mediante el uso de RPA, logrando obtener imágenes de terreno en alta resolución, las que permitieron comparar las estructuras observadas en terreno, con las estructuras identificadas en el trabajo de gabinete pre-terreno mediante las imágenes de satélite y las fotografías aéreas históricas.

Por otro lado, se trabajó en georreferenciar los puntos y áreas de muestreo de los registros obtenidos mediante las cámaras trampa, por avistamiento directo, o por la toma in situ de muestras (e.g. calicatas), de este modo, se busca aportar con nueva información relacionada al estado actual del valle glacial o identificar posibles eventos ocurridos en el pasado que pudieran haber influido en la disposición y morfología del relieve en el presente.

Parte de los datos y de muestras obtenidas en terreno (i.e. muestras de suelo, sedimentos y herbario con especies vegetales), no forman parte de los resultados de esta investigación, pues su definición y caracterización necesitan de un análisis multidisciplinario que escapa de los objetivos principal y específicos propuestos para este estudio, pero que sin duda forman parte importante de cualquier investigación si se desea comprender la génesis y la evolución de los componentes bióticos y abióticos del terreno, por lo que se propone y espera la inclusión de estos datos en futuros estudios relacionados con la cuenca del glaciar Oriental.

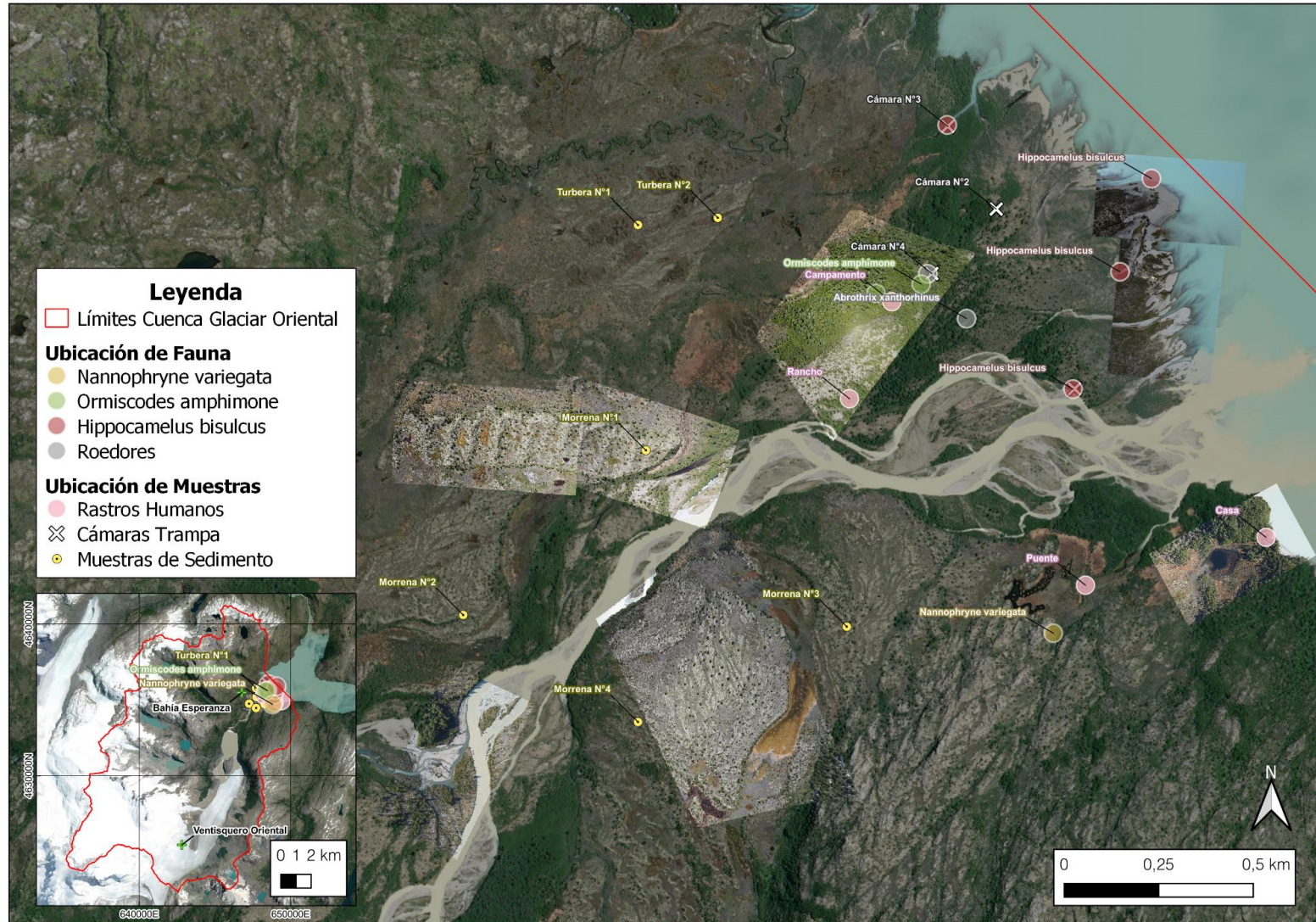


Figura 24 – Mapa de ubicación de las muestras tomadas en terreno y georreferenciación de los registros fotográficos aéreos (RPA). Estos registros muestran complejos morrénicos, bosques, turberas y playa de acreción. Elaboración propia.

3.4.2 Digitalización de Estructuras y Geoformas Reconocidas

Con la nueva información geomorfológica recopilada en terreno, en conjunto a las fotografías aéreas georreferenciadas obtenidas con el RPA, se procedió a la digitalización de las estructuras y geoformas identificadas en terreno, y que servirán de complemento a las ya identificadas previamente mediante fotointerpretación y en el análisis morfológico de la cuenca.

La digitalización vectorial se realizó en QGIS, utilizando las herramientas de edición vectorial; se creó un nuevo archivo en formato shape, guiándonos en base al material geoespacial recopilado, sumado a los mapas base de imágenes satelitales de alta resolución de ESRI y Bing (60 cm - 30 cm x píxel), disponibles en los servicios web de QGIS.

La tipología para identificar las estructuras reconocidas se basó en el trabajo de Chandler et al. (2018), denominado *“Glacial geomorphological mapping: A review of approaches and frameworks for best practice”*, donde los autores entregan recomendaciones a la hora de identificar y cartografiar las geoformas glaciales.

Luego, se procedió a elaborar una cartografía con toda la información geomorfológica recopilada durante la investigación, logrando así caracterizar en detalle la geomorfología de gran parte de la cuenca del glaciar Oriental.

3.4.3 Clasificación Supervisada

El desarrollo de una clasificación supervisada permitió obtener información adicional sobre la composición ambiental de la cuenca, pues el resultado de la clasificación estableció el porcentaje de cobertura y el área ocupada por cada cubierta terrestre identificada para el área de estudio.

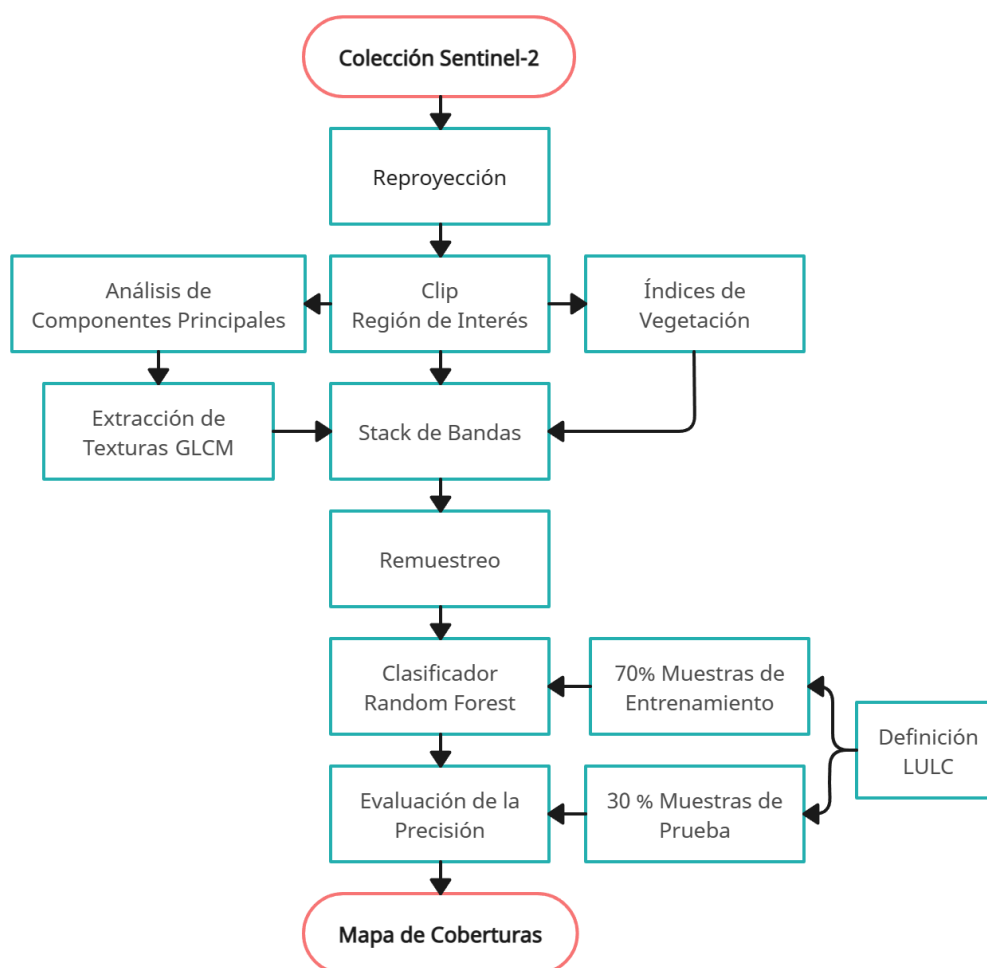


Figura 25 – Diagrama de flujo sobre metodología para la Clasificación Supervisada. Modificado de Mohammadpour, P., et al. 2022.

La clasificación se llevó a cabo en Google Earth Engine Code Editor (<https://code.earthengine.google.com>), desde donde se obtuvo una imagen compuesta con la media de los valores de reflectancia de las bandas, obtenidas de las imágenes filtradas de la colección Sentinel-2 para los meses de verano de 2022, y acotada a los límites del área de estudio.

El flujo de trabajo requiere de la obtención de los Componentes Principales de la imagen (Fig. 27 A), del análisis de textura empleando la Matriz de Coocurrencia de Nivel de Gris (“Gray-Level Co-Occurrence Matrix”; GLCM) (Fig. 27 B) y requiere de la aplicación de los índices espectrales NDVI, y su derivado, el GNDVI, el cual logra medir el contenido de clorofila con mayor precisión que el NDVI (EOSDA, 2022).

Además, se incorporaron otros índices de vegetación que ayudaron a mejorar la precisión de la clasificación, aplicando el índice SAVI que mitiga el impacto del brillo del suelo que suelen afectar los resultados; y el índice GCI, que se utiliza para estimar el contenido de clorofila de las hojas en diversas especies de plantas (Fig. 28) (EOSDA, 2022).

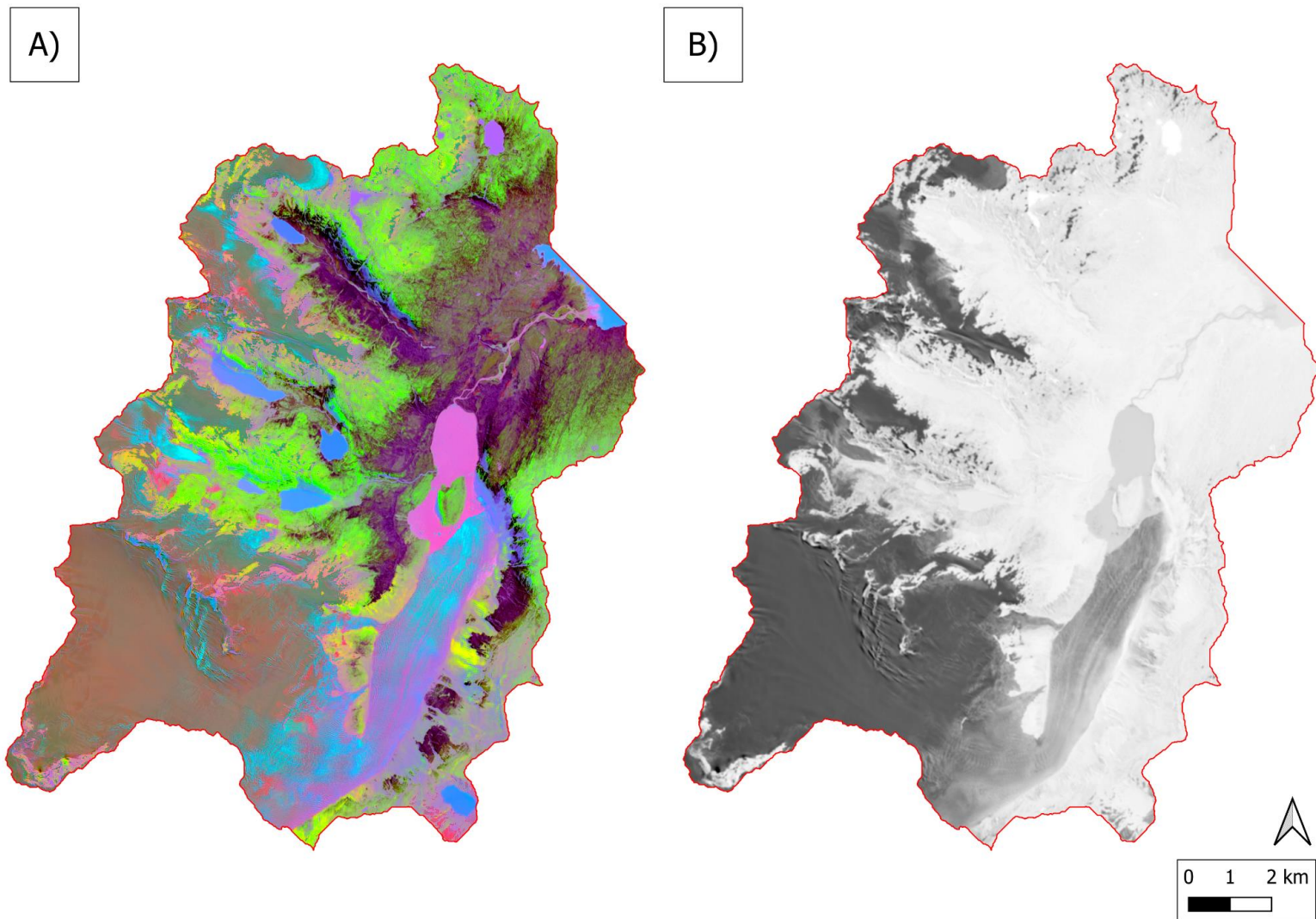


Figura 26 – A la izquierda, la figura A) muestra la combinación de las bandas 4-3-2 de los Componentes Principales de la escena para el área de estudio, y a la derecha B) el resultado del análisis de textura de las bandas de la escena empleando el GLCM. Elaboración propia.

Por último, se compilaron en un stack de bandas los resultados del análisis ráster de la imagen compuesta de la cuenca, desde donde se establecieron 8 clases de coberturas de suelos, se entrenó un clasificador con muestras tomadas del valor digital de los píxeles de la imagen, corroborando los resultados mediante una Matriz de Confusión y del estadístico Kappa.

Los resultados fueron desplegados en una cartografía que muestra la ubicación y extensión dentro de la cuenca de las coberturas clasificadas de terreno, permitiendo entender de mejor manera la estructura y ecología del paisaje.

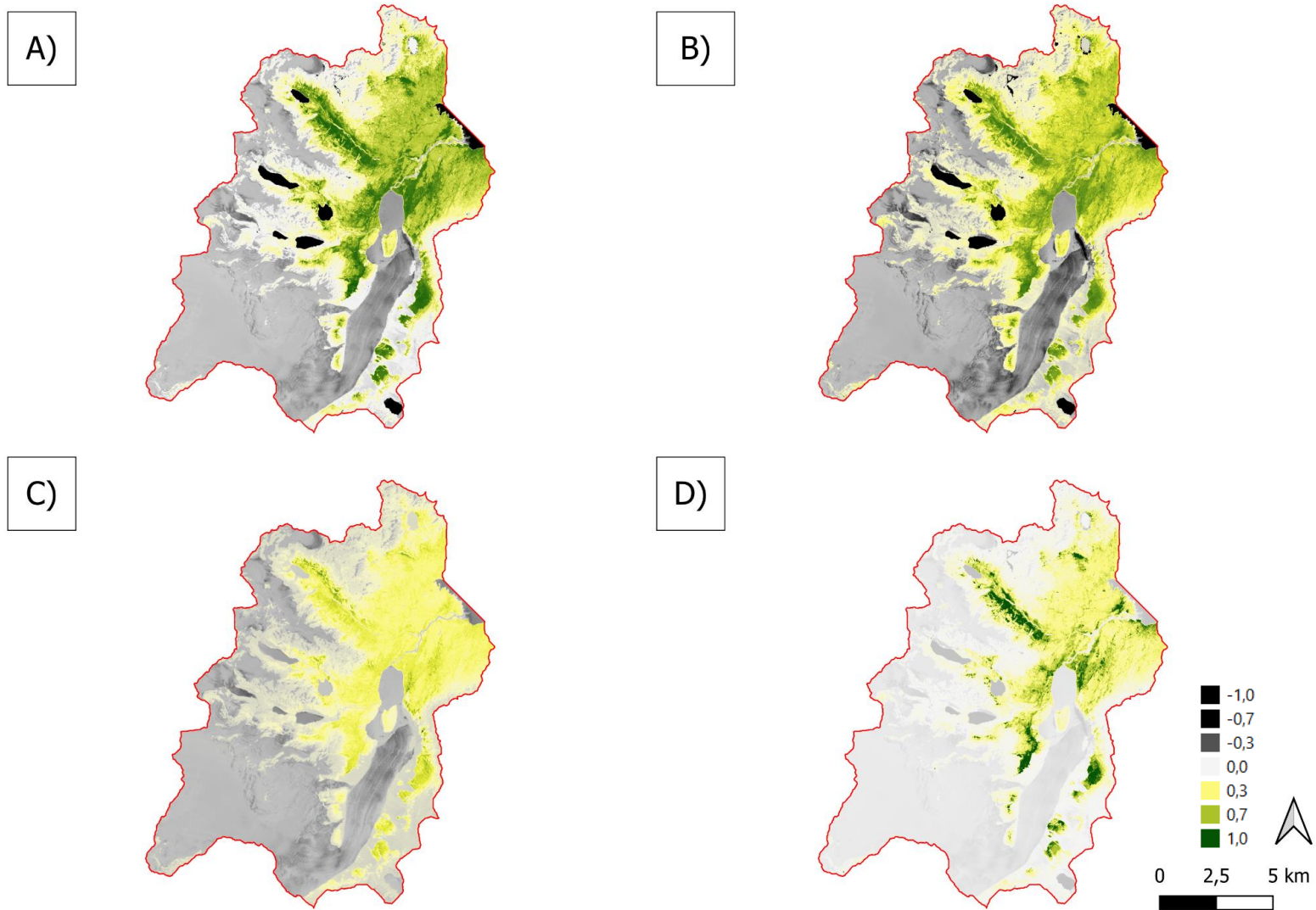


Figura 27 – Comparación de los índices de vegetación, utilizados para ajustar la clasificación de la vegetación, mediante los índices A) NDVI, B) GNDVI, C) SAVI y D) GCI. Elaboración propia.

4. RESULTADOS

4.1 Delimitación y Descripción de la Cuenca

La cuenca del glaciar Oriental es una cuenca de tipo exorreica, definida así puesto que el área de captación hídrica de la cuenca forma un medio de corrientes que desemboca en el océano Pacífico, pasando por un nivel de base local, en este caso el lago O'Higgins, siendo este la cota más baja que alcanza el río Brazo Esperanza dentro de la cuenca (Tarbuck & Lutgens, 2005).

El lago O'Higgins descarga sus aguas en el río Pascua, desembocando finalmente en el océano Pacífico.

La cuenca está integrada por cuatro sistemas de subcuencas de origen glacial, independientes y transversales a la dirección de flujo del glaciar Oriental.

La cuenca del glaciar Oriental nace en el monte Steffen, la cima más alta de la cuenca a 3.155 m s.n.m., seguido por el cerro Azul con 3.017 m s.n.m.

Hacia el norte, siguiendo el cordón montañoso del este, se encuentra el cerro Mayo con 1.942 m s.n.m, que da origen a la subcuenca II, esta contiene a las lagunas Mayo, descargando sus aguas al Río Mayo, en dirección al lago Oriental.

Más al norte, se encuentra la subcuenca III, que nace desde el cerro Esperanza, y que contiene a la laguna y río Esperanza, que tributa hacia el cauce principal, el río Brazo Esperanza.

En el límite norte, se ubica la subcuenca IV, que es una microcuenca fluvial en donde su cauce desemboca directo en el lago O'Higgins.

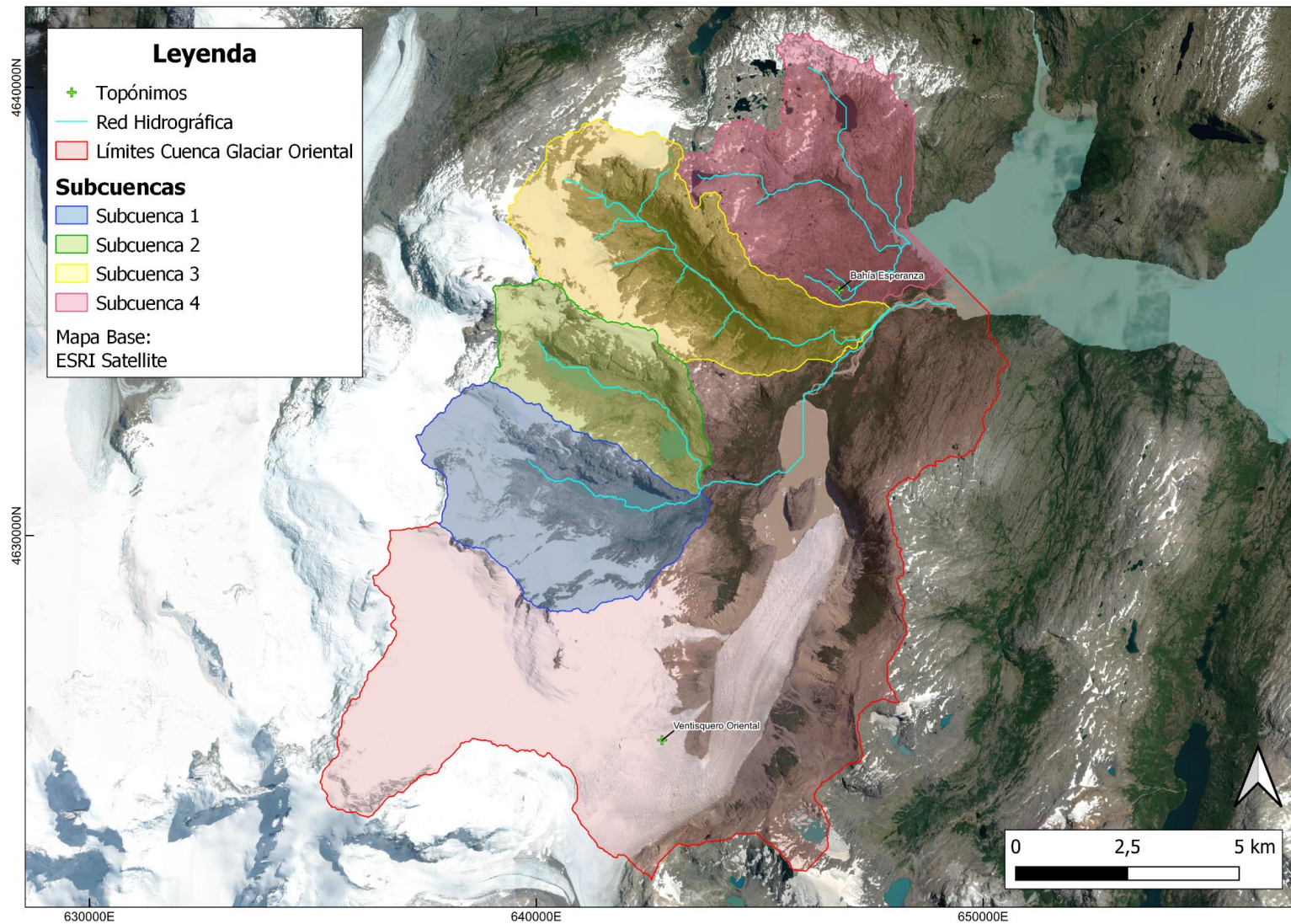


Figura 28 – Mapa de delimitación de la cuenca del glaciar Oriental, elaborado a partir de información del DEM del área de estudio; además, se extraen las subcuencas dentro de la cuenca y la red hidrográfica. Elaboración propia.

El valle del glaciar Oriental se expone en dirección noreste, limitando con el lago O'Higgins, al este limita con el Cordón los Moscos, hacia el sur limita con la plataforma de hielo continental de CHPS, al oeste se encuentra el Parque Nacional Bernardo O'Higgins y el ventisquero Gabriel Quiros o Pascua, y en dirección norte se ubica el desagüe del lago O'Higgins y la cabecera del río Pascua.

El glaciar Oriental desciende desde la meseta o plateau de CHPS, corresponde a una lengua de hielo efluente de CHPS, es un tipo de glaciar de desbordamiento (Aniya, 1995), se extiende por al menos 13 kilómetros desde la zona de acumulación, encajonándose en la zona de ablación a la posición en que se encuentra actualmente.

Estas lenguas de hielo son esencialmente glaciares de valle, los que fluyen valle abajo extendiéndose hacia fuera de los márgenes de estas masas de hielo más grandes (Tarbuck, 2005).

El proceso de ablación del glaciar Oriental produjo la fusión del hielo de la lengua de desbordamiento, formando un lago proglacial (i.e. lago Oriental), originado por el represamiento de las aguas de fusión entre los arcos morrénicos terminales (complejo morrénico IV, fig. 37) y el frente desprendente de la lengua glaciar. Este lago da origen al cauce principal o también llamado río Brazo Esperanza.

El río se extiende por la planicie proglacial de lavado por unos 4 kilómetros aproximados desde el desagüe del lago Oriental hasta el delta o la desembocadura del cauce en el lago O'Higgins, siendo evidentes los antiguos flujos meándricos marcados en la superficie de la planicie de lavado del valle glacial.

4.2 Fluctuaciones del Glaciar Oriental

El análisis multitemporal de la cuenca, utilizando las fotografías aéreas históricas del SAF, más las imágenes de satélite Landsat 5 y Sentinel-2 permitieron identificar y digitalizar los límites y el frente desprendente del glaciar Oriental, calculando así el área y porcentaje de pérdida de masa glaciar durante los últimos 40 años (Fig. 30).

Se observa un evidente retroceso y adelgazamiento de la lengua de desbordamiento del glaciar, aunque a velocidades más lentas que otros glaciares en estas mismas longitudes de CHPS (Mouginot & Rignot, 2015).

El retroceso del frente de la lengua de desbordamiento y el colapso del frente desprendente se ha acelerado en los últimos 6 años, con un aumento notable en el desprendimiento de masa glaciar, formando una cantidad importante de icebergs o témpanos de hielo, tal como fue registrado durante la visita al lago Oriental y cómo es posible apreciar en las fotografías aéreas A y B de la Figura 31 sobre el glaciar Oriental.

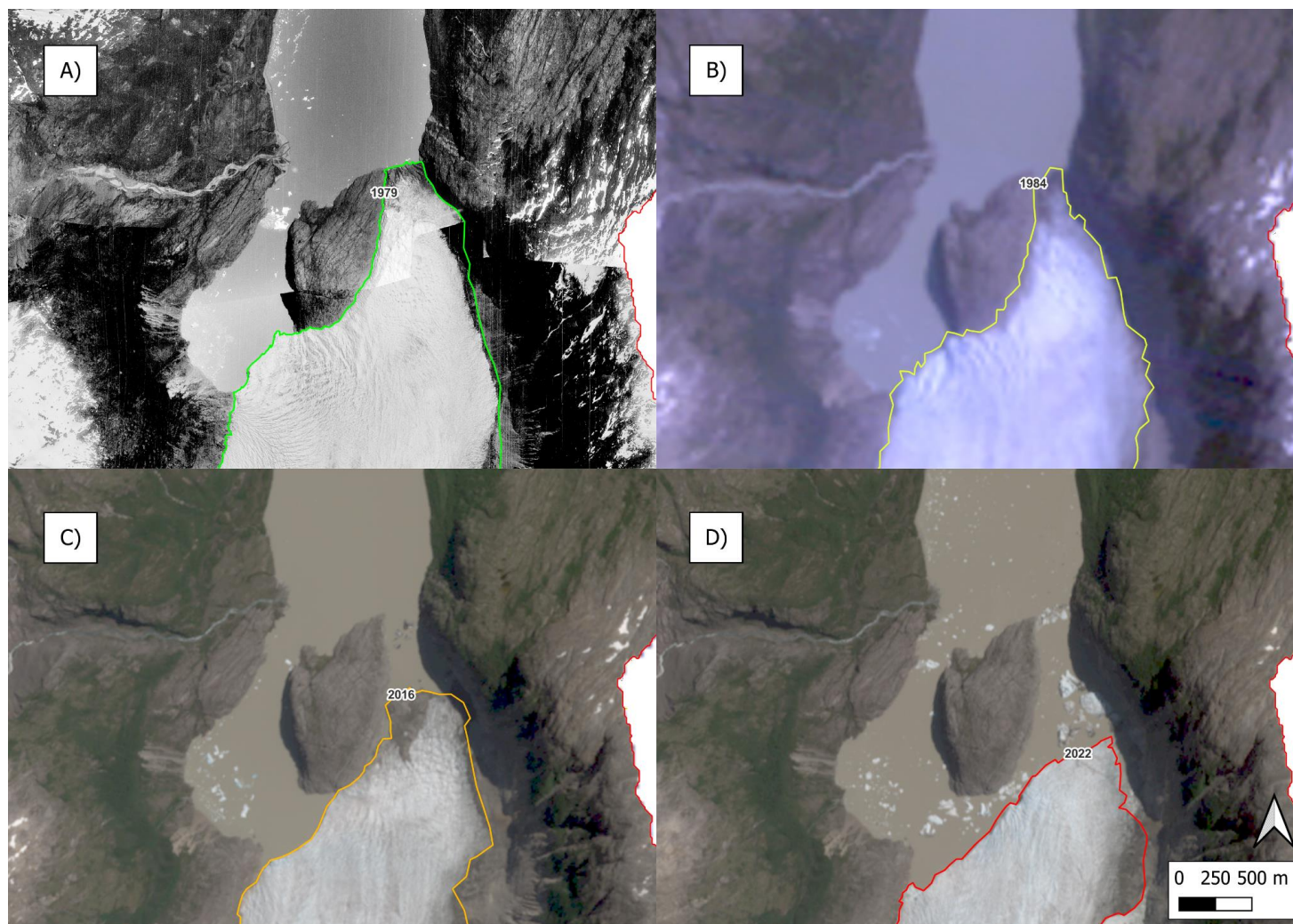


Figura 29 – Comparación del frente desprendiente del glaciar Oriental, utilizando la información geoespacial histórica recopilada. La imagen A) corresponde a la composición de las fotografías aéreas del SAF, con los límites del glaciar Oriental el año 1979. La imagen B) fue capturada por el satélite Landsat 5 y muestra el estado del glaciar el año 1984. Las imágenes C) y D) fueron captadas por el satélite Sentinel-2 el año 2016 (más antiguo) y el año 2022 (más actual al momento de la recopilación de imágenes), respectivamente.

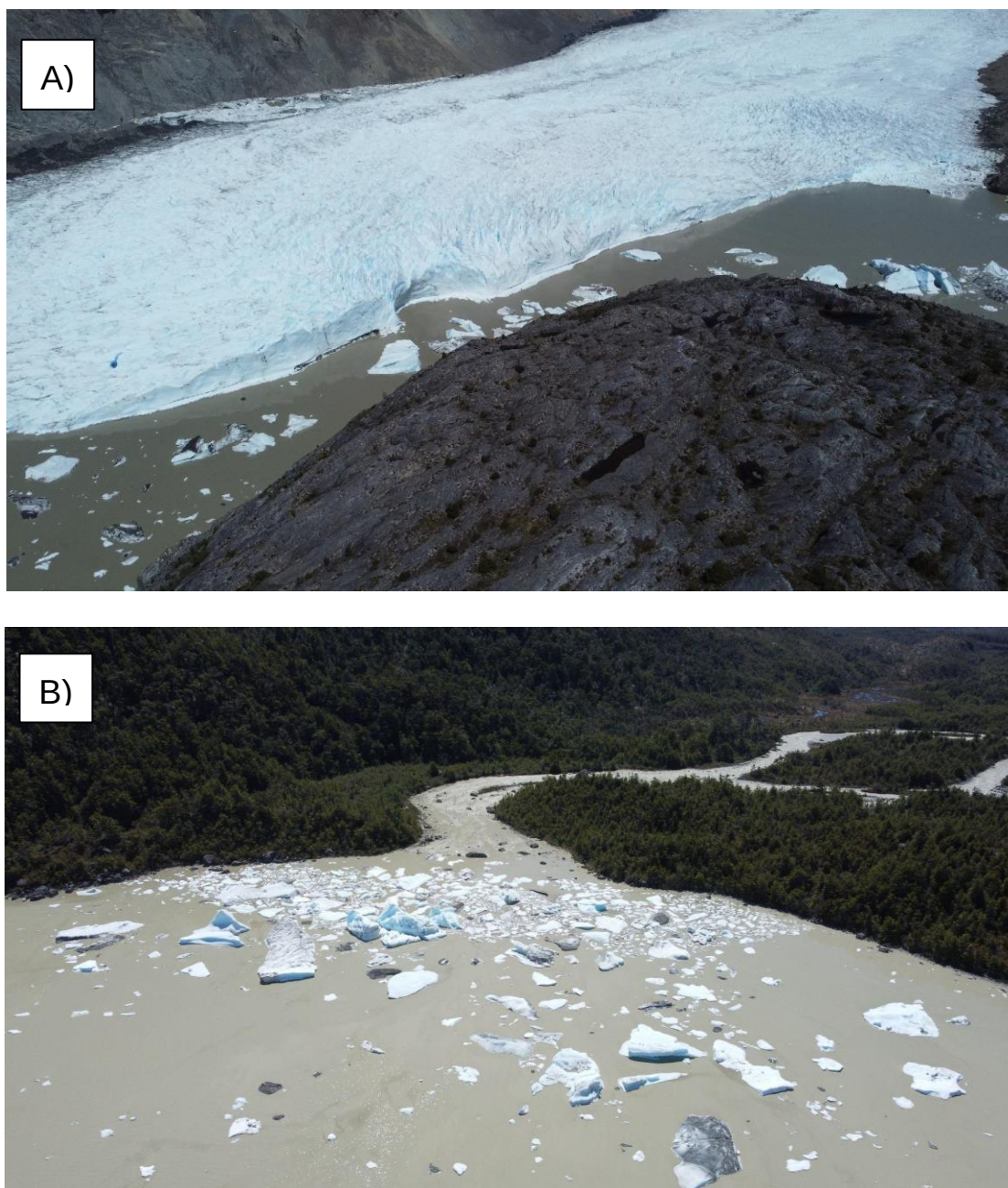


Figura 30 – A) Frente desprendente del glaciar Oriental, captado mediante un RPA; se observa la superficie del glaciar que emerge sobre el lago proglacial y el desprendimiento de témpanos. B) Acumulación por relieve y pendiente de témpanos acarreados por la corriente de desagüe del lago proglacial.

La diferencia en la extensión de la lengua de desbordamiento del glaciar Oriental entre los años 1979 y 2022, equivale a un área de 4.358.243 m² de pérdida de masa glaciar (Fig. 32), siendo un 26,62% del total del área del glaciar Oriental el año 1979.

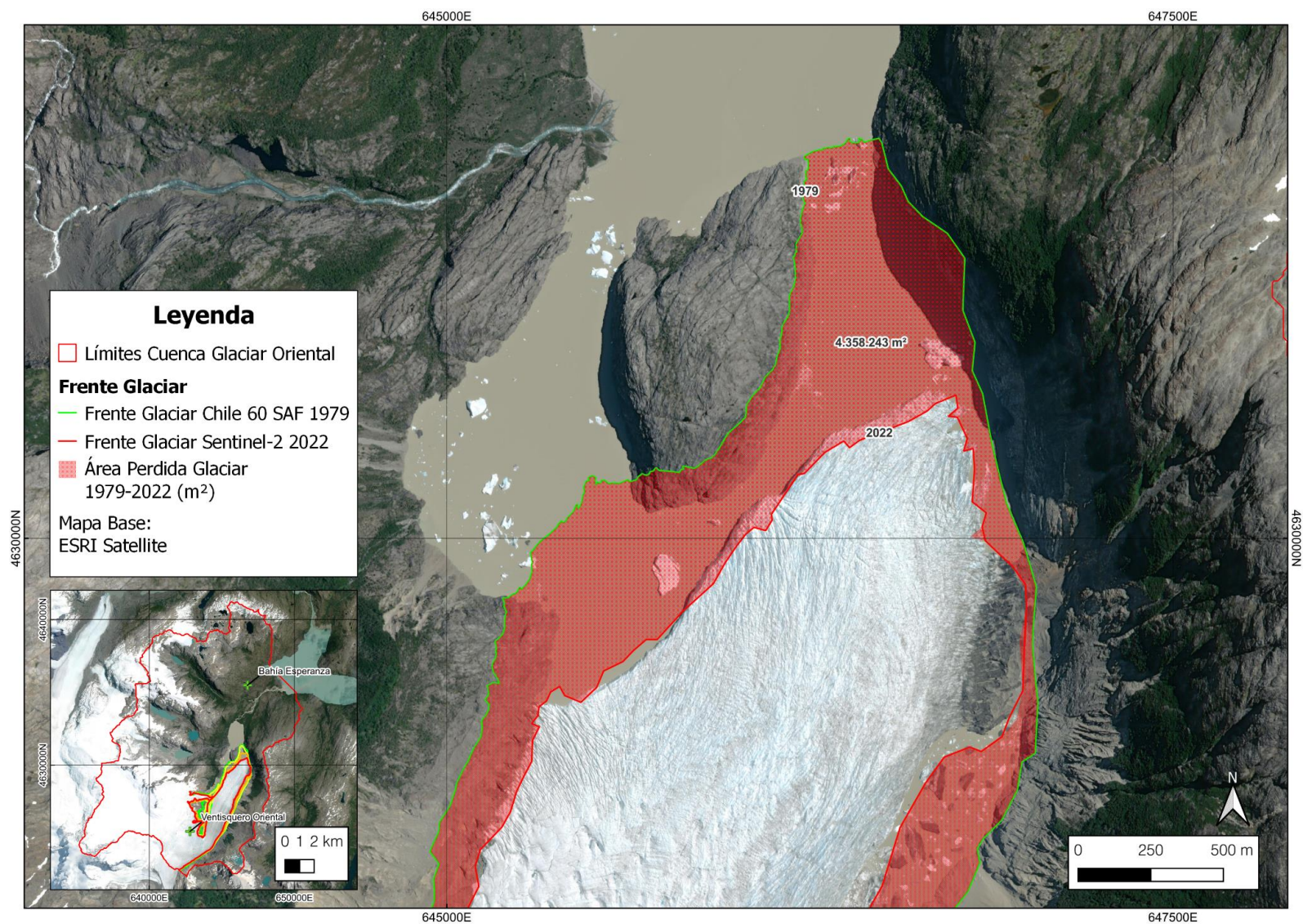


Figura 31 – Área afectada por la pérdida de masa y volumen de la lengua de desbordamiento del glaciar Oriental, entre los años 1979 y 2022.

El adelgazamiento en volumen y masa del glaciar Oriental se evidencia en la extensión de los límites laterales de la lengua de desbordamiento, los que se han contraído, a mayor velocidad que el frente desprendente, lo que ha generado desestabilidad en las laderas este y oeste que actualmente contienen al glaciar.

Esto ha provocado un cambio en la línea de corte o trimline, a consecuencia de procesos de remoción en masa (i.e. deslizamiento de laderas y reptación, tal como muestra la Fig. 33), los cuales lograron ser identificados mediante fotointerpretación y el reconocimiento del área en terreno.



Figura 32 – Fotografía de RPA del glaciar Oriental (2022). Se observa el deslizamiento de laderas junto a la deposición del material en la superficie de la lengua de desbordamiento, y la reptación de una enorme formación boscosa por efecto de la gravedad y del adelgazamiento del manto glaciar. Elaboración propia.

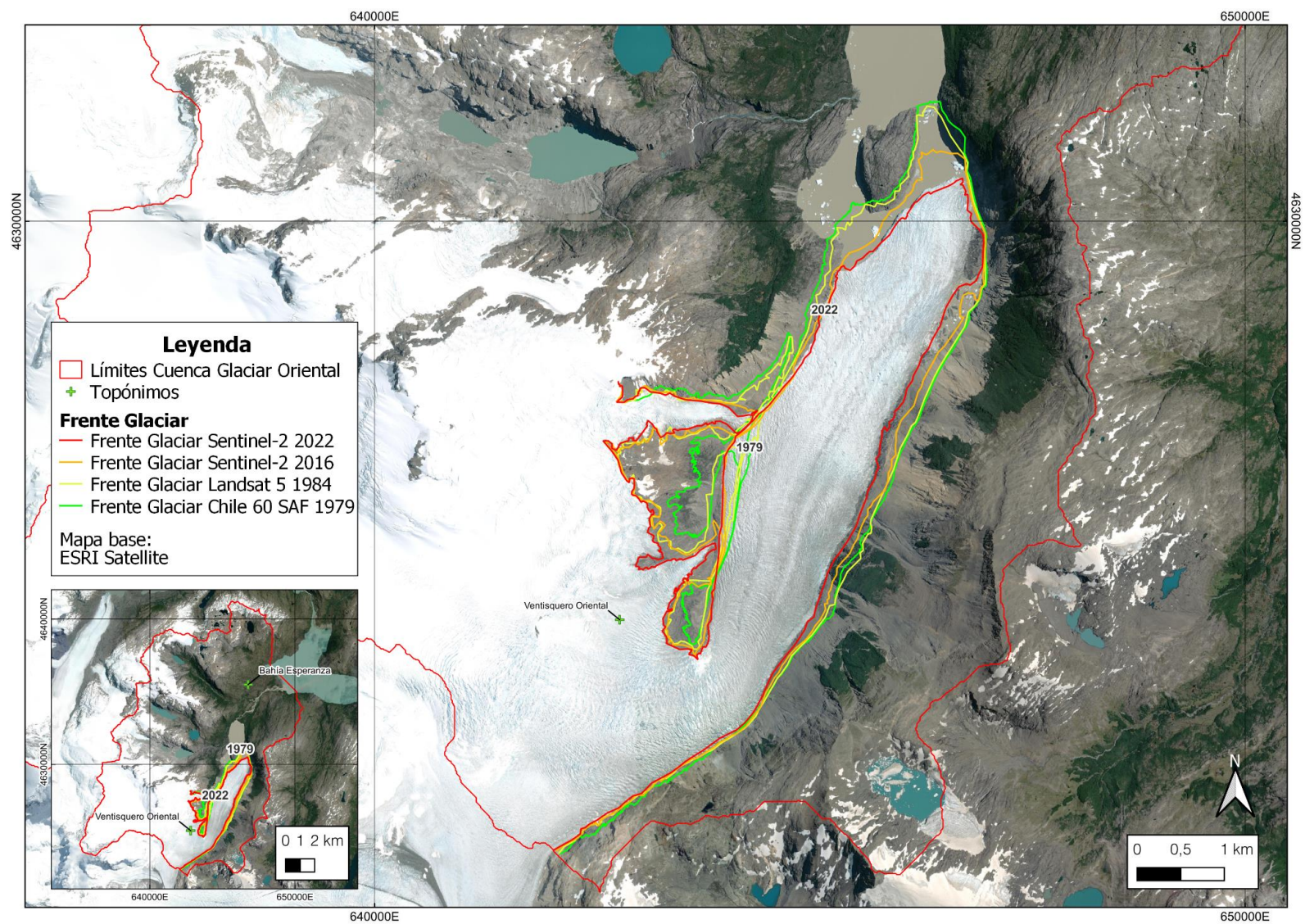


Figura 33 – Límites de extensión de la lengua de desbordamiento y frente desprendente del glaciar Oriental en los años 1979 – 1984 – 2016 – 2022. Elaboración propia.

4.3 Caracterización Geomorfológica de la Cuenca

El relieve del área de estudio se caracteriza por ser más suave en la zona oriental de CHPS (Carrasco, 1998). Está definido por la topografía relativamente baja a esta latitud de la cordillera de los andes, con cumbres máximas promedio de 2.500 metros, siendo pocas las que exceden los 3.000 metros.

Propiedad	Parámetro	Unidad	Valor
Centroide	Coordenada x	UTM	643.551
	Coordenada y	UTM	4.631.415
Propiedades morfométricas de la cuenca	Área	Km ²	173,507
	Perímetro	Km	76,372
	Longitud	Km	19,794
	Ancho	Km	8,766
	Cota máxima	m.s.n.m.	3155
	Cota mínima	m.s.n.m.	247
	Altura media	m.s.n.m.	1000,677
	Pendiente media	%	70,739
Índices de forma	Índice de Gravelius	adimensional	1,449
	Factor de Horton	adimensional	0,443
Propiedades cauce principal	Longitud	Km	5,583
	Longitud hasta la divisoria	Km	24,729
	Cota mayor	m s.n.m.	292
	Cota menor	m s.n.m.	251
	Pendiente media	%	0.073
Propiedades red de drenaje	Longitud total drenaje	Km	37,696
	Densidad de drenaje	Km/Km ²	0,217

Tabla 5 – Morfometría de la cuenca del glaciar Oriental a partir de datos del DEM del área de estudio. Elaboración propia.

La pendiente media de la cuenca, con valores sobre el 70%, señala lo escarpado del relieve, siendo la mayor parte del terreno dentro del área estudio dominado por cordones montañosos pertenecientes a la Cordillera de los Andes.

El cálculo de los índices de forma nos entrega una segunda aproximación a las características morfológicas de la cuenca, de los valores obtenidos, contrastados con la clasificación propuesta en las Figura 15 y 16.

Se señala según el índice de Gravelius, que la cuenca del glaciar Oriental mantiene una forma Oval redonda a oval-alargada, con mediana tendencia a inundaciones en base a la interpretación ambiental.

Similar es lo que indica el factor de forma de Horton, que, siguiendo los rangos de valores de clasificación, señala a la cuenca del glaciar Oriental como ligeramente ensanchada.

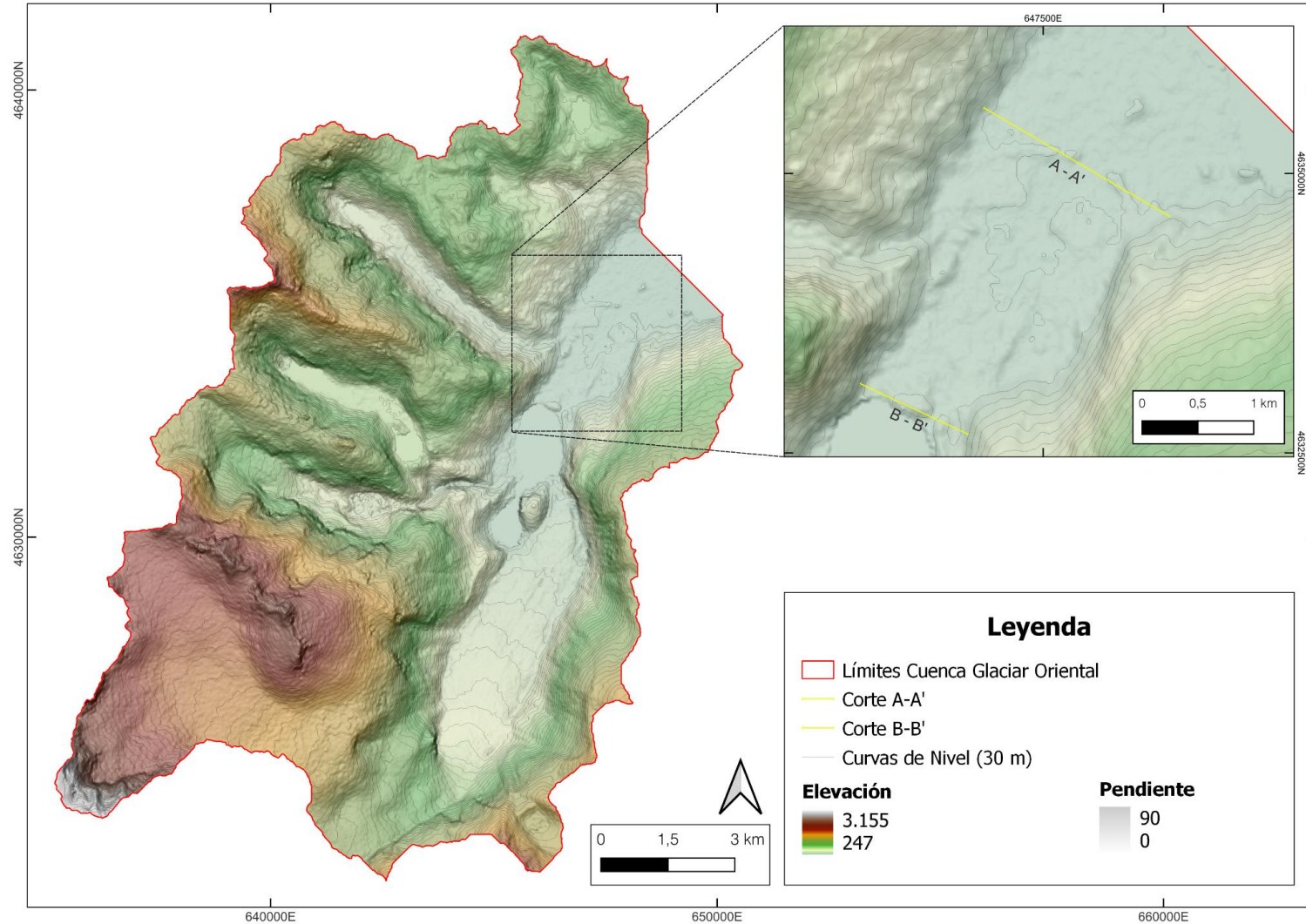


Figura 34 – Modelo Digital de Terreno de la cuenca del glaciar Oriental. Confeccionado a partir de la elevación, pendientes de terreno y curvas de nivel (30 m), obtenidos del DEM de la región de Aysén. En el recuadro se muestra la ubicación de los cortes transversales A-A' y B-B' para el análisis del perfil topográfico de los “Complejo Morrénico I” y “Complejo Morrénico IV”. Elaboración propia.

Se lograron identificar variadas estructuras y geoformas, modeladas por el paso del glaciar Oriental, probablemente, durante su último máximo glacial, entre los siglos 17-19, en el periodo de Neoglacial V descrito por Aniya (2013), en la denominada Pequeña Edad de Hielo (último periodo Neoglacial registrado en Patagonia).

El elemento morfológico principal de la cuenca es el glaciar Oriental. En base al criterio de identificación de Glasser & Jansson (2008), este cuenta con las características morfológicas de hielo desnudo, nieve y detritos para ser un glaciar de tipo contemporáneo.

El segundo elemento geomorfológico relevante es la planicie proglacial de lavado o sandur, que es una planicie formada por el depósito de sedimentos fluvioglaciales transportados por corrientes de agua frente al glaciar, marcando comúnmente un patrón de flujo trenzado sobre la superficie del sandur (Fig. 36).



Figura 35 – Registro del patrón de flujo trenzado de las corrientes de agua del frente glaciar sobre la planicie proglacial de lavado, captada desde un RPA y georreferenciado al área de estudio, tal como se muestra en la Figura 25. Elaboración propia.

Otro de los elementos morfológicos relevantes, son las morrenas y complejos morrénicos emplazados en el sandur (Pag. 37), marcando los períodos de avance y retroceso del glaciar Oriental.

Se identificaron cuatro grandes complejos morrénicos en los que serían los límites frontales o terminales, y laterales de la lengua de desbordamiento del glaciar Oriental, ocurrido durante algún periodo de Neoglaciación pasado.

La disposición de los frentes morrénicos sigue el flujo que dio forma a la cuenca, apuntando en dirección noreste, siendo divididos y separados en riberas este y oeste por el paso torrentoso del cauce principal o río Brazo Esperanza.



Figura 36 – Ubicación de los complejos morrénicos en el valle, sobre la planicie proglacial de lavado. Cada complejo corresponde a un periodo neoglacial, siendo el Complejo Morrénico I el más antiguo, avanzando en tiempo geológico hacia el Complejo Morrénico IV, formado en un periodo Neoglacial más reciente. Elaboración propia.

Los cortes transversales, presentados en la Figura 35, muestran el que sería el complejo morrénico más antiguo (A-A') y el formado más recientemente, el complejo morrénico terminal o frontal (B-B'), que represa las aguas de fusión del lago proglacial Oriental, y permiten observar la elevación del relieve, mejorando la identificación de los complejos morrénicos.

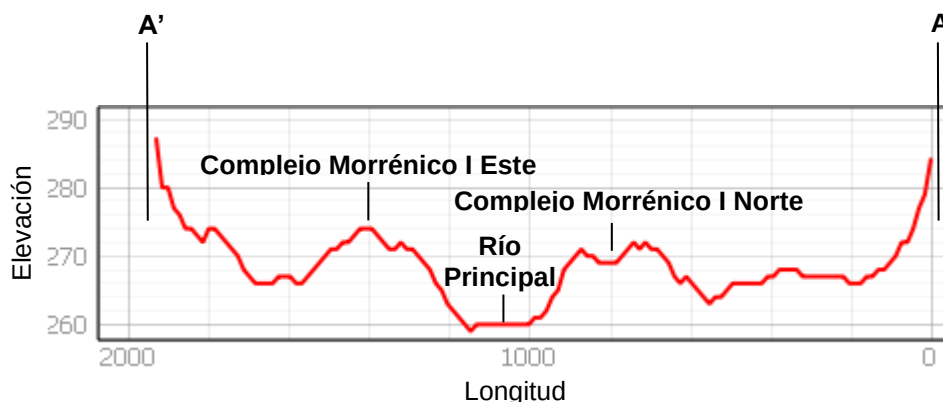


Figura 37 – Perfil Topográfico A - A' (emplazamiento del corte se muestra en la Figura 35) e identificación de geoformas. Elaboración propia



Figura 38 – Fotografía aérea de la planicie proglacial de lavado, con la ubicación de las geoformas identificadas en el Perfil Topográfico A - A', representado en la Figura 38. Elaboración propia.

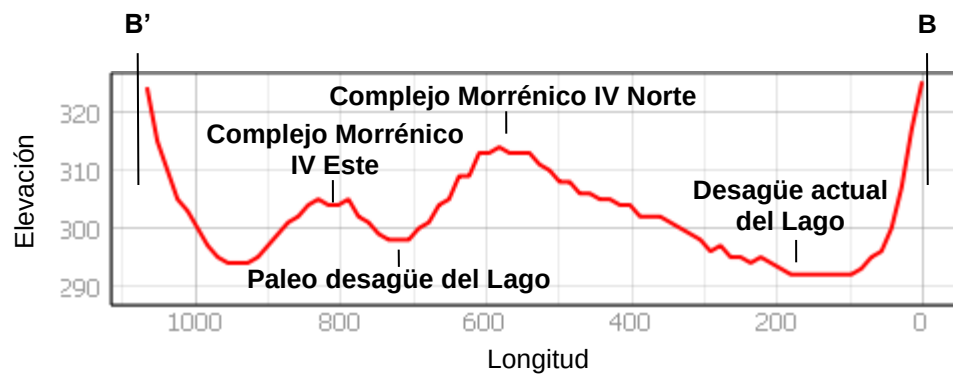


Figura 39 – Perfil Topográfico B - B' (emplazamiento del corte se muestra en la Figura 35) e identificación de geoformas. Elaboración propia.



Figura 40 – Fotografía aérea del lago y glaciar Oriental, con la ubicación de las geoformas identificadas en el Perfil Topográfico B - B', representado en la Figura 40. Elaboración propia.

Se identificaron, además, terrazas fluviales y paleocanales, ubicados sobre la planicie proglacial de lavado.

El avance del glaciar dejó consigo una enorme cantidad de rocas aborregadas o ice-scoured bedrock (rocas del basamento erosionadas por el hielo), mayormente visibles en la parte media y baja de la cuenca (Fig. 42).

La dirección del flujo quedó grabada sobre el manto rocoso como lineaciones glaciares (rasgos paralelos indicando la dirección del flujo de hielo formado por la erosión glacial o por acumulación de sedimentos sobre el basamento rocoso) (Glasser & Jansson, 2008).

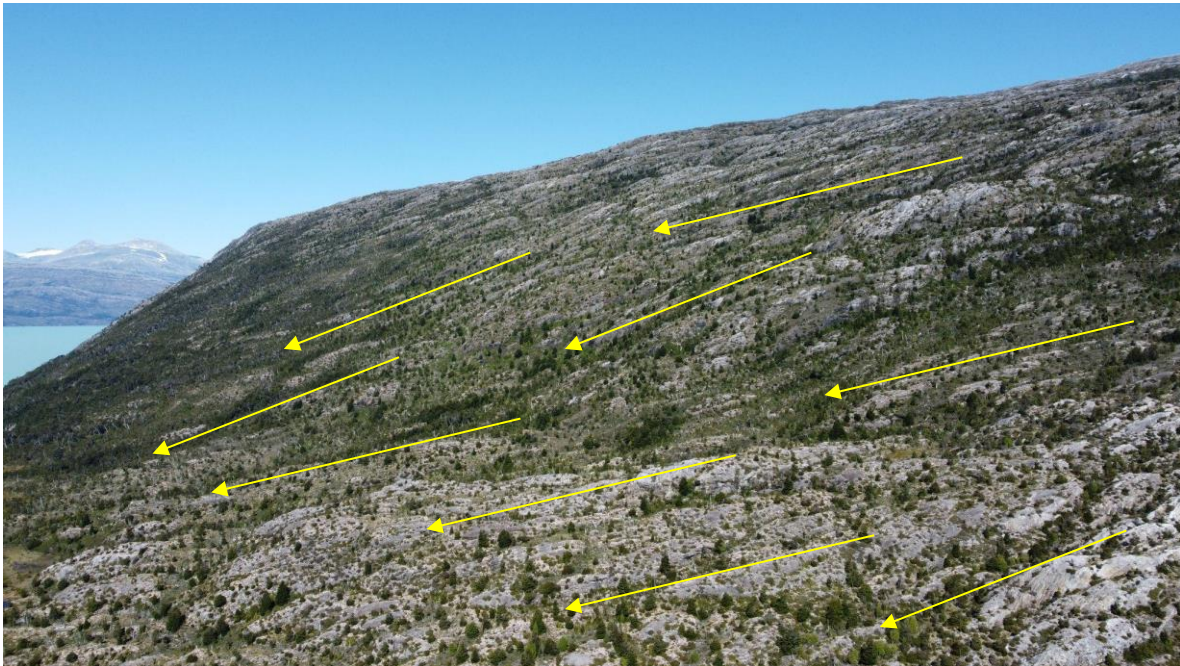


Figura 41 – Rocas aborregadas y lineamientos glaciares, indicando la dirección de flujo del glaciar Oriental, captado mediante un RPA, en el valle del glaciar Oriental. Elaboración propia.

El resto de las geoformas se identificaron en el trabajo de gabinete post-terreno, ya que, por cuestiones de interpretación, el uso de los SIG permite resaltar aspectos relevantes del relieve en terreno, imposibles de observar o detectar mediante fotointerpretación.

Se logró identificar circos en todo el sector alto de la cuenca, como también en el sector poniente del valle, en la parte media de la cuenca, y también en las zonas de contacto glaciar y sus zonas aledañas siguiendo la dirección de flujo del glaciar.

Algunos de estos circos hoy son ocupados por lagos proglaciales o por lagos de fusión glaciar, los que son rodeados por morrenas terminales y laterales, y emplazados sobre las morrenas de fondo que dejó el paso del glaciar.

El trimline marca la última gran extensión que tuvo la lengua de desbordamiento, previo a su adelgazamiento por pérdida de estabilidad en la zona de acumulación, y como se mencionó anteriormente, este también ha afectado la estabilidad de las laderas donde se sostiene el trimline, lo que ha provocado su colapso paulatino sobre el glaciar Oriental, en formas de deslizamiento de laderas o en procesos lentos como el de reptación, que avanza a medida que el glaciar pierde masa y volumen.

El resultado de la identificación se recopiló en una cartografía con la información geomorfológica de la cuenca del glaciar Oriental, más información geológica del SERNAGEOMIN y el último Inventario Público de Glaciares de la Dirección General de Aguas (DGA), para facilitar su interpretación y comprensión, representada de tal manera en la Figura 43.

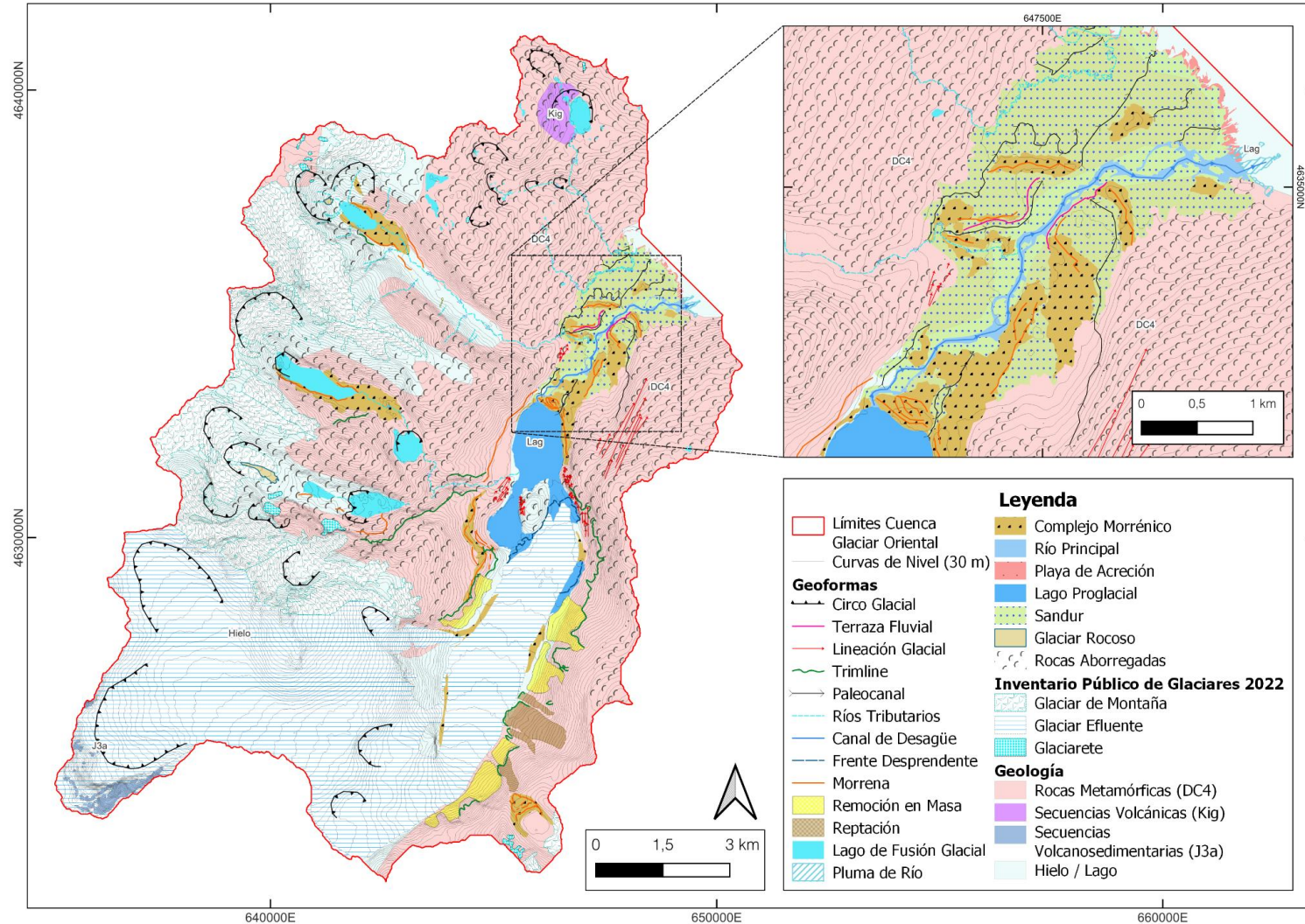


Figura 42 – Mapa geomorfológico de la cuenca del glaciar Oriental, en base a la identificación de geomorfos en gabinete y en terreno. Se complementa con información geológica en formato shape de SERNAGEOMIN (2004), junto al último Inventario Público de Glaciares de la DGA (2022). Elaboración propia.

4.4 Clasificación de las Coberturas Terrestres

Para clasificar las cubiertas de terreno, se necesitó un promedio de más de 200 muestras por cubierta definida, abordando un total de 2.000 muestras de píxel, tomadas del mosaico de bandas e índices espectrales compuesto en Google Earth Engine, para obtener el área y el porcentaje de las superficies identificadas en este proceso.

Se establecieron ocho macro clases conforme a la caracterización del paisaje realizada en gabinete y terreno, siendo, además, las que mayor destacan dentro del paisaje de la cuenca, ya sea por su extensión o por su cobertura.

La Tabla 6 enumera las clases, y la cantidad de muestras tomadas para cada una:

ID	Clase	Muestras
1	Nieve	250
2	Hielo	250
3	Cuerpo de Agua	276
4	Lago y Río Proglacial	225
5	Suelo Desnudo	290
6	Vegetación Escasa	256
7	Vegetación Densa	235
8	Turberas	218
Total		2000

Tabla 6 – Número de muestras por clases para la Clasificación Supervisada en GEE. Elaboración propia.

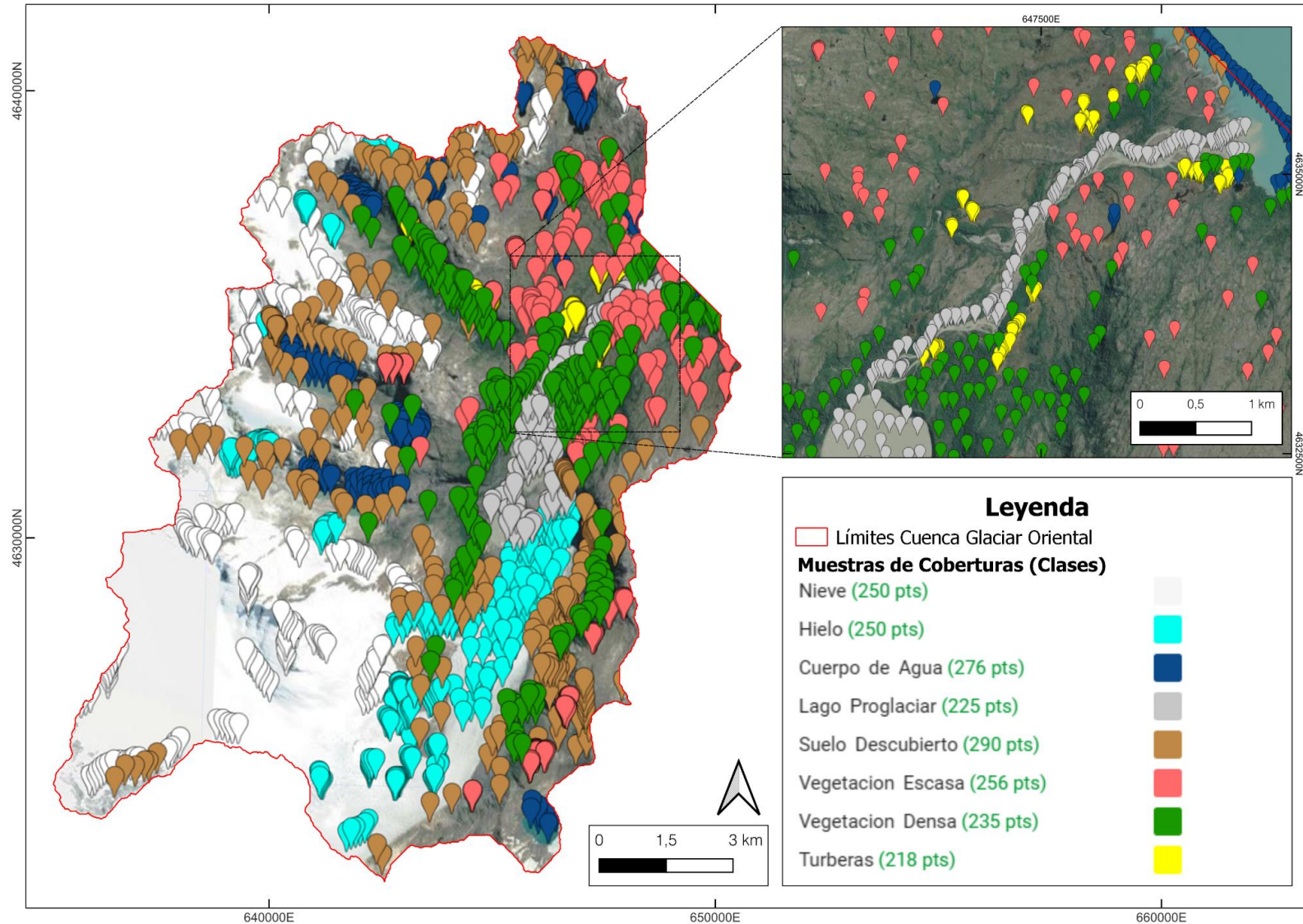


Figura 43 – Distribución espacial de las muestras tomadas de las distintas cubiertas de terreno establecidas. Elaboración propia.

Se entrenó un clasificador con las muestras recolectadas, en este caso se utilizó Random Forest, por su ventaja en comparación a otros algoritmos y por su fácil interpretación.

El entrenamiento y la predicción fueron casi perfectos, pues los resultados de la clasificación así lo demuestran. Los valores de precisión cercanos a 1 indican mayor similitud entre las muestras y el clasificador.

Los resultados de la clasificación se evalúan en función de las siguientes métricas:

- A. **Precisión global:** cuántas muestras se clasificaron correctamente.
- B. **Precisión del productor:** que tan bien predijo la clasificación de cada clase.
- C. **Precisión del consumidor (Fiabilidad):** que tan fiable es la predicción en cada clase.
- D. **Coeficiente Kappa:** que tan bien funcionó la clasificación en comparación con la asignación aleatoria.

Clases	Nieve	Hielo	Cuerpo de Agua	Lago y Río Proglacial	Suelo Desnudo	Vegetación Escasa	Vegetación Densa	Turberas	Precisión del Productor
Nieve	69	2	0	0	0	0	0	0	0,972
Hielo	0	85	0	1	0	0	0	0	0,988
Cuerpo de Agua	0	0	95	0	1	0	0	0	0,990
Lago y Río Proglacial	0	0	0	67	1	0	0	0	0,985
Suelo Desnudo	0	0	1	0	81	0	0	0	0,988
Vegetación Escasa	0	0	0	0	0	92	1	0	0,989
Vegetación Densa	0	0	0	0	0	0	74	0	1
Turberas	0	0	0	0	0	1	0	61	0,984
Precisión del Consumidor	1	0,977	0,990	0,985	0,976	0,989	0,987	1	0,987
									Precisión Global
									Coeficiente Kappa

Tabla 7 – Resultados de la Matriz de Confusión y Coeficiente Kappa de la clasificación supervisada del área de estudio Random Forest. Elaboración propia.

El resultado de la clasificación se representó en una cartografía ilustrativa del total de píxeles clasificados para cada clase para el área de la cuenca del glaciar Oriental (Fig. 45), diferenciando el emplazamiento y distribución espacial de las distintas cubiertas clasificadas en este estudio.

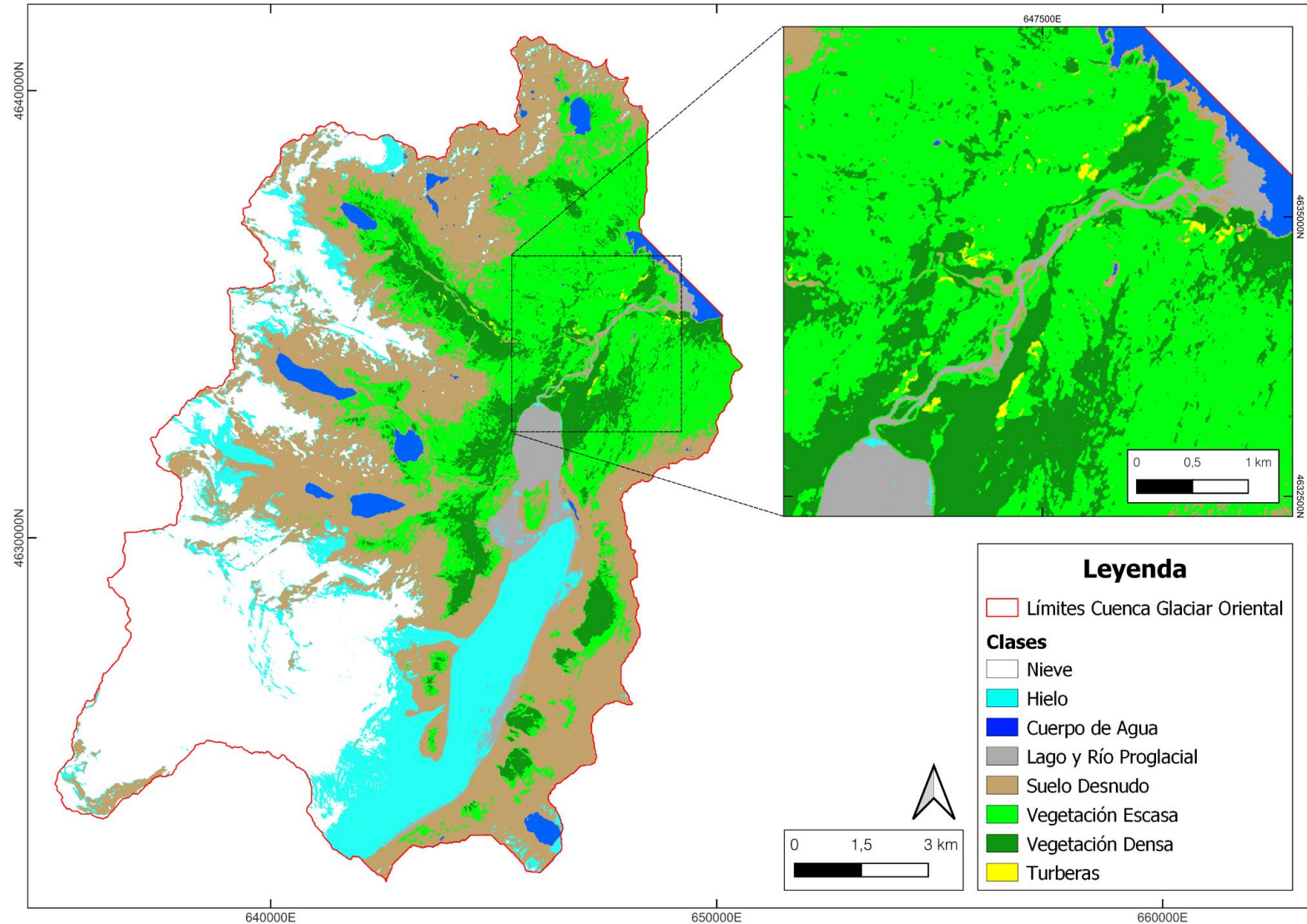


Figura 44 – Coberturas terrestres obtenidas de la Clasificación Supervisada del área de estudio en Google Earth Engine, aplicando el clasificador Random Forest. Elaboración propia.

Si comparamos los resultados de la clasificación, la clase con mayor cobertura superficial con respecto al área de la cuenca, serían los Suelos Desnudos o Descubiertos de vegetación, con más de 50 km² de superficie.

Este suelo desnudo corresponde mayoritariamente a rocas aborregadas o a las zonas de captación nival, la cual, luego de la fusión del hielo en época estival, deja al descubierto suelo o roca desnuda, ampliamente visible en la parte alta o de montaña de la cuenca.

La segunda superficie con mayor cobertura sobre el área de la cuenca es la Nieve, levemente por debajo de los 50 km² de extensión total.

Luego se presenta la Vegetación Escasa con una disminución en la cobertura de suelo, apenas superando los 30 km² de área.

Le sigue el Hielo glaciar con 20 km² y la Vegetación Densa con un poco más de 10 km² de cobertura superficial.

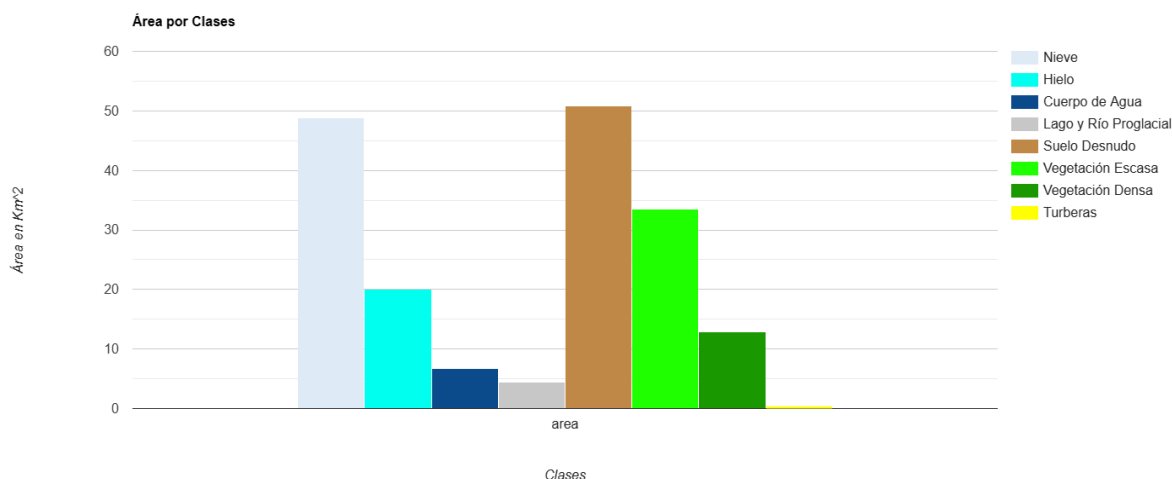


Figura 45 – Área en km² para cada cubierta identificada de terreno. Elaboración propia.

La mayor parte de la vegetación densa se concentra en las laderas de los valles y sobre los complejos morrénicos, debido a la permeabilidad del suelo que le permite emplazarse en estos lugares, a diferencia de los turbales, donde solo son posibles de encontrar en planicies y en suelos con poca o nula permeabilidad, siendo un porcentaje menor y presente preferentemente en la planicie de lavado proglacial.

De igual manera, se representaron los datos resultantes en porcentajes para poder dimensionar de mejor manera la cobertura y ocupación de los suelos sobre la cuenca del glaciar Oriental.

Área por Clases

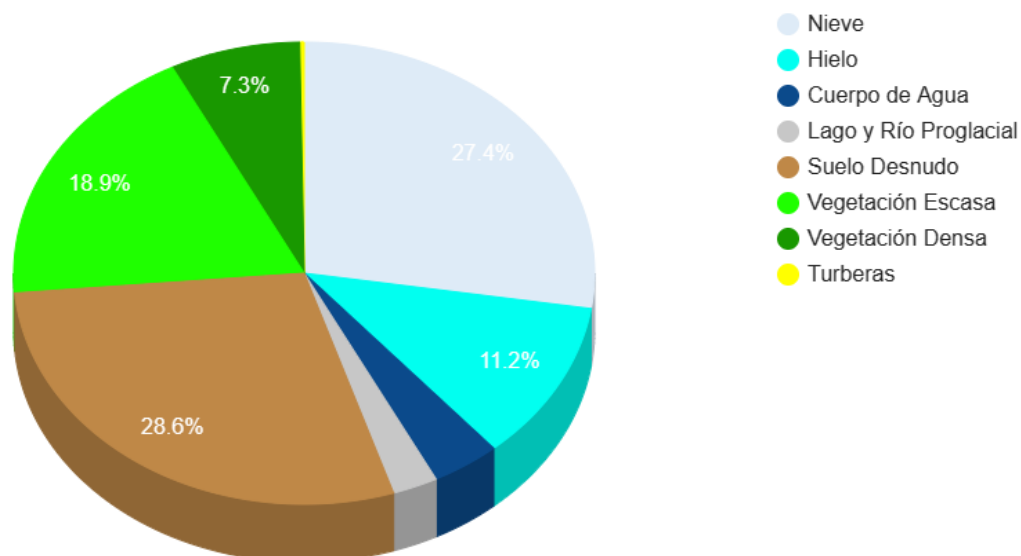


Figura 46 – Área en porcentaje para cada cubierta identificada de terreno. Elaboración propia.

5. DISCUSIONES

Este trabajo permitió proponer una caracterización de la cuenca del glaciar Oriental desde un enfoque físico y ambiental del paisaje, mediante recursos de percepción remota y el reconocimiento del área en terreno.

A pesar del cumplimiento de los objetivos general y específicos de este estudio, es necesario abordar algunos aspectos a considerar al momento de analizar la morfología del paisaje en ambientes de dinamismo glacial activo y pasivo.

5.1 Comprobación de la Información Geoespacial en Terreno

La cuenca del glaciar Oriental es poco conocida y estudiada, lo que se traduce en escasa información territorial para su gestión y manejo; sumado a esto, gran parte de la información recopilada durante la revisión bibliográfica del área de estudio, no abarca por completo la extensión del terreno (i.e. fotografías aéreas SAF y cartografías del IGM), o la escala en la que se distribuyen los datos es demasiado amplia para poder realizar una caracterización detallada de la morfología del paisaje (i.e. DEM e imágenes satelitales de libre acceso).

Esta desventaja en la información fue compensada con el reconocimiento en terreno del área de estudio y el registro fotográfico de los principales componentes del paisaje, para el posterior análisis en gabinete y comparar la información recopilada durante la revisión bibliográfica, con los nuevos datos obtenidos en terreno.

El método de identificación geomorfológico glacial utilizado por Glasser & Jansson (2008) omite muchas de las estructuras de origen glacial en el área de estudio, ante la imposibilidad de distinguir detalles en los procesos de erosión, transporte y sedimentación a escalas amplias de observación, y que solo fueron posibles de registrar en terreno, como la presencia de bloques erráticos en el valle, sobre depósitos sedimentarios, tal como muestra la Figura 48.

Resulta clara la necesidad de adquirir información precisa y de alta resolución sobre los componentes físicos y ambientales del área de estudio para caracterizar el paisaje y poder gestionar correctamente estos territorios, aunque estos parámetros pueden cambiar abruptamente ante la influencia y el riesgo asociado a la dinámica de los glaciares en el área de estudio.



Figura 47 – Bloque errático y turberas emplazadas sobre un complejo morrénico, identificado durante el reconocimiento en terreno del área de estudio. Elaboración propia.

5.2 Delimitación de Cuencas y Dinámica de Geoformas en Ambientes Glaciales

De las implicancias de realizar estudios de paisaje en ambientes glaciales, se encuentran los cambios y riesgos asociados a la dinámica de los glaciares, pues muchos de estos se encuentran actualmente activos o en proceso de retroceso, lo que podría desencadenar en la reestructuración de los componentes del paisaje previamente definidos en este estudio.

Los límites propuestos para la cuenca del glaciar Oriental responden a la topografía actual de CHPS y su extensión glaciar, quedando su estructura sujeta a las variables atmosféricas y ambientales del área en general.

Los glaciares siguen retrocediendo, y en esta dinámica estructural las geoformas identificadas están expuestas a cambios, tal como sugiere la teoría Neoglacial de Mercer (1965) y Aniya (2013), sobre la existencia de complejos morrénicos que indican tiempos de avances y retrocesos del frente glaciar, durante algunos de los cinco periodos neoglacial propuestos.

Dentro de los riesgos identificados en el reconocimiento de la cuenca del glaciar Oriental, están los desprendimientos de grandes témpanos de hielo, la acumulación de icebergs en la boca del lago proglacial Oriental, o el deslizamiento de laderas con el desencadenamiento de GLOF o el rebasamiento de las aguas de fusión del lago, cambiando la estructura y composición del paisaje, tal como se identificó y caracterizó en este estudio (Anaconda et al., 2015).

De acuerdo con lo anterior, los resultados sobre la delimitación de la cuenca, o la estructura y emplazamiento de geoformas o formaciones vegetales, se deben considerar como propuestas de caracterización, más que definiciones de la geomorfología como tal, pues el riesgo de transformaciones existe y debe ser considerada en el estudio de paisaje de ambientes glaciales como una variante constante, y es que los glaciares continúan retrocediendo.

5.3 Estructura de las Formaciones Vegetales

Las formaciones vegetales dentro del área de estudio ocupan lugares de emplazamiento bien definidos: en laderas bajo la zona de acumulación y en fondos de valle, sobre depósitos morrénicos y en sectores planos con poca infiltración, donde proliferan la formación de mallines y turberas.

Estos son el soporte físico donde la escorrentía, sedimentos y nutrientes, junto a otros factores, interactúan con condiciones climáticas favorables para la colonización biológica y posterior sucesión vegetal (Coronato et al., 2006).

Sin embargo, las observaciones en terreno dan cuenta de los efectos acelerados del cambio climático sobre las mesetas de hielo continental de CHP, y que tiene estrecha relación con el punto anterior, pues los cambios en la estructura del paisaje por las causas anteriormente mencionadas influyen directamente en la formación y emplazamiento de la vegetación en el área de estudio.

Esto se traduce en la fragmentación del paisaje, en la división estructural de corredores biológicos y la aparición de parches de vegetación, que finalmente resultan ser el refugio de especies y poblaciones de flora y fauna sumamente relevantes de preservar y conservar, ante la alta susceptibilidad a los cambios del relieve y la atmósfera en el área de estudio (Urban et al., 1987).

Así también, se registró la intervención antrópica de los bosques, con evidencia clara de la tala y quema de amplias praderas de vegetación para el uso extensivo del suelo en siglos pasados (Fig. 48), lo que mantiene hasta el día de hoy zonas sin vegetación, con un lento desarrollo de renovales y suelos degradados, con un mayor grado de susceptibilidad a procesos físicos derivados de los efectos del cambio climático global.



Figura 48 – Muestra de la quema de árboles para el uso maderero y ganadero de la extensión de la planicie de lavado, en el valle de la cuenca del glaciar Oriental. Elaboración propia.

6. CONCLUSIONES

Del estudio se concluye que el paisaje de la cuenca del glaciar Oriental se encuentra en constante evolución, debido a los procesos actuales de erosión, transporte y sedimentación registrados en terreno y que responden a la dinámica actual de los ambientes glaciales, influenciados por los cambios en las variables físicas y atmosféricas a escala local y global.

Pese a lo anterior, la cuenca del glaciar Oriental no es un paisaje prístino o sin intervención antrópica, pues los registros muestran la presencia y alteración de la estructura y de los componentes físicos del valle, mediante la tala y quema de bosques, como también la instalación de infraestructura para la permanencia y el tránsito de población civil por el lugar.

Los métodos utilizados durante el trabajo de gabinete, tanto como en el trabajo de terreno en la cuenca, presentan limitaciones, debido a la poca disponibilidad de información climática y atmosférica, como también de las escasas imágenes satelitales óptimas del área (i.e. sin nubes), que hacen necesario el reconocimiento y el registro del paisaje in situ, para obtener información detallada de las variables que conforman la estructura del paisaje.

Para esto se destaca el uso de un RPA para el levantamiento fotogramétrico del área de estudio, y a su vez, se propone la instalación de una estación meteorológica, a fin de mantener un control sobre las condiciones atmosféricas y medio ambientales que presenta la cuenca y valle del glaciar Oriental, y que podrían desencadenar en cambios en los componentes y la estructura del paisaje.

Junto a lo anterior, se propone la realización de un estudio para proveer de edades a las estructuras y geoformas identificadas en terreno, a fin de complementar con información que relacione antiguos eventos climáticos con la formación y emplazamiento actual de los componentes del área de estudio.

Esta constante dinámica del paisaje, sitúa el área de estudio como un área de interés para futuros estudios que complementen o continúen con una caracterización de la cuenca, ya desde un enfoque multidisciplinario, que entienda la cuenca del glaciar Oriental como un paisaje integrado, que facilite su gestión y manejo a futuro.

BIBLIOGRAFÍA

- Alves, K. M. A. da S., Dávila, M. C. P., García, E. D. Z., Lira, D. R. de, & Monteiro, K. de A. (2021). Caracterización morfométrica de la cuenca del Salado Bajo, Región de Atacama, Chile. *Investigaciones Geográficas*, 62, Article 62. <https://doi.org/10.5354/0719-5370.2021.64574>
- Anaconda, P. I., Mackintosh, A., & Norton, K. (2015). Reconstruction of a glacial lake outburst flood (GLOF) in the Engaño Valley, Chilean Patagonia: Lessons for GLOF risk management. *Science of The Total Environment*, 527-528, 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.04.096>
- Aniya, M. (1995). Holocene Glacial Chronology in Patagonia: Tyndall and Upsala Glaciers. *Arctic and Alpine Research*, 27(4), 311-322. <https://doi.org/10.1080/00040851.1995.12003128>
- Aniya, M. (2013). Holocene glaciations of Hielo Patagónico (Patagonia Icefield), South America: A brief review. *Geochemical Journal*, 47(2), 97-105. <https://doi.org/10.2343/geochemj.1.0171>
- Aysén, C. O. R. de P. (2005). Atlas región de Aysén 2005. S486p 8075. <https://bibliotecadigital.ciren.cl/handle/20.500.13082/14643>
- Carrasco, J. F., Casassa, G., & Rivera, A. (2002). Meteorological and Climatological Aspects of the Southern Patagonia Icefield. En G. Casassa, F. V. Sepúlveda, & R. M. Sinclair (Eds.), *The Patagonian Icefields: A Unique Natural Laboratory for Environmental and Climate Change Studies* (pp. 29-41). Springer US. https://doi.org/10.1007/978-1-4615-0645-4_4
- Carrasco, J. F., Casassa Rogazinski, G., & Rivera, A. (1998). Climatología actual del Campo de Hielo Sur y posibles cambios por el incremento del efecto invernadero. *Anales del Instituto de la Patagonia*. <http://bibliotecadigital.umag.cl/handle/20.500.11893/1180>
- Casassa Rogazinski, G., Rivera, A., Aniya, M., & Naruse, R. (2000). Características glaciológicas del campo de hielo patagónico sur. *Anales del Instituto de la Patagonia*. <http://bibliotecadigital.umag.cl/handle/20.500.11893/1450>

- Chandler, B. M. P., Lovell, H., Boston, C. M., Lukas, S., Barr, I. D., Benediktsson, Í. Ö., Benn, D. I., Clark, C. D., Darvill, C. M., Evans, D. J. A., Ewertowski, M. W., Loibl, D., Margold, M., Otto, J.-C., Roberts, D. H., Stokes, C. R., Storrar, R. D., & Stroeve, A. P. (2018a). Glacial geomorphological mapping: A review of approaches and frameworks for best practice. *Earth-Science Reviews*, 185, 806-846. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2018.07.015>
- Chandler, B. M. P., Lovell, H., Boston, C. M., Lukas, S., Barr, I. D., Benediktsson, Í. Ö., Benn, D. I., Clark, C. D., Darvill, C. M., Evans, D. J. A., Ewertowski, M. W., Loibl, D., Margold, M., Otto, J.-C., Roberts, D. H., Stokes, C. R., Storrar, R. D., & Stroeve, A. P. (2018b). Glacial geomorphological mapping: A review of approaches and frameworks for best practice. *Earth-Science Reviews*, 185, 806-846. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2018.07.015>
- Coronato, A., Roig, C., Collado, L., & Roig, F. (2006). Chapter 5 Geomorphologic emplacement and vegetation characteristics of Fuegian peatlands, southernmost Argentina, South America. En I. P. Martini, A. Martínez Cortizas, & W. Chesworth (Eds.), *Developments in Earth Surface Processes* (Vol. 9, pp. 111-128). Elsevier. [https://doi.org/10.1016/S0928-2025\(06\)09005-5](https://doi.org/10.1016/S0928-2025(06)09005-5)
- Duarte Angarita, D. J., & Sierra Bernal, S. (2022a). «Morfo cuencas» Plugin para QGIS que permite obtener la delimitación y caracterización morfométrica de una cuenca hidrográfica [bachelorThesis]. <http://repository.udistrital.edu.co/handle/11349/30635>
- Duarte Angarita, D. J., & Sierra Bernal, S. (2022b). «Morfo cuencas» Plugin para QGIS que permite obtener la delimitación y caracterización morfométrica de una cuenca hidrográfica [bachelorThesis]. <http://repository.udistrital.edu.co/handle/11349/30635>
- Fernández Martínez, M. Á. (2016). *Colonización microbiana y sucesión primaria en suelos descubiertos tras el retroceso de glaciares en Tierra del*

<https://repositorio.uam.es/handle/10486/676648>

- Fernández Quezada, C. A. (2022). *Contribución al geopatrimonio del área noreste del Campo de Hielo Sur: Sitios de interés geológico, geomorfológico y glaciológico*. <https://repositorio.unab.cl/xmlui/handle/ria/24303>
- Genge, M. (2021). *Tectonic evolution of the north-central Patagonia: A thermochronological approach* [Phdthesis, Université de Lille ; Università degli studi (Padoue, Italie)]. <https://theses.hal.science/tel-03469608>
- Giles, D. P., Griffiths, J. S., Evans, D. J. A., & Murton, J. B. (2017). Chapter 3 Geomorphological framework: Glacial and periglacial sediments, structures and landforms. *Geological Society, London, Engineering Geology Special Publications*, 28(1), 59-368. <https://doi.org/10.1144/EGSP28.3>
- Glasser, N. F., Harrison, S., Winchester, V., & Aniya, M. (2004). Late Pleistocene and Holocene palaeoclimate and glacier fluctuations in Patagonia. *Global and Planetary Change*, 43(1), 79-101. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2004.03.002>
- Glasser, N., & Jansson, K. (2008). The Glacial Map of southern South America. *Journal of Maps*, 4(1), 175-196. <https://doi.org/10.4113/jom.2008.1020>
- Godoy Gellepiani, V. C. (2017). *Variaciones petrológicas del batolito surpatagónico entre los 47.5°-48° sur: XI región de Aysén, Chile*. <https://repositorio.unab.cl/xmlui/handle/ria/3377>
- Hervé, F., Pankhurst, R. J., Fanning, C. M., Calderón, M., & Yaxley, G. M. (2007). The South Patagonian batholith: 150 my of granite magmatism on a plate margin. *Lithos*, 97(3), 373-394. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2007.01.007>
- Huamani De la Cruz, F. L., & Lazo Colqui, F. N. (2020). *Caracterización geomorfológica de una cuenca hidrográfica utilizando un modelo de elevación digital (DEM) y el software QGIS 3.10.0*. <https://repositorio.upeu.edu.pe/handle/20.500.12840/3568>

- Leger, T. P. M., Hein, A. S., Bingham, R. G., Martini, M. A., Soteres, R. L., Sagredo, E. A., & Martínez, O. A. (2020). The glacial geomorphology of the Río Corcovado, Río Huemul and Lago Palena/General Vintter valleys, northeastern Patagonia (43°S, 71°W). *Journal of Maps*, 16(2), 651-668. <https://doi.org/10.1080/17445647.2020.1794990>
- Lombaida, Z., & Israel, J. (2020). *Caracterización morfométrica y estudio hidrológico de la microcuenca del río San Francisco, cantón Gualaceo*.
- Luebert, F., & Plischoff, P. (2017). *Sinopsis bioclimática y vegetacional de Chile*. <https://biblioteca.inia.cl/handle/20.500.14001/62340>
- Mercer, J. H. (1965). Glacier Variations in Southern Patagonia. *Geographical Review*, 55(3), 390-413. <https://doi.org/10.2307/213136>
- Meza Aliaga, M., Rodríguez Valdivia, A., Corvacho Ganahín, O., & Tapia Tosetti, A. (2014). ANÁLISIS MORFOMÉTRICO DE MICROCUENCAS AFECTADAS POR FLUJOS DE DETRITOS BAJO PRECIPITACIÓN INTENSA EN LA QUEBRADA DE CAMIÑA, NORTE GRANDE DE CHILE. *Diálogo andino*, 44, 15-24. <https://doi.org/10.4067/S0719-26812014000200003>
- Mouginot, J., & Rignot, E. (2015). Ice motion of the Patagonian Icefields of South America: 1984–2014. *Geophysical Research Letters*, 42(5), 1441-1449. <https://doi.org/10.1002/2014GL062661>
- Olivares-Contreras, V. A., Mattar, C., Gutiérrez, A. G., & Jiménez, J. C. (2019). Warming trends in Patagonian subantarctic forest. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 76, 51-65. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2018.10.015>
- Ortiz Revelo, M. A. (2022). *Caracterización morfométrica de cuenca Hidrográfica del río Daule mediante modelamiento numérico para obtención de respuesta Hidrológica temprana* [masterThesis, Universidad de Guayaquil - Facultad de Ciencias Matemáticas y Físicas - Carrera de Ingeniería Civil]. <http://repositorio.ug.edu.ec/handle/redug/65143>
- Pino Dahmen, S. A. del. (2022). *Caracterización geomorfológica y cronosecuencia relativa de los registros morrénicos asociados al glaciar*

Mellizo Sur (~48.3°S). Valle proglaciar del bien nacional protegido Santa Lucía, brazo poniente del lago O'Higgins, región de Aysén, Chile.
<https://repositorio.unab.cl/xmlui/handle/ria/23439>

- Porter, S. C., & Denton, G. H. (1967). Chronology of neoglaciation in the North American Cordillera. *American Journal of Science*, 265(3), 177-210.
<https://doi.org/10.2475/ajs.265.3.177>
- Soteres, R. L., Peltier, C., Kaplan, M. R., & Sagredo, E. A. (2020). Glacial geomorphology of the Strait of Magellan ice lobe, southernmost Patagonia, South America. *Journal of Maps*, 16(2), 299-312.
<https://doi.org/10.1080/17445647.2020.1736197>
- Soteres, R. L., Sagredo, E. A., Moreno, P. I., Lowell, T. V., & Alloway, B. V. (2022). Glacial geomorphology of the central and southern Chilotan Archipelago (42.2°S–43.5°S), northwestern Patagonia. *Journal of Maps*, 18(2), 151-167. <https://doi.org/10.1080/17445647.2021.2008538>
- Tarbuck, E. J., & Lutgens, F. K. (2005). *Ciencias de la tierra: Una introducción a la geología física*. Prentice Hall.
- Troll, C. (2003). Ecología del paisaje. *Gaceta Ecológica*, 68, 71-84.
- Urban, D. L., O'Neill, R. V., & Shugart, H. H. (1987). Landscape Ecology. *BioScience*, 37(2), 119-127. <https://doi.org/10.2307/1310366>
- Vila i Subirós, J., Varga, D., Llausàs Pascual, A., & Ribas Palom, A. (2006). Conceptos y métodos fundamentales en ecología del paisaje (landscape ecology): Una interpretación desde la Geografía. *Documents d'anàlisi geogràfica*, 48, 151-166.
- Zúñiga González, J. L. (2016). *Generación de modelos tridimensionales a partir de fotogrametría y su aplicación en geología estructural*.
<https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/141334>

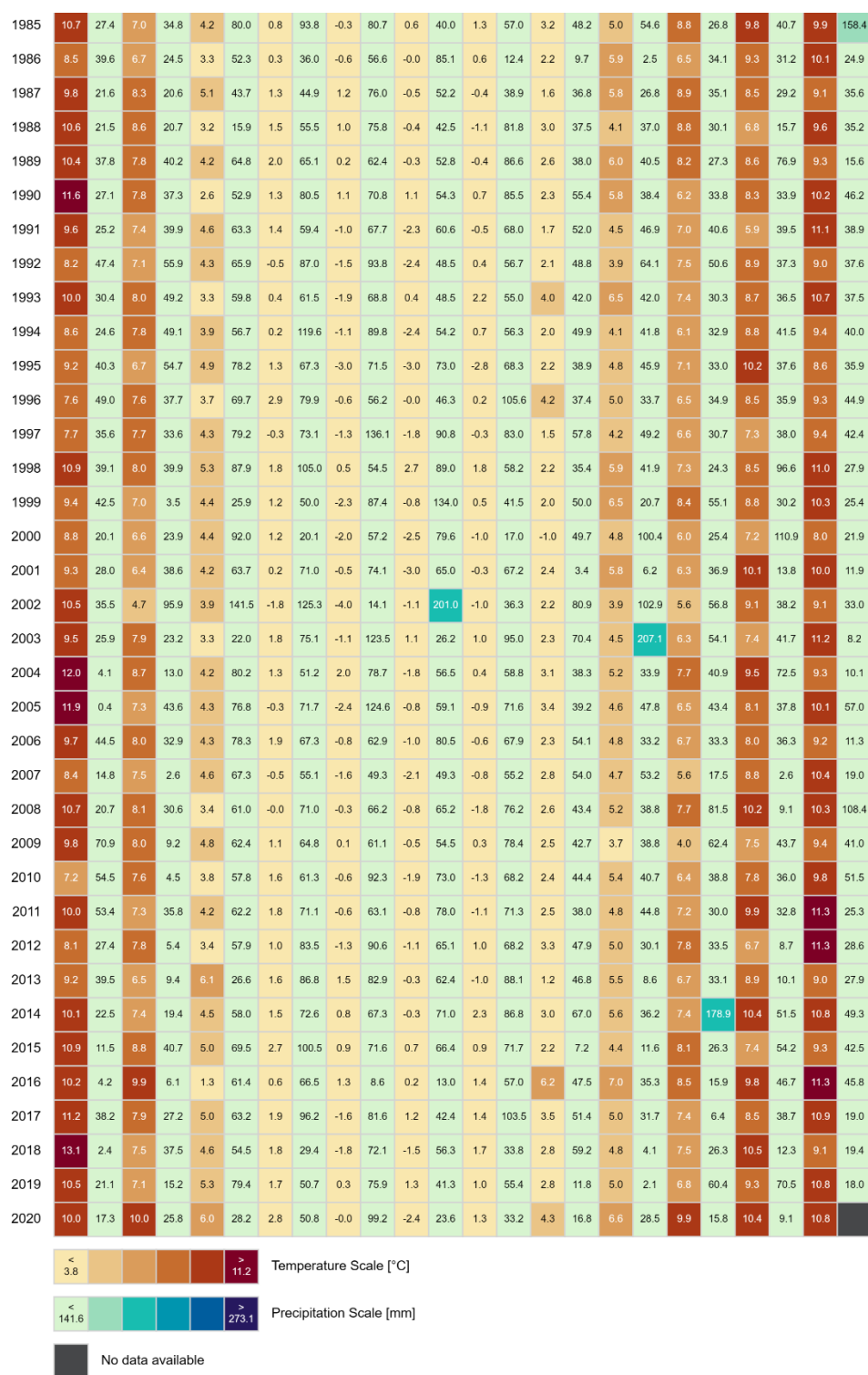
ANEXOS

Villa O'higgins, Aysén, Chile

48.5S, 72.592W | Elevation: 252 m | Climate Class: ET | Years: 1948-2020

Availability of Climate Data

	Jan		Feb		Mar		Apr		May		Jun		Jul		Aug		Sep		Oct		Nov		Dec	
	Temp	Prec	Temp	Prec	Temp	Prec	Temp	Prec	Temp	Prec	Temp	Prec	Temp	Prec	Temp	Prec	Temp	Prec	Temp	Prec	Temp	Prec	Temp	Prec
1948	11.1	0.0	7.4	25.7	6.6	92.0	2.8	110.2	1.6	150.3	-1.3	13.9	-1.8	0.0	2.9	69.0	5.7	0.0	8.1	0.0	10.5	110.8	12.2	90.5
1949	10.0	27.9	8.0	135.1	6.5	157.9	1.5	101.8	1.0	306.0	0.5	37.6	1.6	91.0	4.0	30.2	6.5	6.7	9.5	92.1	9.4	86.7	10.3	63.5
1950	12.0	108.7	9.8	133.4	5.1	87.5	1.4	81.5	1.3	60.3	1.6	56.9	-0.6	62.0	1.1	49.6	5.3	4.4	6.4	0.0	8.9	70.7	10.1	36.0
1951	9.4	30.4	7.5	73.4	6.6	50.3	2.2	68.8	-1.6	54.0	-0.6	37.8	3.3	72.8	1.1	22.3	4.6	27.6	6.3	47.9	11.2	17.1	11.2	22.9
1952	11.9	14.7	7.4	47.4	5.8	50.0	1.6	98.8	-0.8	46.9	1.6	57.7	1.6	59.0	4.9	33.1	6.7	29.1	9.4	33.6	11.1	11.2	10.7	61.3
1953	12.6	70.8	8.9	80.2	4.9	69.8	2.5	90.0	0.5	83.2	-1.0	98.1	1.8	110.3	3.1	74.7	5.2	80.8	8.0	76.3	11.0	6.2	10.3	18.6
1954	10.8	28.1	9.7	13.8	4.7	52.5	1.3	52.4	-1.8	23.1	-0.5	48.5	1.1	55.3	2.2	30.2	6.0	19.0	8.1	3.2	8.9	35.8	11.1	47.1
1955	9.6	32.6	8.6	30.8	5.0	103.1	1.6	69.2	-1.3	97.6	-1.5	67.7	0.4	88.9	2.7	42.9	6.6	23.7	9.7	39.4	8.7	97.9	8.5	87.6
1956	9.8	28.7	8.0	59.6	3.6	61.8	1.4	43.9	1.4	83.2	1.5	47.0	1.7	79.4	2.8	32.0	6.5	11.9	9.7	4.8	11.5	17.3	10.6	58.0
1957	11.6	0.7	10.2	31.9	5.5	38.9	1.6	85.6	-0.0	60.0	-0.4	58.9	-0.0	99.3	2.9	47.8	4.8	20.6	8.5	26.0	9.3	50.9	10.5	48.5
1958	8.8	41.5	9.5	13.9	5.5	75.4	-0.3	109.2	-1.3	62.4	1.5	80.9	0.5	75.2	3.0	39.5	7.8	30.2	7.0	41.7	9.4	43.5	10.0	64.3
1959	11.2	32.3	7.7	49.7	1.1	59.1	1.5	58.8	0.3	52.0	-1.3	54.5	0.4	88.4	2.5	47.4	4.4	48.2	7.8	25.2	9.9	19.4	12.5	49.1
1960	12.3	41.0	9.6	29.6	5.8	49.0	3.2	84.8	-0.9	59.9	0.3	53.4	1.8	55.5	3.5	44.4	5.9	41.4	8.8	26.0	9.3	29.1	8.9	44.0
1961	9.8	41.3	7.1	34.5	3.6	57.6	1.4	62.7	-2.0	75.7	-2.3	57.2	0.7	70.8	2.0	48.0	5.6	34.0	7.4	29.4	9.1	30.6	10.2	36.2
1962	11.0	24.5	8.8	34.4	4.8	63.9	2.6	61.6	0.5	97.3	1.0	44.1	0.5	71.9	3.8	41.2	7.2	38.6	8.0	38.8	10.1	36.5	8.8	48.4
1963	11.3	25.4	6.7	50.9	3.1	125.5	1.5	68.3	-0.6	94.1	-1.3	96.8	-0.8	100.2	0.2	83.6	5.2	54.8	5.9	36.5	8.8	41.8	10.4	43.7
1964	8.5	31.1	6.5	50.0	3.9	60.5	0.4	76.0	-3.3	48.3	-0.3	48.2	-0.3	77.9	1.2	52.0	5.9	36.9	7.8	36.4	9.0	42.5	9.4	43.7
1965	8.3	31.6	8.3	31.8	3.3	106.7	-0.8	85.9	-0.3	82.2	-3.8	72.4	0.3	96.0	2.3	46.8	4.6	35.8	7.2	64.9	7.1	33.6	10.1	38.6
1966	8.5	28.7	7.7	38.7	5.3	70.1	2.5	178.8	-0.5	105.3	-2.4	93.2	0.6	60.4	2.5	45.1	3.9	39.5	7.9	32.9	8.1	35.0	9.0	55.3
1967	8.9	24.7	7.6	39.4	5.4	60.7	0.8	89.4	-0.8	60.4	-0.8	70.8	-0.5	89.7	2.4	38.9	4.5	56.0	7.4	32.4	9.0	31.6	10.1	39.2
1968	8.4	23.9	7.0	29.6	5.2	50.0	3.3	45.2	0.7	43.4	1.1	63.0	1.8	64.1	2.7	67.7	4.4	31.9	7.8	28.9	7.8	39.3	9.5	37.8
1969	9.2	26.1	7.9	32.9	5.0	85.9	0.6	80.8	-0.3	79.4	-1.5	54.9	1.2	98.9	2.1	76.6	4.0	51.9	7.1	9.7	9.7	16.9	9.8	38.3
1970	10.1	38.1	7.0	18.9	4.3	40.4	0.9	138.3	-0.4	99.5	-0.1	53.6	-0.1	28.6	3.4	52.3	5.3	6.3	7.5	4.3	7.2	39.0	6.6	53.0
1971	8.0	8.3	7.1	67.7	3.9	30.1	-0.3	60.8	-1.9	53.1	-1.1	126.1	0.9	155.8	3.6	72.3	5.5	45.1	7.0	45.6	6.1	33.1	9.2	92.7
1972	8.2	53.0	6.0	40.1	6.2	59.9	-0.9	57.6	-2.3	52.7	-1.3	39.1	-1.8	24.6	2.1	36.8	3.5	60.6	8.5	3.0	10.0	17.4	8.0	55.2
1973	9.5	10.3	8.2	63.9	3.7	57.3	0.5	70.9	-0.8	95.6	-3.0	49.8	1.2	106.9	3.0	44.9	5.4	7.2	7.3	23.6	9.1	18.2	8.2	41.8
1974	8.9	28.6	7.9	41.0	5.2	53.1	-0.3	88.7	-0.6	24.2	-0.5	77.3	0.9	146.0	2.8	52.2	5.6	21.0	6.5	27.4	9.0	15.3	10.9	22.1
1975	9.1	32.3	8.1	32.6	4.9	51.7	1.1	36.1	-0.3	50.4	-0.8	31.2	-0.0	128.1	2.7	77.0	5.2	21.2	6.1	61.2	6.9	27.1	7.6	51.8
1976	10.7	53.5	5.5	31.0	4.2	88.7	1.9	132.9	-2.1	17.7	-1.1	127.8	0.8	48.9	3.0	29.3	4.6	2.6	6.7	37.7	6.7	128.1	9.2	92.5
1977	9.4	17.3	7.9	43.6	4.5	195.7	1.3	85.7	-0.1	134.5	-3.3	19.4	0.4	113.9	2.8	72.2	5.3	39.6	6.4	38.3	10.2	10.2	10.1	46.4
1978	11.5	20.9	8.3	13.7	5.3	39.2	1.5	85.8	-0.3	43.0	-0.4	33.8	0.5	73.5	3.7	31.1	4.5	64.3	7.4	39.7	9.3	35.1	11.3	23.2
1979	10.5	12.7	7.9	35.9	5.9	73.7	1.0	45.9	1.2	105.1	0.5	146.0	0.3	80.9	1.7	122.1	4.2	77.0	6.1	62.4	9.5	20.8	10.6	19.1
1980	9.0	46.1	7.5	148.7	1.8	78.9	1.3	149.4	-0.0	122.3	-1.4	48.4	0.7	201.5	3.7	138.5	5.8	17.0	6.3	84.4	8.6	80.7	9.8	52.3
1981	10.0	28.5	7.1	45.1	4.6	71.2	0.6	78.0	-0.3	103.0	0.8	62.6	1.3	58.6	2.0	48.9	6.2	38.3	6.9	36.7	8.7	33.6	11.4	37.6
1982	9.4	29.8	7.7	41.5	5.4	53.6	2.3	71.7	-3.1	56.6	-5.6	57.8	-0.4	104.6	2.0	67.5	4.1	62.4	7.1	42.0	9.5	28.8	11.1	41.5
1983	9.3	31.2	7.7	49.0	5.0	59.5	1.4	45.0	-0.9	49.6	-0.0	63.9	1.1	59.3	2.3	39.1	5.4	42.5	8.4	28.3	10.6	42.4	10.1	39.8
1984	8.8	24.3	7.7	27.7	4.5	59.7	-2.3	69.9	-3.5	57.2	-3.8	58.2	-0.4	54.7	3.8	49.8	5.0	36.4	8.0	41.6	10.2	48.0	11.3	35.2



Data Source: GHCN CAMS and GPCC v2022
<https://dx.doi.org/10.1029/2007JD008470>

ClimateCharts.net

Anexo 1 – Datos climáticos disponibles para la comuna de Villa O'Higgins, entre los años 1948 - 2022, utilizados en la elaboración del diagrama climático Walter Lieth, tal como se muestra en la Figura 5. Fuente de datos: GHCN CAMS & GPCC v2022. Fuente: Climate Charts (2022).

