



UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES
INGENIERÍA EN CONSERVACIÓN DE RECURSOS NATURALES

**DINÁMICA DE LOS GLACIARES Y SU RELACIÓN CON LAS VARIABLES
CLIMÁTICAS EN EL SANTUARIO DE LA NATURALEZA MEULLIN PUYE,
REGIÓN DE AYSÉN**

Tesis presentada a la Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad de
Concepción para otorgar al título profesional Ingeniera en Conservación de
Recursos Naturales

POR: Elizabeth Alexandra Quezada Placencia

Profesor Guía: Mauricio Aguayo Arias

Junio, 2024

Concepción, Chile

© 2024, Elizabeth Alexandra Quezada Placencia

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento

DINÁMICA DE LOS GLACIARES Y SU RELACIÓN CON LAS VARIABLES
CLIMÁTICAS EN EL SANTUARIO DE LA NATURALEZA MEULLIN PUYE,
REGIÓN DE AYSÉN

Profesor Guía



Mauricio Aguayo Arias

Profesor Titular

Ingeniero Forestal, PhD

Profesor Guía



David González Lanteri

Profesor Titular

Ingeniero Forestal, PhD

Profesor colaborador



Cristina Acosta Muñoz

Investigadora Universidad de Córdoba

Ciencias ambientales, MSc

DEDICATORIA

A mi gran amor Ana Salgado.

A ti que merecías estar presente en este momento del que tantas veces hablamos, era tu sueño y el mío. Te extraño cada día de mi vida, pero sé que tu cariño está en cada paso que doy. Te agradezco por amarme desde que conocí este mundo, cuidarme incansablemente y por confiar en mí siempre, este logro es nuestro. Gracias por enseñarme que el amor se transforma y que aún en tu ausencia, puedo sentirlo.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quiero agradecer a las personas más importantes en mi vida, mi mamá Ermela Placencia y mi papá José Quezada que, con su amor y apoyo incondicional he cumplido cada uno de mis sueños. Les agradezco por darme la oportunidad de estudiar, estar conmigo en cada decisión y motivarme a alcanzar mis metas, sin ustedes nada de esto sería posible, los amo.

Agradezco a mi hermana Yennifer por su cariño y constante aliento, Anahis por su amor incondicional y a mi tía Yessica por sus palabras sinceras y llenas de amor. A mi familia que vivió y se alegró de cada uno de mis logros en especial a mi tío Pedro y mis tías Mitzi y Ana que me animaban y con su ayuda logre realizar mi pasantía en España. A Raúl, mi compañero de vida estos años que me ha llenado de alegrías y amor infinito, gracias por estar y cuidarme siempre. A mis amigos, que admiro y agradeceré siempre a la vida haber coincidido con ellos.

Agradezco enormemente a mi profesor guía Mauricio Aguayo Arias quien me dio libertad de investigar un tema que me apasiona, gracias por su apoyo, preocupación constante y calidez en cada conversación. Asimismo, a mi profesor David González por entregarme su conocimiento y palabras de apoyo. Finalmente, a Cristina Acosta, profesora española a quien admiro y es un ejemplo a seguir de mujer en la ciencia, gracias por el apoyo en todo el proceso.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	x
ABSTRACT	xii
I. INTRODUCCIÓN	1
II. METODOLOGÍA.....	7
2.1 Descripción del área de estudio.....	7
2.2 Selección de imágenes satelitales	10
2.3 Extracción de la superficie glaciar	15
2.4 Tasa de cambio	15
2.5 Análisis estadístico	16
III. RESULTADOS.....	19
3.1 Tratamiento de imágenes satelitales	19
3.2 Variación de superficie glaciar	21
3.3 Análisis estadístico	29
IV. DISCUSIÓN	39
V. CONCLUSIONES.....	47
VI. GLOSARIO	49
VII. BIBLIOGRAFÍA	52
VIII. APÉNDICE.....	55
IX. ANEXOS	65

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Imágenes satelitales disponibles entre los años 1973 y 2022.	13
Tabla 2. Banda espectral utilizada para el cálculo de NDSI según satélite Landsat. En paréntesis, la abreviatura que se utiliza en GEE para utilizar la banda.....	14
Tabla 3. Expresión matemática utilizada para el cálculo de NDSI.	15
Tabla 5. Variación del área superficial glaciar en el periodo 1985-2022.....	27
Tabla 6. Precipitación acumulada en el periodo 1985-2022.	30
Tabla 7. Temperaturas medias en el periodo 1985-2022	32
Tabla 8. Resultado de correlación entre la superficie glaciar y los años que comprende el estudio.....	34
Tabla 9. Resultado de correlación entre la superficie glaciar y la precipitación acumulada.	35
Tabla 10. Resultado de correlación entre la superficie glaciar y la temperatura media	36
Tabla 11. Proyección de la superficie glaciar con el modelo matemático de Alva y Meléndez.....	42
Tabla 12. Precipitación acumulada anual en la estación pluviométrica Aysen Ad.	66
Tabla 13. Datos para el análisis de regresión lineal de superficie y precipitación acumulada en los meses de noviembre a marzo.....	66
Tabla 14. Datos para el análisis de regresión lineal de superficie y temperatura media	67
Tabla 15. Características de Landsat 5	68
Tabla 16. Características de Landsat 8	69
Tabla 17. Características de Landsat 9	70

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Figura 1. Ubicación de la zona de estudio Santuario de la Naturaleza Meullín Puye, Región de Aysén, Chile.	7
Figura 2. Interfaz de la plataforma Google Earth Engine.	11
Figura 3. Malla de puntos ingresada en la plataforma GEE para la obtención de la temperatura de la superficie terrestre.....	17
Figura 4. Resultado del cálculo del índice NDSI en el visualizador de la plataforma GEE. En la letra a) tenemos el año 1985, b) el año 2004, c) el año 2014, d) el año 2016, e) el año 2020 y f) el año 2022.	20
Figura 5. Variación superficial glaciar en el periodo 1985-2022.....	22
Figura 6. Lagos proglaciares en el año 2022.....	24
Figura 7. Frentes glaciares del volcán Maca. En el lado izquierdo tenemos los polígonos de las superficies para cada año de estudio y en el lado derecho tenemos una imagen aérea de Google Earth Pro.....	26
Figura 8. Gráfico de variación en la superficie glaciar en el periodo 1985-2022.	28
Figura 9. Precipitación acumulada en el periodo 1985-2022.	31
Figura 10. Temperaturas medias en el periodo 1985-2022.	32
Figura 11. Análisis de regresión lineal entre la superficie y la precipitación acumulada	37
Figura 12. Análisis de regresión lineal entre la superficie y la temperatura media	38
Figura 13. Código de la plataforma GEE para la obtención de imágenes satelitales y cálculo de índice NDSI. Es importante mencionar que este es un código tipo para Landsat 5 sin embargo los otros 2 códigos (Landsat 8 y 9) sigue el mismo formato, pero se cambia la colección y bandas.	55
Figura 14. Código de la plataforma GEE para la obtención de la temperatura de la superficie terrestre. Es importante mencionar que este es un código tipo para Landsat 5 sin embargo los otros 2 códigos (Landsat 8 y 9) sigue el mismo formato, pero se cambia la colección y bandas.	57
Figura 15. Vectorización superficie glaciar 1985.....	59
Figura 16. Vectorización superficie glaciar 2004.....	60

Figura 17 .Vectorización superficie glaciar 2014.....	61
Figura 18. Vectorización superficie glaciar 2016.....	62
Figura 19. Vectorización superficie glaciar 2020.....	63
Figura 20. Vectorización superficie glaciar 2022.....	64
Figura 21.Precipitación acumulada anual en la estación pluviométrica Aysén Ad.	65

RESUMEN

En las últimas décadas, la criósfera ha experimentado una significativa reducción, especialmente en glaciares y mantos de hielo. Se realizó una investigación en el Santuario de la Naturaleza Meullín-Puye, Región de Aysén, con el objetivo de analizar la dinámica glaciar para el periodo 1985 - 2022 y establecer su relación con variables climáticas tales como precipitación acumulada y temperatura media. A través de la plataforma Google Earth Engine se obtuvieron imágenes satelitales de los satélites Landsat y se calculó el Índice Diferencial Normalizado de Nieve el que fue reclasificado según el umbral 0.4 el cual indica la presencia de nieve. Posteriormente, los archivos ráster reclasificados fueron vectorizados para cuantificar los cambios de superficie de la cobertura glaciar. Se realizaron pruebas de correlación de Pearson para analizar la relación entre la superficie glaciar y las variables climáticas. Además, se llevó a cabo una regresión lineal para modelar la relación entre la pérdida de cobertura glaciar y dichas variables climáticas, evaluando el coeficiente de determinación R^2 . De acuerdo con los resultados, la superficie glaciar ha disminuido 21.05 km² entre los años 1985 y 2022, lo que equivale a un 53.4% de la superficie inicial. Los análisis estadísticos muestran que las variables climáticas están correlacionadas e influyen en el retroceso glaciar. Se concluyó que existe una tendencia de retroceso por lo que es relevante proteger y estudiar estos ecosistemas con el fin de generar

información valiosa para la gestión y conservación de estos ecosistemas dependiente de esta fuente de recursos hídrico.

ABSTRACT

In recent decades, the cryosphere has experienced a significant reduction, especially in glaciers and ice sheets. An investigation was carried out in the Meullín-Puye Nature Sanctuary, Aysén Region, with the objective of analyzing glacier dynamics for the period 1985 - 2022 and establishing its relationship with climatic variables such as accumulated precipitation and mean temperature. Using the Google Earth Engine platform, satellite images were obtained from Landsat satellites and the Normalized Differential Snow Index was calculated and reclassified according to the 0.4 threshold, which indicates the presence of snow. Subsequently, the reclassified raster files were vectorized to quantify the surface change of glacier cover. Pearson correlation tests were performed to analyze the relationship between glacier area and climatic variables. In addition, a linear regression was carried out to model the relationship between glacier cover loss and these climatic variables, evaluating the coefficient of determination R^2 . According to the results, the glacier area has decreased by 21.05 km² between 1985 and 2022, which is equivalent to 53.4% of the original area. Statistical analyses show that climatic variables are correlated and influence glacial retreat. It was concluded that there is a trend of retreat, so it is relevant to protect and study these ecosystems in order to generate valuable information for the management and conservation of these ecosystems dependent on this source of water resource.

I. INTRODUCCIÓN

En los últimos decenios la capa de la tierra formada por masas de hielo, conocida como criósfera, ha manifestado una gran reducción en su extensión, donde los glaciares y mantos de hielo, los que se estima cubren un 10% de la superficie terrestre, han sufrido pérdidas de masa probablemente en respuesta al notable calentamiento atmosférico observado a partir de la segunda mitad de la década de 1970 (CECS, 2009).

Según el IPCC los glaciares corresponden a una “masa permanente de hielo sobre tierra originada por nieve comprimida; muestra evidencias del flujo pasado y presente (mediante deformación interna y/o deslizamiento de su base) y está constreñido por el estrés interno y por el rozamiento de su base y de sus lados. Los glaciares se mantienen por la acumulación de nieve en grandes altitudes, compensada por la fusión en altitudes bajas y por la descarga vertida al mar.” (IPCC, 2013).

En cuanto a su importancia ecológica, la criósfera alberga hábitats únicos los cuales están interconectados con componentes del sistema climático mediante el intercambio mundial de agua, energía y carbono (Pörtner et al., 2019). Han existido condiciones de oscilación climática y recurrencia de periodos glaciales durante el Pleistoceno donde se crearon barreras geográficas que hoy se

traducen en un taxon con distribuciones geográficas ampliamente separadas, dando origen a refugios de alta diversidad genética (Rivera et al., 2021).

Debido a los cambios que ha experimentado la criósfera, muchas especies han visto alterado su área de distribución, población y zonas de establecimiento debido al retroceso relacionado a la aparición de tierra que solía estar cubierta por el hielo y la prolongación de la estación sin nieve, alterando el funcionamiento de los ecosistemas generando impactos en cascada en la estructura y composición de las especies. Por ejemplo numerosas especies marinas han experimentado modificaciones en su área de distribución geográfica en respuesta al calentamiento de los océanos, cambio del hielo marino y cambios biogeoquímicos (Pörtner et al., 2019).

Estos ecosistemas son también buenos indicadores de cambio climático, debido al registro histórico que dejan lo cual se relaciona con las variaciones que presenta el clima (CECS, 2009) tanto para el presente como para establecer proyecciones climáticas futuras (Yparraguirre et al., 2021), convirtiéndose en sistemas muy vulnerables a los efectos del cambio climático que está en curso actualmente (Rivera et al., 2021).

En cuanto a su relación con los recursos hídricos, los glaciares cumplen un doble papel en la disponibilidad del agua. En primer lugar, actúan como reservorios

naturales que almacenan la precipitación de los meses más lluviosos en estado sólido para luego liberarla gradualmente en los meses más secos, lo que nivela la disponibilidad de agua a lo largo del tiempo. Por otro lado, representan una reserva de agua vital, la que debido al sostenido retroceso glaciar experimentado en los últimos milenios, se ha estado liberando agua de manera lenta hacia las diferentes cuencas que ellos alimentan (CECS, 2009).

Desde la pequeña edad de hielo, la retirada del hielo dejó zonas abandonadas que hoy albergan numerosos lagos proglaciares, algunos de estos lagos han sido represados por morrenas de empuje, mientras que otros se han formado en los márgenes glaciares, retenidos por el hielo. En este sentido, una parte sustancial del agua de derretimiento se ha almacenado en lagos, humedales y en el subsuelo con material cuaternario no consolidado, en lugar de ser totalmente liberada al mar (Rivera et al., 2021).

Chile no está ajeno a esta realidad de retrocesos y fluctuaciones ya que los Andes Patagónicos albergan la mayor extensión de glaciares en todo el hemisferio sur, excluyendo la Antártida (Ruiz et al., 2022). Sin embargo, en la actualidad presentan importantes reducciones en la cobertura glaciar (Rivera & Bown, 2013). La cordillera de los Andes muestra una costa glaciar con profundos recortes y vastos campos de hielo en su interior. En la cordillera costera occidental de la Patagonia, los volcanes Mentolat, Cay, Macá y Hudson, junto

con el complejo Erasmo se destacan como las mayores masas de hielo anteriores a la extensión de los principales campos de hielo patagónicos (Barcaza et al., 2018).

Los glaciares de los Andes chilenos parecen estar reduciéndose y posiblemente perdiendo masa (Pellicciotti et al., 2014). Así se evidencia en el volcán Macá donde el área de hielo experimentó una reducción del 38% (Rivera & Bown, 2013). Asimismo, en la mayoría de los glaciares del CHN y CHS se ha observado una marcada disminución en su superficie en las últimas décadas, y esta tendencia parece estar intensificándose (Rivera et al., 2021).

En cuanto al estudio de estos ecosistemas, los nuevos avances en sensores remotos permiten una mayor exactitud para estimar la superficie glaciar (CECS, 2009) y han sido cruciales para el desarrollo de inventarios u otros análisis (Ruiz et al., 2022) quedando en evidencia que la utilización de imágenes satelitales a lo largo del tiempo tiene un gran potencial en el monitoreo de factores ambientales y ecológicos (Aguayo et al., 2009). Sin embargo, se requieren imágenes con poca o nula presencia de nubes para lograr una delimitación precisa de los glaciares; de lo contrario, se puede generar una sobrestimación o incertidumbre en las superficies glaciares (CECS, 2009).

Las medidas científicas y políticas recientes han mejorado el conocimiento de los glaciares y su papel hidrológico. Sin embargo, es crucial continuar con inventarios y programas de vigilancia periódicos para evaluar los cambios en la masa de hielo. Estas acciones son fundamentales para desarrollar políticas ambientales sólidas y estrategias de mitigación y adaptación frente al cambio climático en los Andes patagónicos (Ruiz et al., 2022). Esto último, debido a que se espera que la pérdida de masa de los glaciares, el deshielo del permafrost y la disminución del manto de hielo a nivel global, junto con la reducción del hielo marino del Ártico, continúen en el corto plazo (2031-2050) (Pörtner et al., 2019). Igualmente, los futuros escenarios de cambios en la cobertura glaciar dependerán de las trayectorias que sigan las variables climáticas a lo largo de la Patagonia (Ruiz et al., 2022).

La relevancia de esta investigación radica en la reciente creación del Santuario de la Naturaleza Meullín-Puye. En este contexto, se han identificado los objetos de conservación para la gestión del santuario, destacándose dos elementos que están estrechamente relacionados con este estudio: las geoformas, que incluyen los volcanes Cay y Maca, y el sistema hídrico, donde los glaciares desempeñan un papel crucial y su deshielo afecta al resto del sistema. El propósito de esta investigación es proporcionar información pertinente para la elaboración del plan de manejo del Santuario y respaldar la necesidad de ampliar su superficie.

En este contexto de preocupación global por el acelerado retroceso de los glaciares surge la necesidad de estudiarlos, comprender su comportamiento y hacer esfuerzos para su conservación. Por lo anterior, este trabajo tiene como objetivo general “Evaluar la dinámica glacial y su relación con las variables climáticas en el Santuario de la naturaleza Meullin-Puye.”

Los objetivos específicos para llevar a cabo esta investigación son:

- (i) Analizar el retroceso glacial en las últimas cuatro décadas mediante el uso de imágenes satelitales.
- (ii) Cuantificar la pérdida de cobertura glacial.
- (iii) Determinar la relación entre las variables climáticas y la pérdida de cobertura glacial.

II. METODOLOGÍA

2.1 Descripción del área de estudio

El área de estudio comprende el Santuario de la Naturaleza Meullín-Puye (45°10'17"S,72°57'9"W) el cual se encuentra en la cuenca del río Cuervo y la cuenca del Río Tabo, comuna y provincia de Aysén en la región de Aysén del general Carlos Ibáñez del Campo (Figura 1).

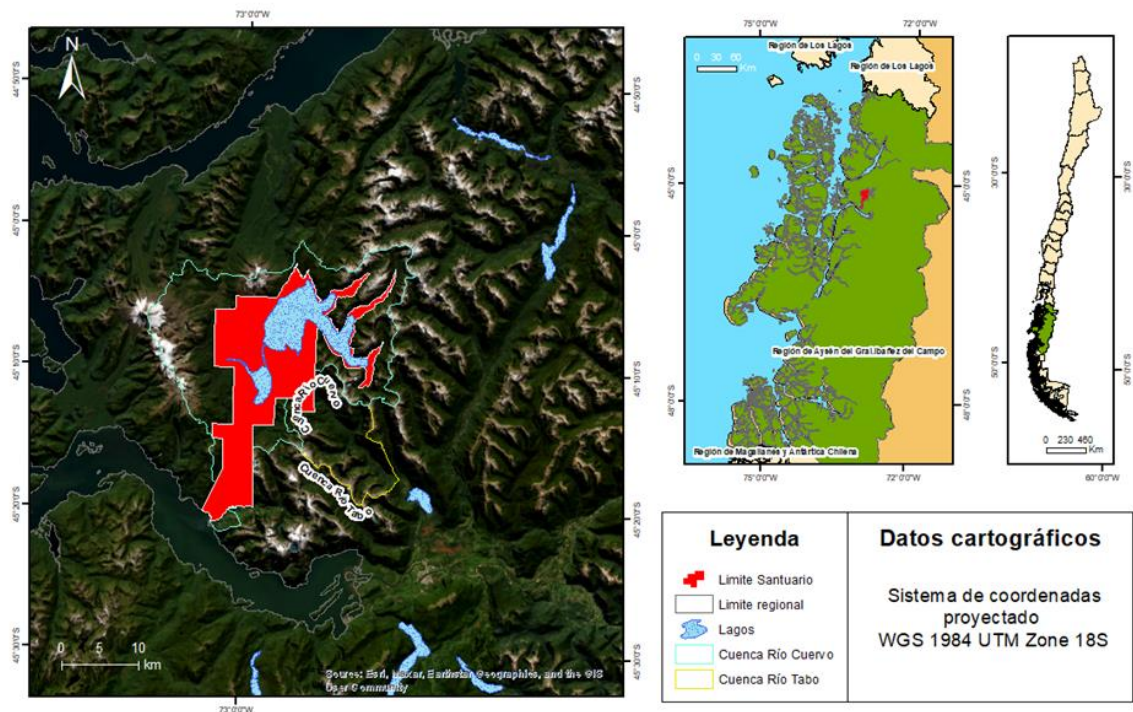


Figura 1. Ubicación de la zona de estudio Santuario de la Naturaleza Meullín Puye, Región de Aysén, Chile.

El Santuario abarca una superficie aproximada de 29.542 hectáreas y comprende diversos tipos de ambientes, incluyendo áreas cubiertas de vegetación, cuerpos de agua, sectores con nieves y glaciares, y lechos de ríos. Entre estos ambientes, destacan las turberas, que se distribuyen en las inmediaciones del nacimiento del río Cuervo al sur del lago Meullín, en el sector bajo del estero Barrientos, en el sector alto del nacimiento del río Macá, y al norte del río Pangal (MMA, 2023).

La zona estuarina presente en el área conserva las características oceanográficas de los ecosistemas marinos de los fiordos y canales Patagónicos, siendo algunas de las áreas biogeoquímicamente más activas de la biósfera. Además, la desembocadura del río Cuervo constituye una importante zona de alimentación y desove para varias especies de peces marinos o estuariales, como el puye (*Galaxias platei*), que da nombre a este Santuario (CNM, 2023).

Respecto de la vegetación, la formación que predomina en el área es el bosque nativo adulto denso, cubriendo aproximadamente el 47% de la superficie del santuario, la que corresponde a tres pisos vegetacionales:

- Bosque siempreverde templado interior de *Nothofagus betuloides* y *Desfontainia spinosa*.
- Bosque caducifolio templado andino de *Nothofagus pumilio* y *Ribes cucullatum*.
- Matorral caducifolio templado andino de *Nothofagus antártica*.

En cuanto a la fauna se han registrado 11 especies de anfibios, 77 de aves y 20 de mamíferos, algunas de las especies más representativas de este lugar son el carpintero negro (*Campephilus magellanicus*), la becacina (*Gallinago magellanica*), el puma (*Puma concolor*), el pudú (*Pudu puda*), el huillín (*Lontra provocax*), el puye gigante (*Galaxias platei*), la ranita de Darwin (*Rhinoderma darwinii*) y la güiña (*Leopardus guigna*) (FundacionKreen, 2023).

Desde el punto de vista de su hidrografía cuenta con una red hídrica que fluye desde los glaciares hasta el fiordo donde destacan los lagos Yultón y Meullín, este último da origen al río Cuervo. Además, se destaca la presencia de varios lagos de menor tamaño en las nacientes de valles o circos glaciares, constituyendo lagos proglaciares y cuerpos de agua que cubren cerca del 24% de superficie del área (MMA, 2023).

Una característica importante de este lugar es que no existe evidencia aparente de incendios, talas, ni presencia de salmónidos, lo cual evidencia hábitats prístinos que necesitan de protección por sus importantes funciones ecosistémicas, entre las que destacan su rol en la regulación del ciclo del agua y nutrientes, mitigación del cambio climático y soporte a la biodiversidad, esenciales para sostener la vida (MMA, 2023).

El clima en la comuna de Aysén se encuentra inserto bajo el dominio de dos zonas: húmeda e intermedia. La primera posee un clima marítimo templado frío lluvioso, con precipitaciones de régimen semi anual, que oscilan entre 2.000 y 4.000 milímetros. Durante todo el año presenta un superávit hídrico (entre 100 y 340 milímetros). Tiene baja luminosidad, y la influencia oceánica aplaca las fluctuaciones de temperatura. En el sector insular son menos habituales las heladas, pero éstas aumentan hacia el interior. La temperatura media estival oscila entre 10° y 13°C, mientras que en invierno fluctúa entre 4° y 7°C (GORE, 2009)

2.2 Selección de imágenes satelitales

Para la obtención de imágenes satelitales se utilizó la plataforma de análisis geoespacial Google Earth Engine (GEE) que permite procesar, analizar y visualizar datos geoespaciales a escala global donde combina un catálogo con petabytes de imágenes de satélite y conjuntos de datos geoespaciales con capacidades de análisis a escala planetaria. Esta plataforma facilita el procesamiento de información en la nube, eliminando la necesidad de ocupar memoria del computador local. Además, ofrece dos API gratuitas: la API de JavaScript y la API de Python, que permiten realizar análisis de grandes conjuntos de datos. También proporciona acceso libre y gratuito a funciones para

el análisis de imágenes, así como para la descarga y almacenamiento de datos (hasta 15 GB).

En cuanto a su interfaz, existen cuatro componentes principales: 1) la biblioteca del usuario donde se encuentran los códigos almacenados y paquetes de software ya establecidos por la plataforma; 2) el editor de scripts que permite escribir y ejecutar códigos para el procesamiento y análisis de datos; 3) la consola de resultados donde se visualizan los productos del código ejecutado, permitiendo la exportación de estos en diversos formatos, como Geo TIFF, CSV y KML; y 4) el visualizador de mapas que permite mostrar conjuntos de datos geoespaciales, navegar por la zona de estudio y agregar marcadores (Figura 2).

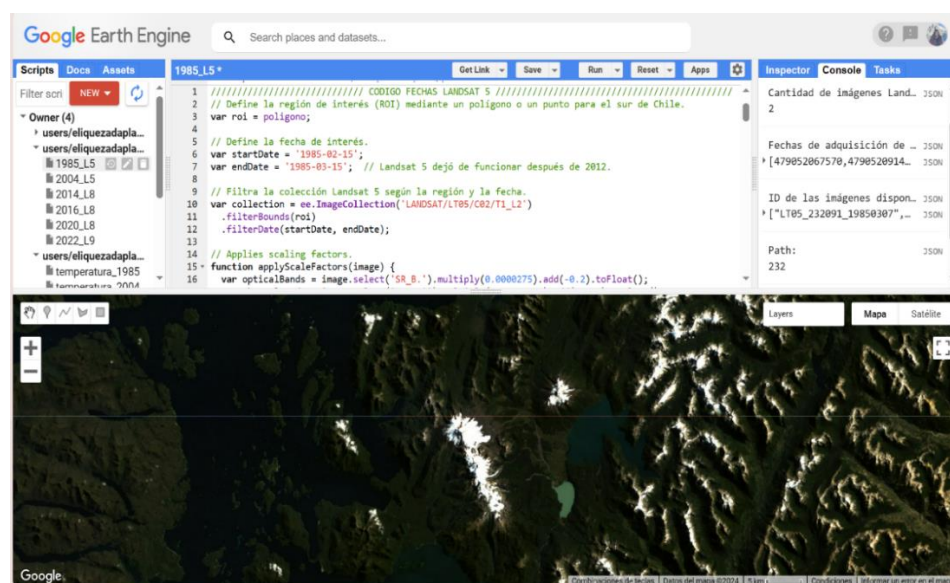


Figura 2. Interfaz de la plataforma Google Earth Engine.

En este estudio se utilizaron imágenes Landsat debido a su disponibilidad histórica desde el inicio de operaciones en 1972, proporcionando registros continuos, resolución espacial de 30 m siendo esta suficiente para identificar y definir glaciares, calidad de imagen y compatibilidad con herramientas de análisis.

Para la creación del código se siguió el siguiente flujo de trabajo:

- Definición de la región de interés (ROI): delimitación de la región de interés mediante la creación de un polígono que abarcó el área de la zona de estudio, actuando como un filtro espacial.
- Selección de fechas y colección de imágenes Landsat: Selección de imágenes Landsat un periodo temporal significativo (1980 a la actualidad), entre los días 15 de febrero a 15 de marzo correspondiente al final del periodo estival con el propósito de contar con la menor cantidad de nieve en superficie para identificar más fácilmente las áreas de los glaciares (Gari et al., 2016).
- Filtrado de imágenes satelitales: Para reducir la cantidad de nubes y asegurar la calidad de los datos se consideraron imágenes con nubosidad inferior al 20%.
- Aplicación de escalado y corrección de imágenes: Las imágenes Landsat seleccionadas fueron sometidas a procesos de escalado y corrección radiométrica para mejorar la precisión y la coherencia entre las diferentes bandas espectrales. Esto implica la aplicación de factores de escala y corrección a las

bandas ópticas y térmicas de las imágenes, lo que garantiza la comparabilidad entre las diferentes escenas y fechas.

Las imágenes que cumplieron con los requerimientos de esta investigación junto a sus características quedan resumidas en la Tabla 1. El código (script) utilizado se encuentra en el Apéndice.

Tabla 1. Imágenes satelitales disponibles entre los años 1973 y 2022.

Fecha	Satélite	Código	Path	Row	Resolución
07/03/1985	Landsat 5	LT05_232091_19850307	232	91	30
11/03/2004	Landsat 5	LT05_232091_20040311	232	91	30
19/02/2014	Landsat 8	LC08_232091_20140219	232	91	30
12/03/2016	Landsat 8	LC08_232091_20160312	231	92	30
20/02/2020	Landsat 8	LC08_232092_20200220	231	92	30
17/02/2022	Landsat 9	LC09_232091_20220217	232	91	30

2.2 Cálculo de índice normalizado

Posterior a la obtención de las imágenes satelitales Landsat, se aplicó el Índice Diferencial Normalizado de Nieve (NDSI), propuesto por Jeff Dozier en 1989, para identificar y mapear la cobertura de nieve en el área de estudio.

Este índice se calcula utilizando la banda verde, que es altamente reflectante en superficies cubiertas de nieve, y la banda del infrarrojo cercano, que es absorbida por la nieve (Tabla 2 y 3). La alta reflectancia en la banda verde permite distinguir fácilmente la nieve de otras superficies, mientras que la absorción en la banda del infrarrojo cercano ayuda a diferenciar la nieve de elementos como el agua y la vegetación, que también pueden mostrar alta reflectancia en la banda verde pero no en el infrarrojo cercano. Los valores de NDSI igual o superior a 0.4 representan adecuadamente la capa de nieve (Barcaza et al., 2018; Dozier, 1989).

$$NDSI = \frac{GREEN - SWIR}{GREEN + SWIR}$$

Tabla 2. Banda espectral utilizada para el cálculo de NDSI según satélite Landsat. En paréntesis, la abreviatura que se utiliza en GEE para utilizar la banda.

Satélite	Banda verde	Banda infrarroja
Landsat 5	Banda 2 (SR_B2)	Banda 5 (SR_B5)
Landsat 8	Banda 3 (SR_B3)	Banda 6 (SR_B6)
Landsat 9	Banda 3 (SR_B3)	Banda 6 (SR_B6)

Tabla 3. Expresión matemática utilizada para el cálculo de NDSI.

Satélite	Expresión matemática
Landsat 5	$(\text{Banda 2} - \text{Banda 5}) / (\text{Banda 2} + \text{Banda 5})$
Landsat 8	$(\text{Banda 3} - \text{Banda 6}) / (\text{Banda 3} + \text{Banda 6})$
Landsat 9	$(\text{Banda 3} - \text{Banda 6}) / (\text{Banda 3} + \text{Banda 6})$

2.3 Extracción de la superficie glaciar

Para la extracción de la superficie glaciar, se descargaron los archivos ráster en formato TIFF, obtenidos mediante el cálculo del NDSI para cada año de estudio. Esto se realizó con el propósito de asegurar su compatibilidad con las herramientas de Sistemas de Información Geográfica (SIG). En este proceso, se reclasificaron los píxeles con valores superiores a 0.4, seguido de una vectorización de la cobertura glaciar y filtrado de las áreas que no corresponden a la superficie glaciar. Finalmente, se obtuvo el área en kilómetros cuadrados.

2.4 Tasa de cambio

Se calculó la tasa de retroceso anual en base a la superficie glaciar estimada en cada año en $\text{km}^2/\text{año}$. La fórmula utilizada para calcular la tasa de retroceso anual es la siguiente:

$$Tasa\ de\ cambio = \frac{Cambio\ total}{(Año\ actual - Año\ anterior\ disponible)}$$

2.5 Análisis estadístico

Para saber la implicancia de las variables climáticas, se relacionó la pérdida de cobertura glacial obtenida en el análisis de las imágenes satelitales con la precipitación acumulada entre los meses noviembre-marzo y la temperatura media. En este análisis la variable dependiente corresponde a la superficie glacial y las variables independientes son precipitación acumulada entre los meses noviembre-marzo y la temperatura media.

Respecto a las precipitaciones, se obtuvieron datos de la estación meteorológica más cercana al área de estudio en el explorador climático del CR2 (explorador.cr2.cl), que corresponde a la estación Puerto Aysén Ad (45°23'46"S, 72°39'50"O), donde los datos que contiene son descargables en formato CSV para poder hacer su posterior análisis. El periodo de tiempo que se utiliza para los análisis corresponde a los meses de noviembre y diciembre del año anterior al año de estudio y los meses de enero, febrero y marzo del año en estudio.

En lo que respecta a las temperaturas, se empleó la plataforma Google Earth Engine (GEE). Se definió una malla de puntos dentro del área de estudio y se desarrolló un código para extraer la Temperatura de la Superficie (LST, por sus

siglas en inglés). En este código, se identifica la banda térmica apropiada en las 6 imágenes Landsat utilizadas (1985, 2004, 2014, 2016, 2020 y 2022) que típicamente corresponde a la banda 6, la cual registra la radiación infrarroja de onda larga emitida por la superficie terrestre. Luego, se calcula el promedio de temperatura en cada punto de interés. Estos datos se descargan en formato CSV para su análisis posterior. El código utilizado para la obtención de las temperaturas se encuentra en el Apéndice.

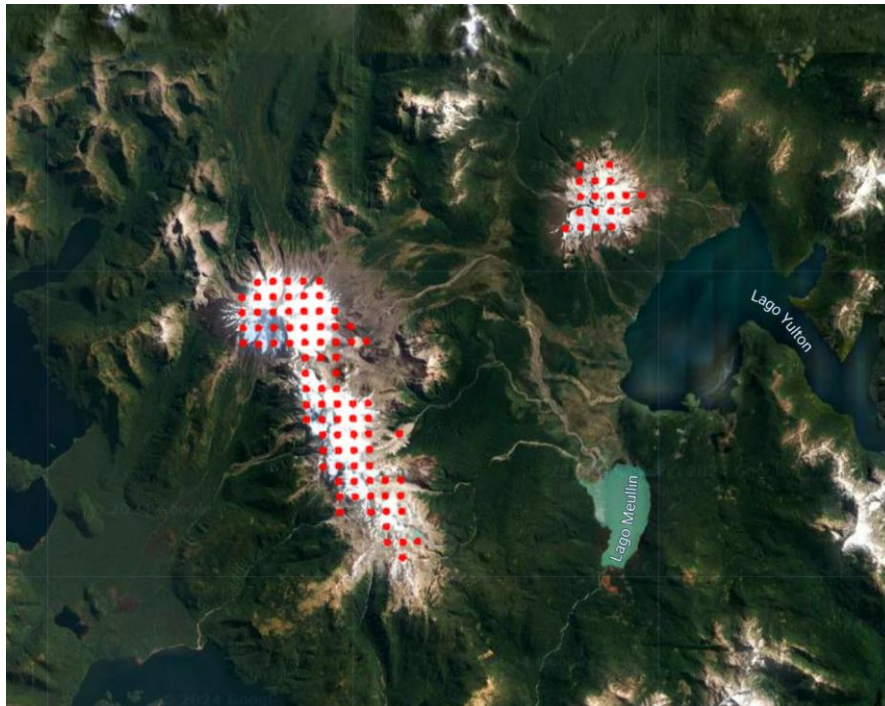


Figura 3. Malla de puntos ingresada en la plataforma GEE para la obtención de la temperatura de la superficie terrestre.

Posterior a la obtención de los datos de precipitación y temperatura se realizó un análisis de correlación para examinar la relación entre la pérdida de cobertura glacial, la precipitación acumulada y la temperatura media. Para tales efectos, se calculó el coeficiente de correlación de Pearson para determinar si existe una relación lineal entre estas variables.

A su vez, se llevó a cabo una regresión lineal para modelar la relación entre la pérdida de cobertura glacial y las variables climáticas (precipitación acumulada y la temperatura media) obteniéndose el coeficiente de determinación R^2 que indica la proporción de la variabilidad en la variable dependiente que es explicada por el modelo.

Finalmente, se llevó a cabo un análisis de tendencia de Mann-Kendall con el objetivo de identificar la presencia de una tendencia significativa (ascendente o descendente) a lo largo del período de estudio en relación a las variables de superficie, precipitación acumulada y temperatura media. En este análisis se realizaron dos pruebas. La primera prueba utilizó un intervalo de confianza del 95%, correspondiente a un nivel de significancia de 0.05. La segunda prueba consideró un intervalo de confianza del 90%, con un nivel de significancia de 0.1.

III. RESULTADOS

3.1 Tratamiento de imágenes satelitales

El proceso de obtención de la superficie glaciar entre los años 1985-2022 comenzó con el tratamiento de las imágenes satelitales disponibles en este periodo. Es importante mencionar que solo se pudieron obtener 6 imágenes (1985, 2004, 2014, 2020 y 2022) satelitales debido principalmente a que el área de estudio se encuentra en la zona sur del país donde se presenta alta nubosidad lo que dificulta obtener imágenes en buena calidad.

En cuanto al tratamiento de las imágenes se aplicó el índice espectral índice de diferencia normalizada (NDSI) el cual resalta la cobertura nival del resto de los elementos en la imagen aprovechando que la nieve tiene una alta reflectancia y absorción en los canales visible e infrarrojo de onda corta respectivamente. El resultado del cálculo de este índice para los 6 años con imágenes disponibles se puede ver en la Figura 4.

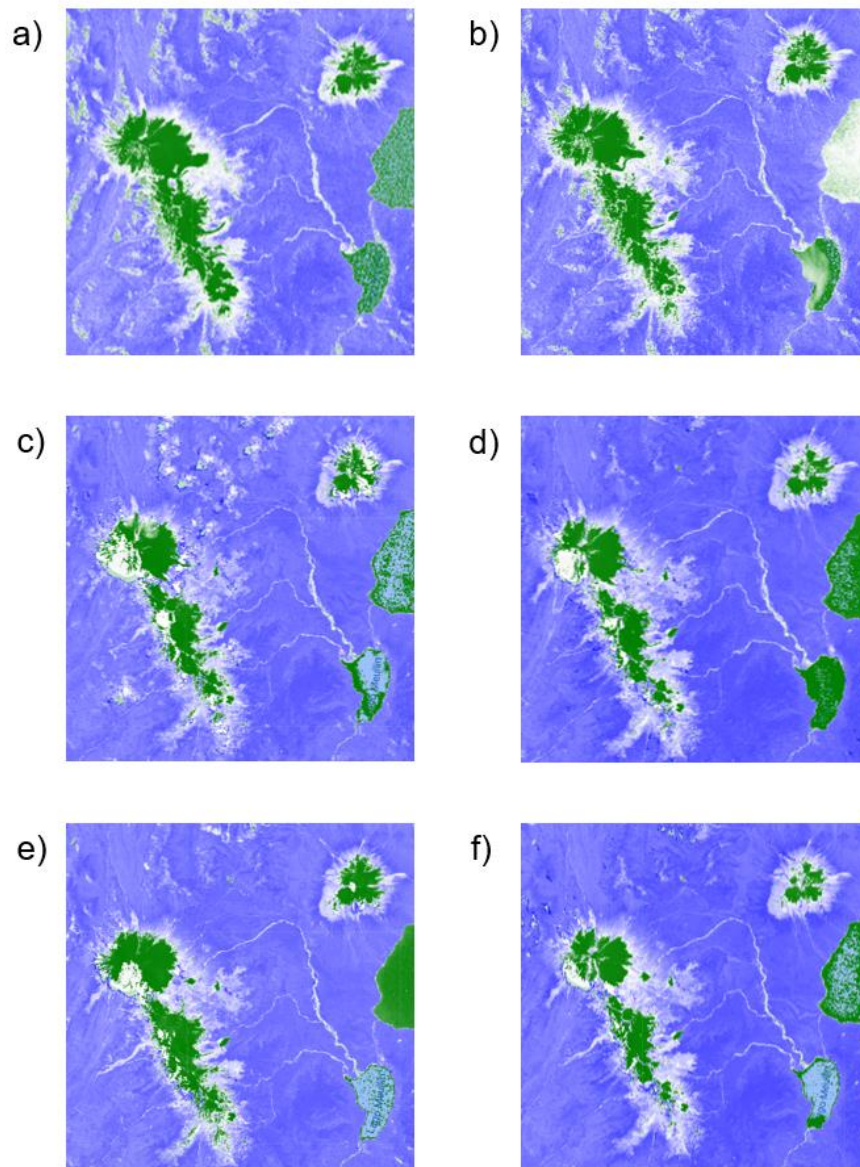


Figura 4. Resultado del cálculo del índice NDSI en el visualizador de la plataforma GEE. En la letra a) tenemos el año 1985, b) el año 2004, c) el año 2014, d) el año 2016, e) el año 2020 y f) el año 2022.

Se puede observar una clara disminución de las áreas con valores altos de NDSI a lo largo de las 4 décadas estudiadas lo que indica una pérdida significativa de cobertura glaciar en el Santuario de la Naturaleza Meullín-Puye. Las áreas con mayor retroceso se encuentran en las zonas de menor altitud mientras que las áreas más altas demuestran mayor resistencia a los cambios.

3.2 Variación de superficie glaciar

Mediante el uso de imágenes satelitales Landsat se pudo observar y cuantificar el cambio de la cobertura glaciar en el periodo 1985-2022 donde se evidencia que los glaciares pertenecientes al área de estudio, que involucra a los volcanes Maca y Cay, están experimentando un retroceso significativo.

En la Figura 5 se pueden observar los cambios que ha experimentado la superficie glaciar en el periodo estudiado. Si se compara el año inicial 1985 (rojo) y el año final del estudio 2022 (amarillo) observamos que los glaciares cubrían una superficie notablemente mayor y se han ido reduciendo conforme pasa el tiempo. Este patrón de retroceso se mantiene en toda la extensión del área de estudio, evidenciando una tendencia sostenida de pérdida de cobertura glaciar durante los últimos 37 años.

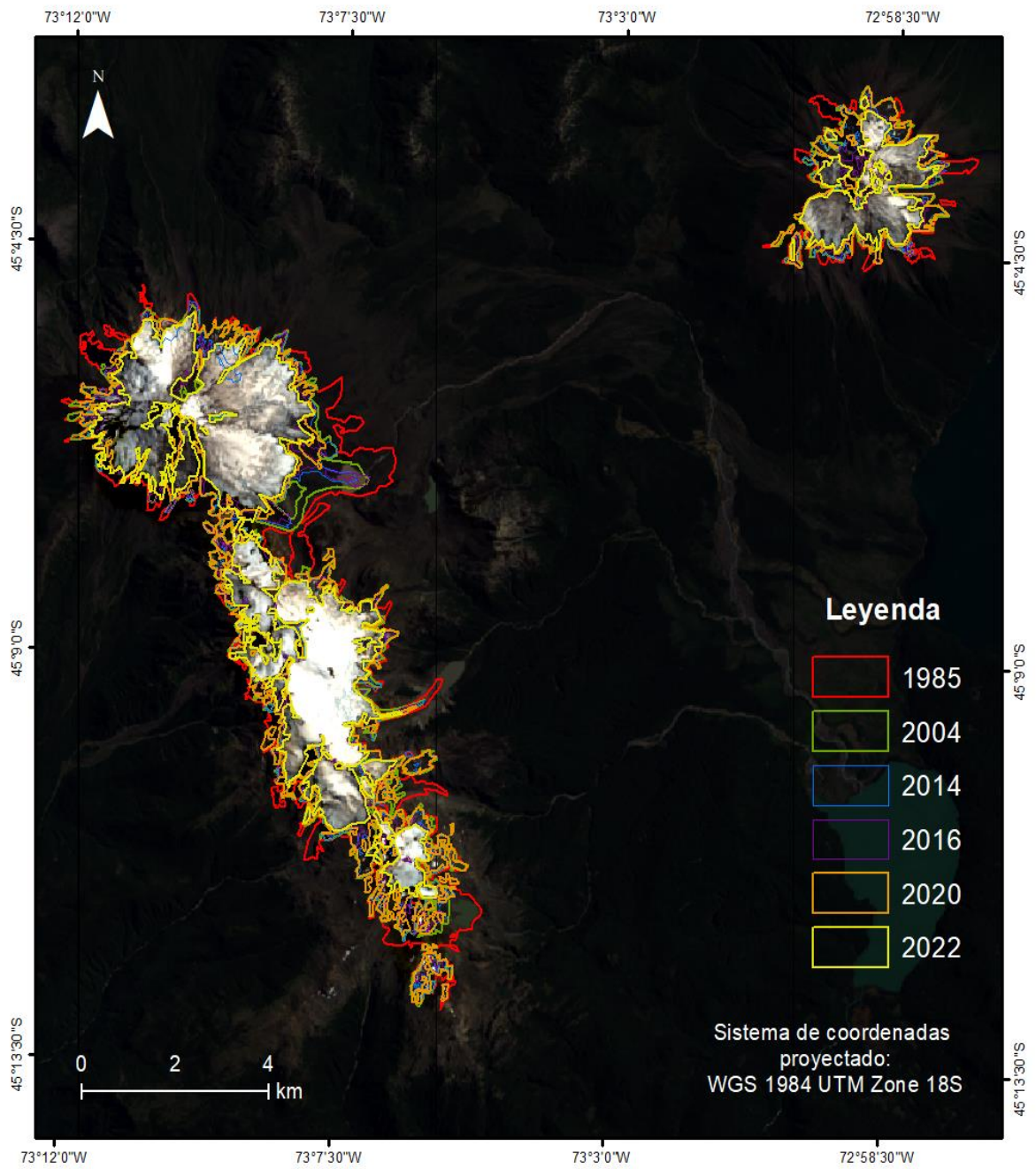


Figura 5. Variación superficial glaciar en el periodo 1985-2022.

En el año 1985 la superficie además de ser mayor al resto de los años se encuentra conectada en la mayoría de su extensión sin presentar grandes fragmentos; sin embargo, conforme va pasando el tiempo la superficie está cada vez más fragmentada dando inicio a la formación de lagos proglaciares los que se van formando cuando el agua del deshielo de los glaciares en retirada queda atrapada en el hielo o en una morrena.

Tabla 4. Lagos proglaciares en el año 2022

Lago proglaciar	Superficie (Km2)
Lago 1	0.30
Lago 2	0.22
Lago 3	0.01
Lago 4	0.03
Lago 5	0.03
Lago 6	0.20
Lago 7	0.01
Lago 8	0.01
Lago 9	0.06

En el inicio del periodo de estudio solo se identifica 1 lago proglaciar en formación, sin embargo, en el año 2022 se pueden identificar 9 lagos proglaciares (Tabla 5, Figura 6). Los lagos más grandes tienen una superficie de 0.30 km² y 0.22 km² los que se han ido apareciendo desde el 2004 en adelante. Los lagos

proglaciares más pequeños tienen una superficie de 0.01 km² y 0.03 km² que corresponden a formaciones más recientes.

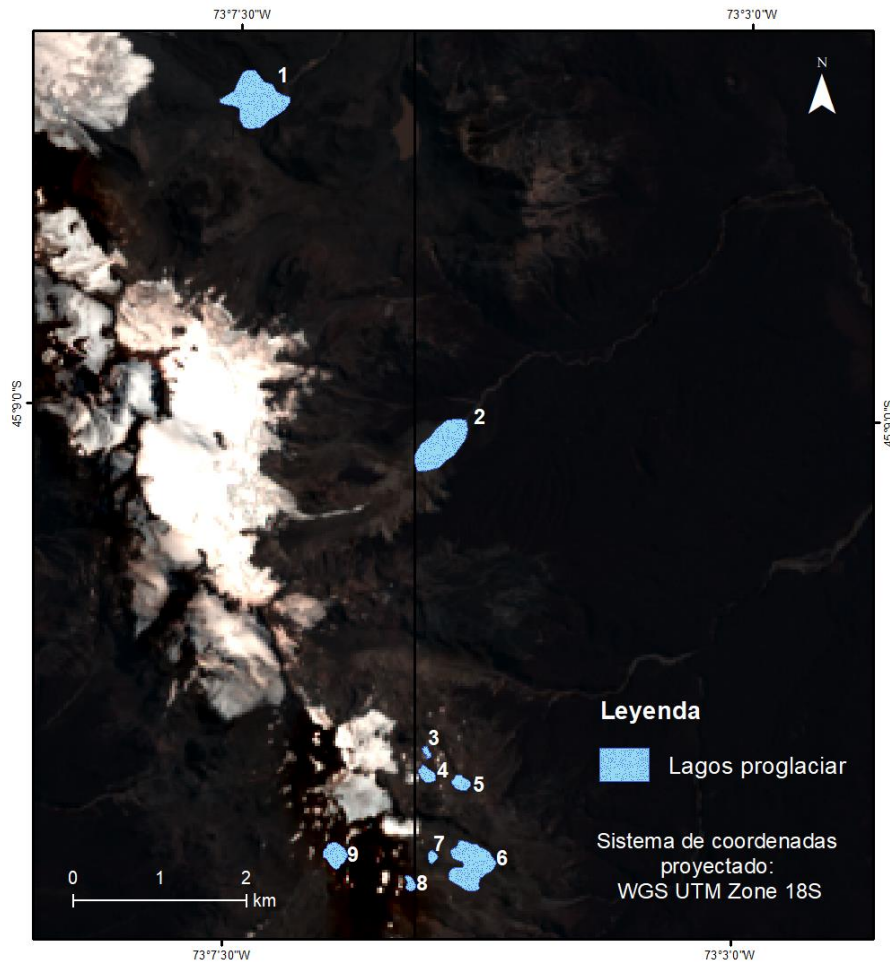


Figura 6. Lagos proglaciares en el año 2022

Los principales cambios se pueden observar en las zonas de baja altitud, entre los 760 a 1.100 msnm. En la Figura 7 se aprecian los 2 frentes glaciares del volcán Maca que demuestran mayor reducción y donde se puede evidenciar la

aparición de lagos proglaciares que se forman en las inmediaciones de un glaciar como resultado del derretimiento del hielo.

En las zonas de mayor altitud, superior a los 1.200 msnm, no se presentan grandes diferencias en el periodo de estudio posiblemente porque estas zonas tienen temperaturas más bajas y la alta reflectividad del hielo reduce la cantidad de calor absorbido. Sin embargo, como se menciona anteriormente, estas áreas igualmente han sufrido fragmentación de su superficie.

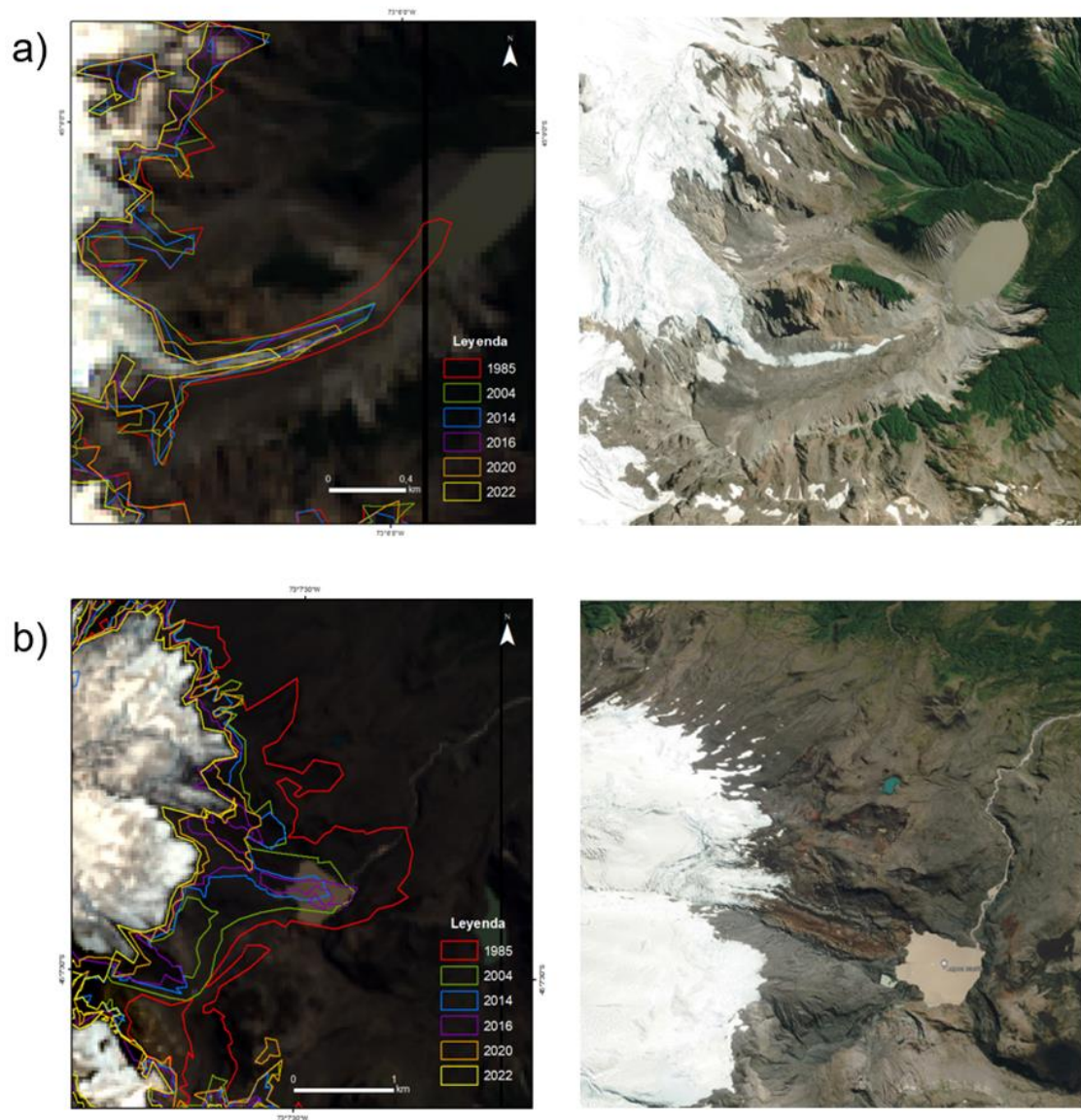


Figura 7. Frentes glaciares del volcán Maca. En el lado izquierdo tenemos los polígonos de las superficies para cada año de estudio y en el lado derecho tenemos una imagen aérea de Google Earth Pro.

Respecto a la cuantificación de la superficie glaciar, se determinó que en 1985 el área de estudio estaba cubierta por 48.58 km² de cobertura glaciar, mientras que en 2022 la superficie se redujo a 25.98 km². Esto indica una pérdida de 21.05 km², equivalente al 53.4% de la superficie inicial. En un período de 37 años, más de la mitad de la superficie glaciar se ha perdido, como se detalla en la Tabla 5 y la Figura 8.

Tabla 4. Variación del área superficial glaciar en el periodo 1985-2022.

Período	Superficie glaciar inicial (km ²)	Superficie glaciar final (km ²)	Pérdida total (km ²)	Tasa de retroceso anual (km ² por año)
1985-2004	48.58	39.84	-8.74	0.46
2004-2014	39.84	35.84	-4.00	0.40
2014-2016	35.84	30.13	-5.71	2.87
2016-2020	30.13	35.98	5.85	-1.47
2020-2022	35.98	25.98	-10.00	5.00

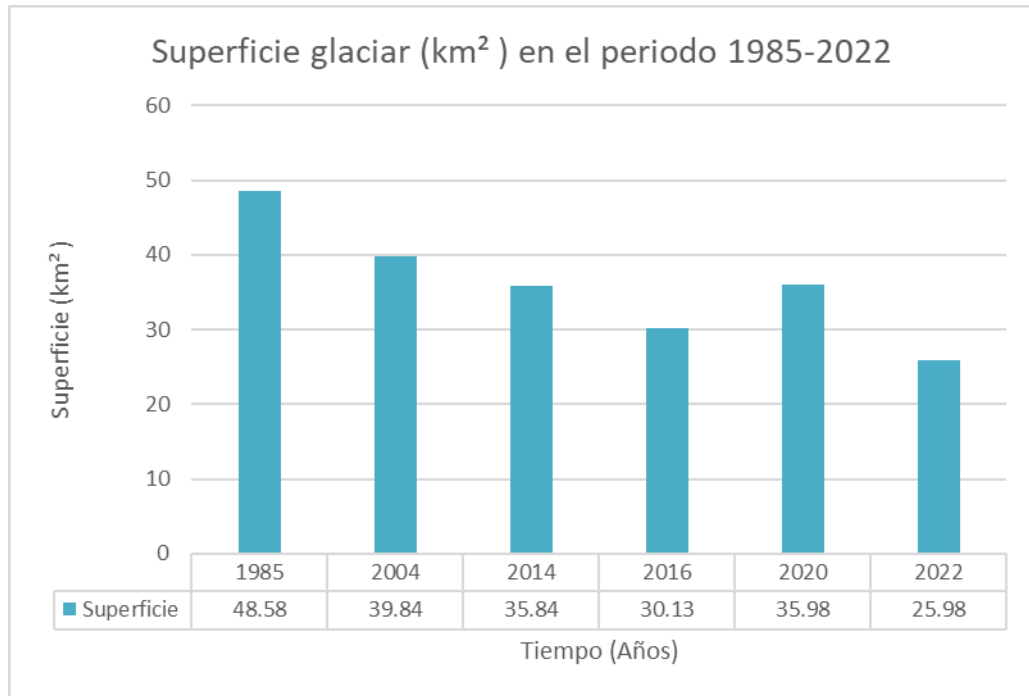


Figura 8. Gráfico de variación en la superficie glaciar en el periodo 1985-2022.

La tasa de retroceso anual indica información importante sobre la dinámica glaciar del área, donde una tasa de retroceso positiva indica una pérdida de superficie glaciar y una tasa de retroceso negativa indica una ganancia de superficie glaciar. Esta tasa ha sido variable a lo largo del periodo de estudio, con un promedio de 1,5 km² de pérdida de superficie por año.

En el periodo 1985-2004 la tasa de retroceso anual es de 0.46 km² por año y tiene un leve retroceso en el periodo 2004-2014 donde la tasa de cambio alcanza un valor de 0.40 km²/año. Posterior existe un aumento notorio en el periodo 2014-2016 donde la tasa de retroceso anual es de 2.87 km²/año. Se observa una clara

tendencia al alza, sin embargo, en el periodo 2016-2020 el retroceso anual es de -1,47 km²/año lo que indica que el glaciar aumento su superficie, pudiendo deberse a la ocurrencia de algún fenómeno meteorológico puntal en el área de estudio. En el periodo 2020-2022 se alcanza la tasa de retroceso más alta con 5 km² por año.

3.3 Análisis estadístico

3.2.1 Precipitación acumulada y temperatura media

Las precipitaciones acumuladas entre los meses noviembre y marzo muestran una variabilidad entre diferentes años; sin embargo, es posible observar una reducción en el periodo de estudio. Esto significa que la cantidad total de precipitación que cae ha disminuido en las últimas 4 décadas.

En Tabla 6 y Figura 9 se pueden observar los valores de precipitación (mm) para el periodo 1985-2022 donde se puede ver que existe una disminución en la precipitación acumulada desde 1985 hasta 2004 de 712.4 mm a 484.9 mm respectivamente. Entre los años 2004 y 2014 hubo un incremento notable de la precipitación llegando a 687.8 mm acumulados. Posterior a esta fecha se evidencian ligeras fluctuaciones, con una leve disminución en 2016 con 621.8 mm, luego se observa un aumento en 2020 con 640.1 mm y, finalmente, una

considerable baja en 2022 con solo 472.5 mm, siendo esta la fecha con menor precipitación acumulada de todo el periodo estudiado.

En análisis de Man-Kendall indica que no existe una tendencia en la serie temporal para los niveles de confianza del 90 y 95%. Esto indica que no existe una tendencia ascendente ni descendente de las precipitaciones a lo largo del periodo de estudio.

Tabla 5. Precipitación acumulada en el periodo 1985-2022.

Año	Precipitación acumulada de noviembre a marzo (mm)
1985	712.4
2004	484.9
2014	687.2
2016	621.8
2020	640.1
2022	472.5

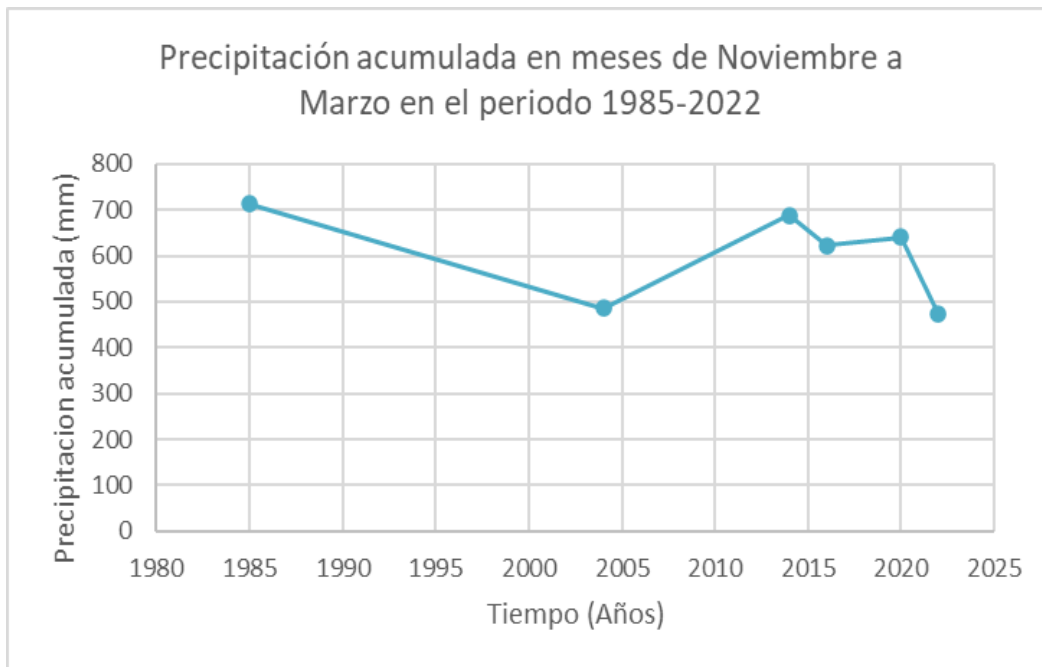


Figura 9. Precipitación acumulada en el periodo 1985-2022.

Respecto a la temperatura media se observa una tendencia de aumento de las temperaturas a los largo del periodo de estudio que va desde 1985 a 2022 con fluctuaciones en los años intermedios.

En la Tabla 7 y Figura 10 se pueden observar los valores de las temperaturas medias obtenidas de la malla de puntos que se ingresó en la plataforma GEE para obtener la temperatura de la superficie terrestre para cada año de estudio.

Tabla 6. Temperaturas medias en el periodo 1985-2022

Año	Temperatura media (°C)
1985	3.3
2004	6.5
2014	5.1
2016	7.7
2020	6.4
2022	9.3

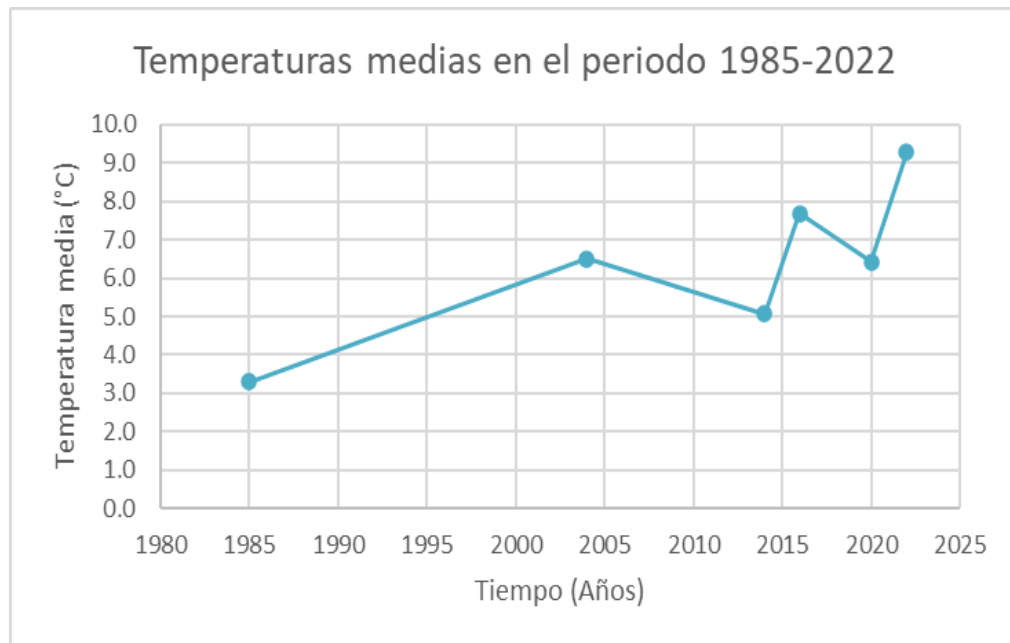


Figura 10. Temperaturas medias en el periodo 1985-2022.

Se puede evidenciar un incremento en la temperatura media donde en 1985 esta era de 3.3°C y en 2022 alcanzó los 9.3°C, lo que significa que hay una diferencia de 6°C entre el inicio y el fin del periodo de estudio.

Entre el año 1985 y 2004 hay un aumento significativo de la temperatura media con una diferencia de 3.2°C entre ambos años. Si bien la temperatura disminuye ligeramente en 2014 con 5.1°C en 2016 vuelve a aumentar a 7.7°C siguiendo la tendencia de aumento en los últimos años, alcanzando su máximo en 2022 con 9.3 °C.

El análisis de Man-Kendall indica que para un intervalo de confianza del 90% la serie temporal tiene una tendencia. Esto indica que existe una tendencia de aumento en la temperatura media a lo largo del periodo de estudio.

3.3.2 Análisis de correlación

Para entender la relación entre las variables climáticas y la pérdida de cobertura glaciar se realizó un análisis de correlación de modo que se pueda conocer la fuerza de la relación entre la superficie, precipitación acumulada y temperatura media en el periodo de estudio.

Se utilizó el coeficiente de correlación de Pearson donde los valores oscilan entre el -1 y 1, el valor -1 indica una correlación negativa perfecta; es decir, a medida que una variable aumenta, la otra disminuye proporcionalmente, el valor 0 indica que no hay correlación entre las variables y el valor 1 Indica una correlación positiva perfecta, lo que significa que a medida que una variable aumenta la otra también aumenta proporcionalmente. En caso contrario, si una variable disminuye la otra también disminuye proporcionalmente.

En este sentido, la correlación entre la superficie y los años de estudio el coeficiente de Pearson tiene un valor de -0.91, lo que indica una correlación negativa muy fuerte entre los años y la superficie. Esto significa que a medida que aumenta el número de años, la superficie tiende a disminuir de manera muy marcada, y viceversa (Tabla 8).

Tabla 7. Resultado de correlación entre la superficie glaciaria y los años que comprende el estudio

	Año	Superficie glaciaria
Año	1	
Superficie	-0.91	1

Del mismo modo, el análisis de Man-Kendall indica que tanto para el intervalo del 90% como para el intervalo del 95% de confianza hay una tendencia en la serie temporal. Esto indica que existe una tendencia de disminución significativa en la superficie a lo largo del periodo de estudio.

Por su parte, la correlación que relaciona la superficie y la precipitación acumulada entre los meses noviembre a marzo el coeficiente de Pearson tiene un valor de 0.52, lo que indica una correlación positiva moderada entre la superficie y la precipitación acumulada. Esto significa que, en general, a medida que la precipitación disminuye, la superficie también tiende a disminuir, pero no de manera perfectamente lineal (Tabla 9).

Tabla 8. Resultado de correlación entre la superficie glaciar y la precipitación acumulada.

	Superficie	Precipitación acumulada
Superficie	1	
Precipitación acumulada	0.52	1

En el caso de la temperatura media, el coeficiente de correlación de Pearson tiene un valor de -0.92 lo que indica una correlación negativa muy fuerte entre la superficie y la temperatura media. Esto significa que a medida que aumenta la

temperatura media, la superficie tiende a disminuir de manera muy marcada, y viceversa (Tabla 10).

Tabla 9. Resultado de correlación entre la superficie glaciar y la temperatura media

	Superficie	Temperatura media
Superficie	1	
Temperatura media	-0.92	1

3.3.3 Regresión lineal

Para modelar la relación que existe entre la pérdida de cobertura glaciar y las variables climáticas de precipitación acumulada y temperatura media se realizó un análisis de regresión lineal.

Se utilizó el coeficiente de determinación R^2 que indica la proporción de la variabilidad total de la variable dependiente que es explicada por la variable independiente. Los valores de este coeficiente oscilan entre 0 y 1, donde el valor 0 indica que la variable independiente no explica nada de la variabilidad de la variable dependiente, es decir que el modelo no explica ninguna de las variaciones en la variable dependiente. Por otro lado, el valor 1 indica que la

variable independiente explica toda la variabilidad de la variable dependiente, es decir el modelo explica toda la variabilidad de la variable dependiente.

El primer análisis de regresión lineal corresponde a la relación entre la superficie y la precipitación acumulada donde el coeficiente de determinación R^2 es de 0.278 lo que indica que la precipitación acumulada tiene una influencia moderada en la explicación de la variabilidad observada en la superficie donde aproximadamente el 27.8% de la variabilidad en la superficie puede ser explicada por la precipitación acumulada de los meses de noviembre a marzo (Figura 11).

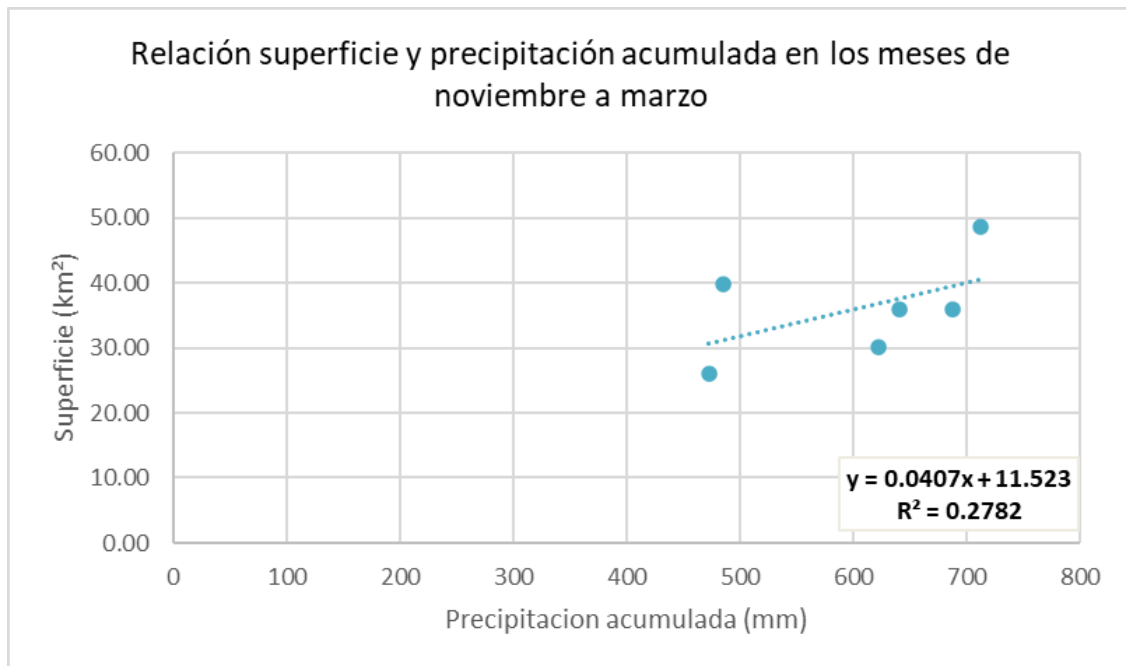


Figura 11. Análisis de regresión lineal entre la superficie y la precipitación acumulada

El segundo análisis de regresión lineal corresponde a la relación entre la superficie y la temperatura media donde el coeficiente de determinación R^2 es de 0.851, lo que indica que la temperatura tiene una alta influencia en la explicación de la variabilidad observada en la superficie donde aproximadamente El 85.1% de la variabilidad total en la superficie puede ser explicada por la temperatura media (Figura 12).

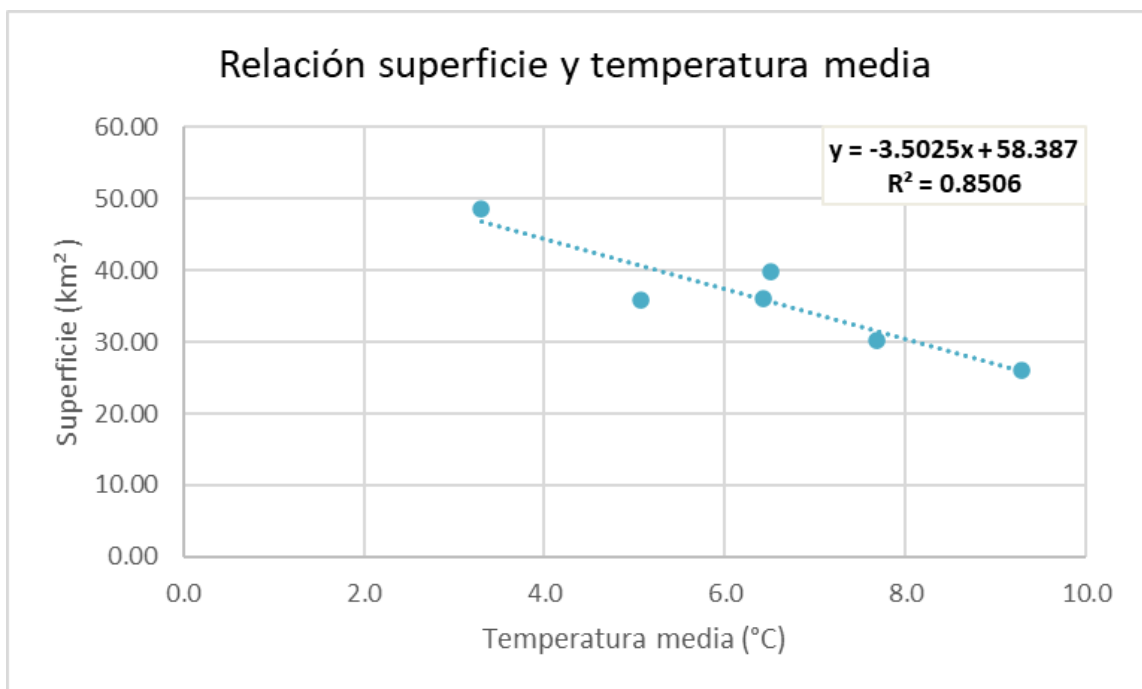


Figura 12. Análisis de regresión lineal entre la superficie y la temperatura media

IV.DISCUSIÓN

A nivel global, la dinámica de los glaciares ha mostrado tendencias preocupantes de retroceso en muchas regiones montañosas. En las cordilleras latinoamericanas, la glaciación ha provocado una reducción del 27,4% de la cobertura de hielo en volcanes activos donde en Chile central (35°-38°S) se presenta la mayor pérdida de hielo glacial, con un 61,8%. A su vez la evidencia científica ha demostrado un aceleramiento en la tasa de pérdida de cobertura glacial en varias regiones montañosas debido principalmente a variaciones en temperatura, cambios en régimen de precipitaciones y radiación, debido a los efectos del cambio climático (Nicholson et al., 2017; Reinthaler et al., 2019).

En la zona central del país el glaciar Juncal Sur y Alto Olivares es posible observar una tendencia a la reducción de área entre 1955 y 2020 (Ibáñez & Robledo, 2022). Un poco más al sur en la zona del complejo nevados de Chillan también es posible ver una tendencia a la disminución que tiene relación con los efectos del cambio climático (De Moraes et al., 2020). Dicha tendencia es similar en gran parte de los glaciares de la zona sur y austral del país (Rivera et al., 2012) como es el caso de esta investigación donde los glaciares del volcán Maca y del volcán Cay presentaron una notoria disminución de más del 50% de su superficie inicial del periodo de estudio 1985-2022.

Los resultados de esta investigación coinciden con el informe de la Dirección General de Aguas (DGA) publicado en 2011 y titulado como “Variaciones recientes de glaciares en Chile, sus principales zonas glaciológicas” donde calculan que la superficie de los glaciares del volcán Maca y Cay. En el inicio de su estudio (1979), la superficie era de 54.13 km² y en 2011 que es donde termina el estudio la superficie fue de 33.43 km², demostrando un retroceso significativo, especialmente en los 2 frentes glaciares del volcán Maca, de la misma forma que se demostró en este trabajo donde la superficie disminuye 22.6 km² en el periodo 1985-2022.

La tendencia a la disminución de área de glaciar es controlado principalmente por los cambios climáticos globales y a la declinación de las precipitaciones registradas en los últimos años (Ibáñez & Robledo, 2022; Mardones et al., 2018). En este trabajo se evidencia que las precipitaciones han disminuido en el periodo de estudio y las temperaturas han aumentado de manera considerable e indica que existe influencia de las variables climáticas en el retroceso de la superficie.

El IPCC en su informe emitido en 2020 titulado “El océano y la criósfera en un clima cambiante” menciona que el calentamiento global ha provocado una gran reducción de la extensión de la criósfera, con una pérdida de masa de los mantos de hielo y los glaciares y reducciones de los mantos de nieve junto a un aumento de la temperatura del permafrost.

Una de las maneras de evaluar el efecto del cambio climático es proyectar un escenario futuro con el fin de determinar una aproximación de la cantidad de superficie glaciaria que se perderá con el paso de los años (Alva & Meléndez, 2009)

Estos autores proponen un modelo matemático:

$$P_x = P_0 + \frac{(P_1 - P_0)}{n} * t$$

Donde

P_x cantidad de hectáreas que se quieren conocer en el año x

P_0 : cantidad de hectáreas para el primer año

P_1 : cantidad de hectáreas para el último año

n : número de años entre P_0 y P_1

t : número de años entre el primer año y el año que se quiere conocer (es decir entre P_0 y P_x)

Esta ecuación permite proyectar el área de los glaciares del Santuario de la Naturaleza Meullín-Puye que probablemente perderán su cubierta de nieve con el paso del tiempo. Si se reemplazan los valores tenemos que los glaciares del área de estudio perderán por completo su superficie en el año 2065.

Tabla 10. Proyección de la superficie glaciar con el modelo matemático de Alva y Meléndez

Año proyectado	Variable t	Superficie glaciar proyectada (km ²)
2030	45	21.09
2040	55	14.98
2050	65	8.87
2060	75	2.76
2061	76	2.15
2062	77	1.54
2063	78	0.93
2064	79	0.32
2065	80	0

La proyección permite evidenciar la importancia de adoptar medidas de protección y coincide con las predicciones realizadas por científicos que anticipan que gran parte de los glaciares del mundo perderán su superficie en las próximas décadas (Rounce et al., 2023; UNESCO, 2022). Además de la pérdida de superficie, los glaciares del área de estudio han sufrido cambios en su forma, fragmentándose y disminuyendo de tamaño. Esto los hace cada vez más vulnerables al cambio climático ya que estima que las regiones con predominio

de glaciares más pequeños perderán más del 80% de su masa de hielo actual para el año 2100 (Pörtner et al., 2019).

La teledetección es una herramienta muy útil para hallar variaciones de superficies glaciares y hacer un análisis cualitativo y cuantitativo de los parámetros físicos. A su vez el uso de índices medio ambientales como NDSI han demostrado eficacia para obtener una condiciones más precisa de superficies glaciares (De Moraes et al., 2020; Puchuc & Acuña, 2012).

El uso de sensores remotos ha demostrado ser una herramienta eficaz en el estudio de la dinámica de los glaciares, permitiendo una monitorización precisa y a gran escala de los cambios en la cobertura glaciar. En nuestra investigación, la aplicación de imágenes satelitales ha permitido detectar y cuantificar con precisión la pérdida de cobertura glaciar en el Santuario de la Naturaleza Meullín-Puye.

En esta investigación el uso de imágenes satelitales fue primordial debido a que el área de estudio es una zona de difícil acceso por lo que para poder hacer este tipo de análisis se hace imprescindible contar con tecnologías como la teledetección. A su vez el complementar técnicas de imágenes ópticas y radáricas constituye una herramienta eficiente para el monitoreo constante de los

glaciares, debido a la disponibilidad histórica y periódica de las imágenes (Ibáñez & Robledo, 2022).

Por otro lado, la plataforma Google Earth Engine es una herramienta geoespacial multifuncional y con una gran proyección en las ciencias, debido al uso creciente que tiene desde su aparición en 2010. Esta plataforma permite realizar multitud de estudios específicos y ajustados a las necesidades de los usuarios, tanto con perfil profesional como investigador, y que requieren analizar información geoespacial (Romero et al., 2022).

En cuanto a la importancia de esta investigación, entrega información relevante sobre la dinámica que están teniendo los glaciares del Santuario de la Naturaleza Meullín-Puye sumando un argumento más para su protección y justificar la necesidad de aumentar su superficie, logrando proteger mayor cantidad de biodiversidad. Estos antecedentes son cruciales para la toma de decisiones, ya que en el Santuario dos de los objetos de conservación están relacionados con los glaciares. Las geoformas, que incluyen los volcanes Cay y Maca, y el sistema hídrico del cual los glaciares forman parte.

Por otro lado, los glaciares tienen mucha relevancia para las personas y su bienestar donde además de proveer agua en los caudales de los ríos, proveen de hábitat para los organismos, donde durante el último siglo, algunas especies

de plantas y animales han cambiado su área o rango de distribución y se han establecido en nuevas zonas debido al retroceso de los glaciares y la prolongación de la estación sin nieve. Además, el deshielo del permafrost y el derretimiento glaciar está produciendo que las laderas de las montañas pierdan estabilidad lo que significa un riesgo de desastre para la población (Pörtner et al., 2019).

Respecto a las limitaciones de este estudio el principal desafío está en la disponibilidad de imágenes satelitales ya que es una zona que presenta alta nubosidad durante todo el año y tener una mayor cantidad de imágenes podría detectar una tasa de cambio más precisa. A su vez combinar distintos tipos de satélites es una alternativa de futura línea de investigación, además de utilizar otro tipo de metodología para contrastar estos resultados como aplicar una composición de bandas espectrales, usar otros índices como NDWI para discriminar superficies con agua y establecer la relación del retroceso glaciar con otras variables ambientales como la humedad y radiación solar.

Los glaciares son reservas de agua que abastecen a ecosistemas, poblaciones y diversas actividades productivas, es por esto que necesitan protección; sin embargo, si bien existen avances y esfuerzos por proteger estos importantes ecosistemas, aún queda mucho por hacer para enfrentar las amenazas que enfrentan los glaciares. Según lo plantea el Laboratorio de Glaciología de la

Universidad de Chile, en Chile se han propuesto varias leyes sobre la protección de glaciares para los cuales no ha existido un claro consenso y desde 2022 la propuesta de ley está en trámite en el senado. En paralelo a este proceso, en la comisión de Medio Ambiente de la cámara de diputados se discuten modificaciones al Código de Aguas. En cuanto a los hitos importante de esta propuesta de ley tenemos que el 21 de agosto del 2023 la DGA publicó una Minuta Explicativa respecto del proyecto de ley sobre protección de glaciares y el 11 de enero del 2024 se publicó en el Diario Oficial Núm. 43.747 el reglamento que regula la información que la DGA debe proporcionar y publicar sobre la red de monitoreo e inventario de glaciares y nieves.

Finalmente es importante mencionar que es esencial continuar con la investigación y sumar antecedentes para la protección de estos valiosos ecosistemas.

V.CONCLUSIONES

En esta investigación se abordó la dinámica glaciar y su relación con las variables climáticas precipitación acumulada y temperatura media en el Santuario de la Naturaleza Meullín-Puye a través de un análisis de datos temporales de percepción remota de la plataforma Google Earth Engine (GEE) y un análisis estadístico.

Se logro evidenciar que existe un retroceso significativo de la superficie glaciar entre los años 1985 y 2022. Al inicio de este periodo, el área de estudio estaba cubierta por una extensión glaciar de 48.58 km². Sin embargo, al concluir el periodo de estudio, esta superficie se ha reducido a 25.98 km². En un período de 37 años, más de la mitad de la superficie glaciar se ha perdido, demostrando la tendencia de pérdida que se está produciendo a nivel global. De la misma manera se estableció que existe una correlación entre el cambio de superficie glaciar y las variables climáticas, las que tienen una alta influencia en la variabilidad de la superficie.

Se estima que los glaciares presentes en el área de estudio, pertenecientes a los volcanes Maca y Cay, podrían desaparecer para 2065, cumpliendo con las predicciones científicas. Esto es preocupante debido a la importancia de estos ecosistemas y al aumento del riesgo asociado a la reducción de su superficie y

cambios en su morfología. La fragmentación de los glaciares provoca la pérdida de estabilidad de las laderas de las montañas, incrementando significativamente el riesgo de desastres.

Es importante destacar el uso de nuevas tecnologías y el uso de la teledetección ya que han permitido una mejor comprensión de fenómenos ambientales como el estudio y el monitoreo, siendo una útil herramienta cuando no se puede acceder a algunos sitios como ocurre normalmente con los glaciares.

Por otra parte, se recomienda seguir con investigaciones en el área complementando con otras metodologías de teledetección y satélites con el fin de seguir un monitoreo continuo de los glaciares, complementar con datos in situ y ejecutar planes que vayan en línea con la conservación y protección de estos ecosistemas.

VI.GLOSARIO

Banda espectral: Un rango específico de luz que los sensores remotos pueden detectar.

Circos glaciares: Son depresiones en forma de anfiteatro que se forman en las montañas por la acción erosiva de los glaciares.

Criósfera: Es la parte de la Tierra donde el agua está congelada, incluyendo glaciares, casquetes polares, permafrost y nieve.

Frente glaciar: También conocido como terminal de glaciar, es el límite inferior de un glaciar que puede adoptar la forma de un acantilado, una colina o simplemente una masa desorganizada de hielo.

Índice de vegetación: Es una métrica calculada a partir de imágenes satelitales para evaluar la cantidad, salud y densidad de la vegetación.

Lagos proglaciares: Lagos que se forman al derretirse un glaciar y represar el agua en un valle.

Morrena: Son formaciones glaciares que resultan de la acción erosiva y de transporte de los glaciares. Los sedimentos que forman las morrenas pueden ser de diversos tamaños y su composición también varía, dependiendo del tipo de roca que se encuentre en la zona por la que el glaciar ha pasado.

Permafrost: Es la capa de suelo congelado permanentemente pero no cubierto permanentemente de hielo o nieve. Este fenómeno se debe a la baja cantidad de radiación solar que llega a estas regiones y a la escasa evapotranspiración, lo que impide que el suelo se descongele por completo durante el verano.

Pleistoceno: Es una época geológica que forma parte del período Cuaternario de la era Cenozoica. Se inició hace aproximadamente 2,6 millones de años y finalizó hace unos 11.700 años.

Sensores remotos: Dispositivos que recopilan información sobre la Tierra desde el espacio o desde aviones, sin necesidad de estar en contacto directo con ella.

Santuario de la naturaleza: Área protegida en Chile ya sea terrestre o marino que ofrezcan posibilidades especiales para estudios e investigaciones geológicas, paleontológicas, zoológicas, botánicas o de ecología, o que posean formaciones naturales, cuya conservación sea de interés para la ciencia o para el Estado.

Teledetección: Es una técnica que permite obtener información sobre un objeto o fenómeno sin estar en contacto directo con él mediante el uso de instrumentos que registran la radiación electromagnética que este emite o refleja.

VII. BIBLIOGRAFÍA

- Aguayo, M., Pauchard, A., Azócar, G., & Parra, O. (2009). Cambio del uso del suelo en el centro sur de Chile a fines del siglo XX. Entendiendo la dinámica espacial y temporal del paisaje. *Revista Chilena de Historia Natural*, 82(2), 361-374.
- Alva, M., & Meléndez, J. (2009). Aplicación de la Teledetección para el análisis multitemporal de la regresión glaciár en la Cordillera Blanca. *Investigaciones sociales*, 13, 71-83. <https://doi.org/10.15381/is.v13i22.7216>
- Barcaza, G., Nussbaumer, S. U., Tapia, G., Valdés, J., Garcia, J.-L., Videla, Y., Albornoz, A., & Arias, V. (2018). Glacier inventory and recent glacier variations in the Andes of Chile, South America. *Annals of Glaciology*, 58, 166-180. <https://doi.org/10.1017/aog.2017.28>
- CECS. (2009). *Estrategia nacional de glaciares*.
- CNM. (2023). *Santuarios de la Naturaleza*. Retrieved 17 de Julio de 2023 from <https://www.monumentos.gob.cl/monumentos/santuarios-de-la-naturaleza/meullin-puye>
- De Moraes, M., Lara, C., Paredes, A., & Broitman, B. (2020). Efectos Del Cambio Climático Sobre Los Glaciares Del Complejo Volcánico Nevados De Chillán. *Revista Geográfica de Chile Terra Australis*, 56(1), 5-13. <https://doi.org/10.23854/07199562.2020561.DeMoraes5>
- Dozier, J. (1989). Spectral signature of alpine snow cover from the Landsat Thematic Mapper. *Remote Sensing of Environment*, 28:9, 28.
- FundacionKreen. (2023). *Santuario Meullín-Puye*. Retrieved 17 de Julio de 2023 from <https://www.fundacionkreen.cl/el-santuario/>
- Gari, J., Lois, A. O., Andronaco, D. F., Yparraguirre, E. M., Pilato, G., & Sedeño, A. (2016). *Estimación del balance de masas del glaciár Upsala entre los años 1985 y 2016*

GORE. (2009). *Estrategia Regional de Desarrollo de Aysén*.

Ibáñez, C., & Robledo, J. (2022). Glacier retreat with optical and radar images: Olivares Glacier and Juncal sur. *Revista Geográfica de Chile Terra Australis*, 58, 45-51. <https://doi.org/10.23854/07199562.202258esp.lbanez45>

IPCC. (2013). Glosario. In *Cambio Climático 2013. Bases físicas. Contribución del Grupo de trabajo I al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático*.

Mardones, M., Aguayo, M., Smith, E., & Ruiz, P. (2018). Retroceso glacial reciente en el Campo de Hielo Norte, región de Aysén, Chile: relación con variaciones climáticas. *Revista de Geografía Norte Grande*, 69, 121-147.

MMA. (2023). *Sistema de información y monitoreo de biodiversidad* <https://simbio.mma.gob.cl/AreaProtegida/Details/2061>

Nicholson, L., Marín, J., Lopez, D., Rabatel, A., Bown, F., & Rivera, A. (2017). Glacier inventory of the upper Huasco valley, Norte Chico, Chile: glacier characteristics, glacier change and comparison with central Chile. *Annals of Glaciology*, 50(53), 111-118. <https://doi.org/10.3189/172756410790595787>

Pellicciotti, F., Ragetti, S., Carenzo, M., & McPhee, J. (2014). Changes of glaciers in the Andes of Chile and priorities for future work. *Sci Total Environ*, 493, 1197-1210. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.10.055>

Pörtner, H.-O., Roberts, D. C., Masson-Delmott, V., Panmao Zhai, M. T., Poloczanska, E., Mintenbeck, K., Alegría, A., Nicolai, M., Okem, A., Jan Petzold, B. R., & Weyer, N. M. (2019). *Informe especial sobre los océanos y la criosfera en un clima cambiante*.

Puchuc, J. T., & Acuña, J. R. (2012). Estimación del cambio de volumen del Glaciar Champará en la Cordillera Blanca de Ancash a partir de datos de Satélite en el Periodo 2000-2010. *ECIPERU*, 9. <https://doi.org/https://doi.org/10.33017/RevECIPeru2012.0008/>

- Reinthaler, J., Paul, F., Granados, H. D., Rivera, A., & Huggel, C. (2019). Area changes of glaciers on active volcanoes in Latin America between 1986 and 2015 observed from multi-temporal satellite imagery. *Journal of Glaciology*, 65(252), 542-556. <https://doi.org/10.1017/jog.2019.30>
- Rivera, A., Aravena, J. C., Urra, A., & Reid, B. (2021). Glaciares de la Patagonia chilena y consecuencias medioambientales de sus cambios. In *Conservacion en la Patagonia Chilena*
- Rivera, A., & Bown, F. (2013). Recent glacier variations on active ice capped volcanoes in the Southern Volcanic Zone (37°–46°S), Chilean Andes. *Journal of South American Earth Sciences*, 45, 345-356. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2013.02.004>
- Rivera, A., Bown, F., Wendt, A., & Bravo, C. (2012). Cambios recientes en los glaciares del sur de Chile y en la península Antártica. *Anales Instituto Patagonia* 40:1, 39-44.
- Romero, J. P., Carrascosa, J. M., & Cerrillo, R. N. (2022). Capítulo 9: Google Earth Engine aplicado a ciencias forestales. In *Geomática, Teledetección y Modelos Espaciales Aplicados a la Gestión de Sistemas Forestales* (pp. 35).
- Rounce, D. R., Hock, R., Maussion, F., Hugonnet, R., Kochtitzky, W., Huss, M., Berthier, E., Brinkerhoff, D., Compagno, L., Copland, L., Farinotti, D., Menounos, B., & McNabb, R. W. (2023). Global glacier change in the 21st century: Every increase in temperature matters. *Science*, 379, 78-83.
- Ruiz, L., Pitte, P., Rivera, A., Schaefer, M., & Masiokas, M. H. (2022). Freshwaters and Wetlands of Patagonia. In *Freshwaters and Wetlands of Patagonia*. <https://doi.org/10.1007/978-3-031-10027-7>
- UNESCO. (2022). *World Heritage Glaciers Sentinels of climate change*. <https://doi.org/10.3929/ethz-b-000578916>
- Yparraguirre, E. L. M., Saavedra, S., Barrios, A., Lois, A. S. O., & Pilato, G. L. (2021). Tecnología espacial aplicada a glaciares patagónicos y su comportamiento como indicadores ambientales. *Revista Cartográfica*(104), 133-163. <https://doi.org/10.35424/rcarto.i104.1049>

VIII.APÉNDICE

Figura 13. Código de la plataforma GEE para la obtención de imágenes satelitales y cálculo de índice NDSI. Es importante mencionar que este es un código tipo para Landsat 5 sin embargo los otros 2 códigos (Landsat 8 y 9) sigue el mismo formato, pero se cambia la colección y bandas.

```
1 /////////////////////////////////////////////////////////////////// CODIGO FECHAS LANDSAT 5 ///////////////////////////////////////////////////////////////////
2 // Define la región de interés (ROI) mediante un polígono o un punto para el sur de Chile.
3 var roi = poligono;
4
5 // Define la fecha de interés.
6 var startDate = '1985-02-15';
7 var endDate = '1985-03-15'; // Landsat 5 dejó de funcionar después de 2012.
8
9 // Filtra la colección Landsat 5 según la región y la fecha.
10 var collection = ee.ImageCollection('LANDSAT/LT05/C02/T1_L2')
11   .filterBounds(roi)
12   .filterDate(startDate, endDate);
13
14 // Applies scaling factors.
15 function applyScaleFactors(image) {
16   var opticalBands = image.select('SR_B.').multiply(0.0000275).add(-0.2).toFloat();
17   var thermalBands = image.select('ST_B.*').multiply(0.00341802).add(149.0).toFloat();
18   return image.addBands(opticalBands, null, true)
19     .addBands(thermalBands, null, true);
20 }
21
22 collection = collection.map(applyScaleFactors);
23
24 // Filtra por cobertura de nubes. Ajusta el umbral según tus necesidades.
25 var cloudCoverThreshold = 20; // Porcentaje de cobertura de nubes permitido.
26 collection = collection.filterMetadata('CLOUD_COVER', 'less_than', cloudCoverThreshold);
27
28 // Obtén la cantidad de imágenes disponibles después de aplicar los filtros.
29 var count = collection.size();
30 print('Cantidad de imágenes Landsat 5 disponibles:', count);
31
32 // Muestra las fechas de adquisición de las imágenes disponibles.
33 var dates = collection
34   .sort('system:time_start')
35   .reduceColumns(ee.Reducer.toList(), ['system:time_start'])
36   .get('list');
37 print('Fechas de adquisición de las imágenes:', dates);
38
39 // Muestra las ID de las imágenes disponibles.
40 var ids = collection
41   .sort('system:time_start')
42   .reduceColumns(ee.Reducer.toList(), ['system:index'])
43   .get('list');
44 print('ID de las imágenes disponibles:', ids);
45
46 // Muestra la colección filtrada en el visor de GEE.
47 Map.centerObject(roi, 6);
48 Map.addLayer(roi, {color: 'FF0000'}, 'Región de interés');
49 Map.addLayer(collection, {bands: ['SR_B3', 'SR_B2', 'SR_B1'], max: 0.3}, 'Landsat 5 Collection');
50
```

```

51 //////////////////////////////////////////////////// INDICE NDSI ////////////////////////////////////////
52
53 // Calcular NDSI
54 var calcNDSI = function(image) {
55     var ndsi = image.normalizedDifference(['SR_B2', 'SR_B5']).rename('NDSI');
56     return image.addBands(ndsi);
57 };
58 // Aplicar la función para calcular el NDSI a cada imagen de la colección
59 var s2WithNDSI = collection.map(calcNDSI);
60
61 // Visualizar el resultado
62 var visParamsNDSI = {bands: ['NDSI'], min: -1, max: 1, palette: ['blue', 'white', 'green']};
63 Map.addLayer(s2WithNDSI, visParamsNDSI, 'NDSI');
64 Map.centerObject(poligono, 6);
65
66
67 //////////////////////////////////////////////////// EXPORTAR DATOS ////////////////////////////////////////
68
69 // Exportar los raster del índice calculado para poder descargarla desde Google Drive
70 ExportImage.toDrive({
71     image: s2WithNDSI.first().select('NDSI').toFloat(),
72     folder: 'GEE',
73     description: 'NDSI_1985_L5', //Cambiar el año correspondiente
74     fileNamePrefix : 'NDSI_1985_L5', //Cambiar el año correspondiente
75     scale: 30,
76     region: poligono,
77     fileFormat: 'GeoTIFF',
78     crs: 'EPSG:32718'
79 });
80
81
82 // Obtener la primera imagen de la colección Landsat 5
83 var primeraImagen = collection.first();
84
85 // Seleccionar solo las bandas visibles (rojo, verde, azul)
86 var imagen = primeraImagen.select(['SR_B1', 'SR_B2', 'SR_B3', 'SR_B4', 'SR_B5']);
87
88 // Obtener el path y el row de la primera imagen
89 var path = primeraImagen.get('WRS_PATH');
90 var row = primeraImagen.get('WRS_ROW');
91
92 // Imprimir el path y el row
93 print('Path:', path);
94 print('Row:', row);
95
96 // Exportar la imagen
97 ExportImage.toDrive({
98     image: imagen,
99     description: 'Imagen1985_L5', // Cambiar la descripción según sea necesario
100    folder: 'GEE', // Cambiar la carpeta de destino según sea necesario
101    scale: 30, // Cambiar la escala según sea necesario
102    region: poligono, // Establecer la región de interés
103    crs: 'EPSG:32718', // Establecer el sistema de referencia
104    fileFormat: 'GeoTIFF' // Cambiar el formato de archivo según sea necesario
105 });

```

Figura 14. Código de la plataforma GEE para la obtención de la temperatura de la superficie terrestre. Es importante mencionar que este es un código tipo para Landsat 5 sin embargo los otros 2 códigos (Landsat 8 y 9) sigue el mismo formato, pero se cambia la colección y bandas.

```

1  //////////////////////////////////////// TEMPERATURA 1985 ////////////////////////////////////////
2
3  // Define la región de interés (ROI) mediante un polígono o un punto para el sur de Chile.
4  var roi = poligono;
5
6  // Define la fecha de interés.
7  var startDate = '1985-02-15';
8  var endDate = '1985-03-15';
9
10 // Filtra la colección Landsat 5 según la región y la fecha.
11 var collection = ee.ImageCollection('LANDSAT/LT05/C02/T1_L2')
12   .filterBounds(roi)
13   .filterDate(startDate, endDate);
14
15 // Applies scaling factors.
16 function applyScaleFactors(image) {
17   var opticalBands = image.select('SR_B.*').multiply(0.0000275).add(-0.2).toFloat();
18   var thermalBands = image.select('ST_B.*').multiply(0.00341802).add(149.0).toFloat();
19   return image.addBands(opticalBands, null, true)
20     .addBands(thermalBands, null, true);
21 }
22
23 collection = collection.map(applyScaleFactors);
24
25 // Filtra por cobertura de nubes. Ajusta el umbral según tus necesidades.
26 var cloudCoverThreshold = 20; // Porcentaje de cobertura de nubes permitido.
27 collection = collection.filterMetadata('CLOUD_COVER', 'less_than', cloudCoverThreshold);
28
29 // Obtén la primera imagen de la colección Landsat 5
30 var primeraImagen = collection.first();
31
32 // Selecciona la banda de temperatura de la superficie (LST)
33 var lst = primeraImagen.select('ST_B6');
34
35 // Convierte la temperatura de Kelvin a Celsius
36 var lstCelsius = lst.subtract(273.15);
37
38 // Visualizar el shape de puntos en el mapa
39 Map.addLayer(puntos, {color: 'red'}, 'Puntos de interés');
40
41 // Define una función para extraer los valores de la banda LST en tus puntos de interés.
42 var extractLST = function(image) {
43   var lstValues = image.reduceRegions({
44     collection: puntos,
45     reducer: ee.Reducer.mean(), // Calcula el promedio de temperatura en grados Celsius
46     scale: 30,
47   });
48   return image.set('LST_values', lstValues);
49 };
50
51 // Aplica la función a la primera imagen.
52 var imagenConLST = extractLST(primeraImagen);
53

```

```

54 // Obtener el promedio de temperatura de los puntos de interés
55 var promedioTemperatura = lstCelsius.reduceRegion({
56   reducer: ee.Reducer.mean(), // Calcula el promedio
57   geometry: puntos.geometry(), // Utiliza la geometría de los puntos de interés
58   scale: 30 // Escala de muestreo
59 });
60
61 // Imprime el resultado en la consola
62 print('Promedio de temperatura de los puntos:', promedioTemperatura);
63
64 // Exportar los datos de temperatura a un archivo Excel
65 Export.table.toDrive({
66   collection: imagenConLST.get('LST_values'),
67   description: 'Temperatura_Puntos',
68   folder: 'GEE',
69   fileFormat: 'CSV'
70 });
71
72 // Muestra la colección filtrada en el visor de GEE.
73 Map.centerObject(roi, 6);
74 Map.addLayer(roi, {color: 'FF0000'}, 'Región de interés');
75 Map.addLayer(collection, {bands: ['SR_B4', 'SR_B3', 'SR_B2'], max: 0.3}, 'Landsat 8 Collection');

```

Figura 15. Vectorización superficie glaciar 1985

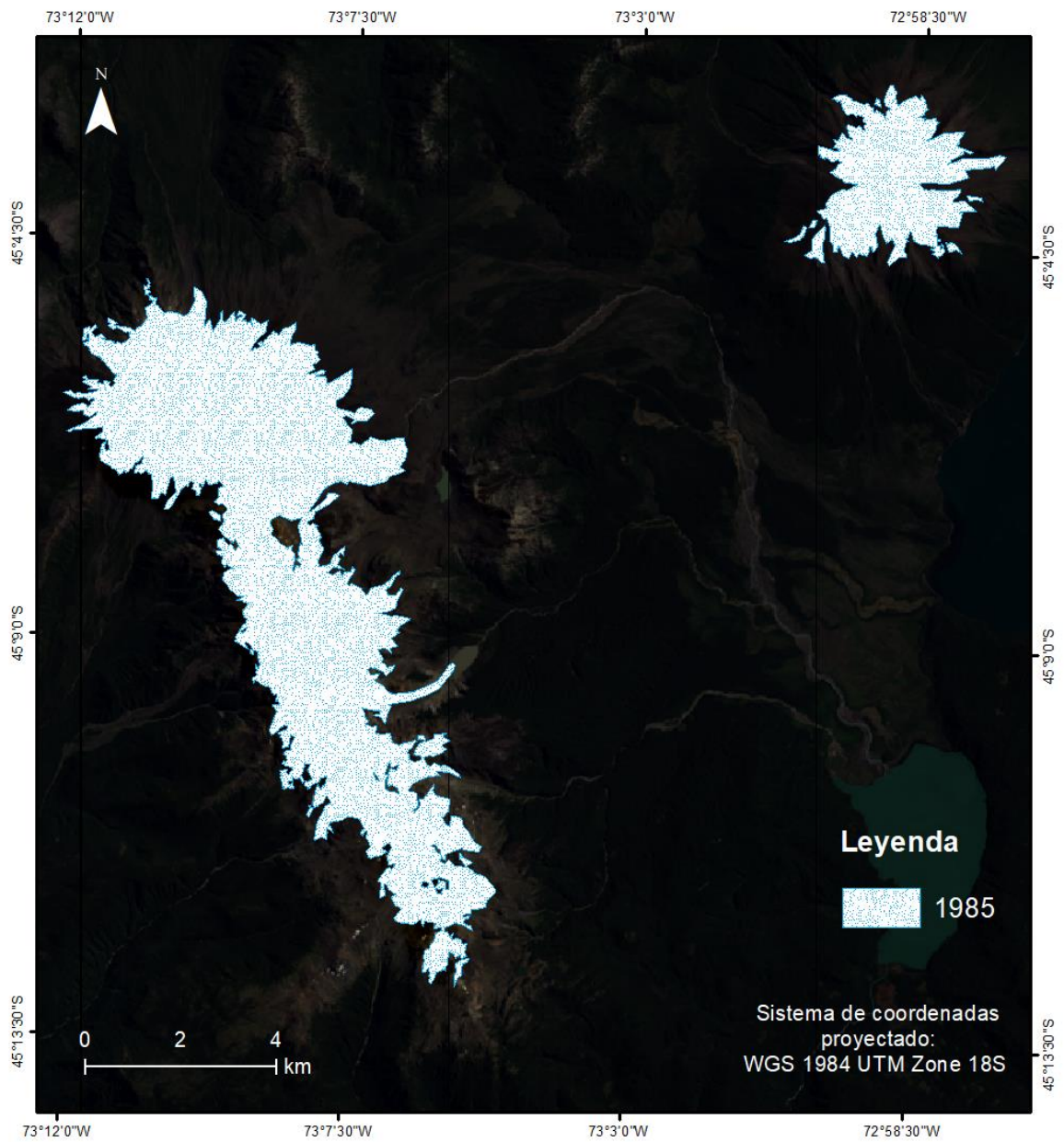


Figura 16. Vectorización superficie glaciar 2004

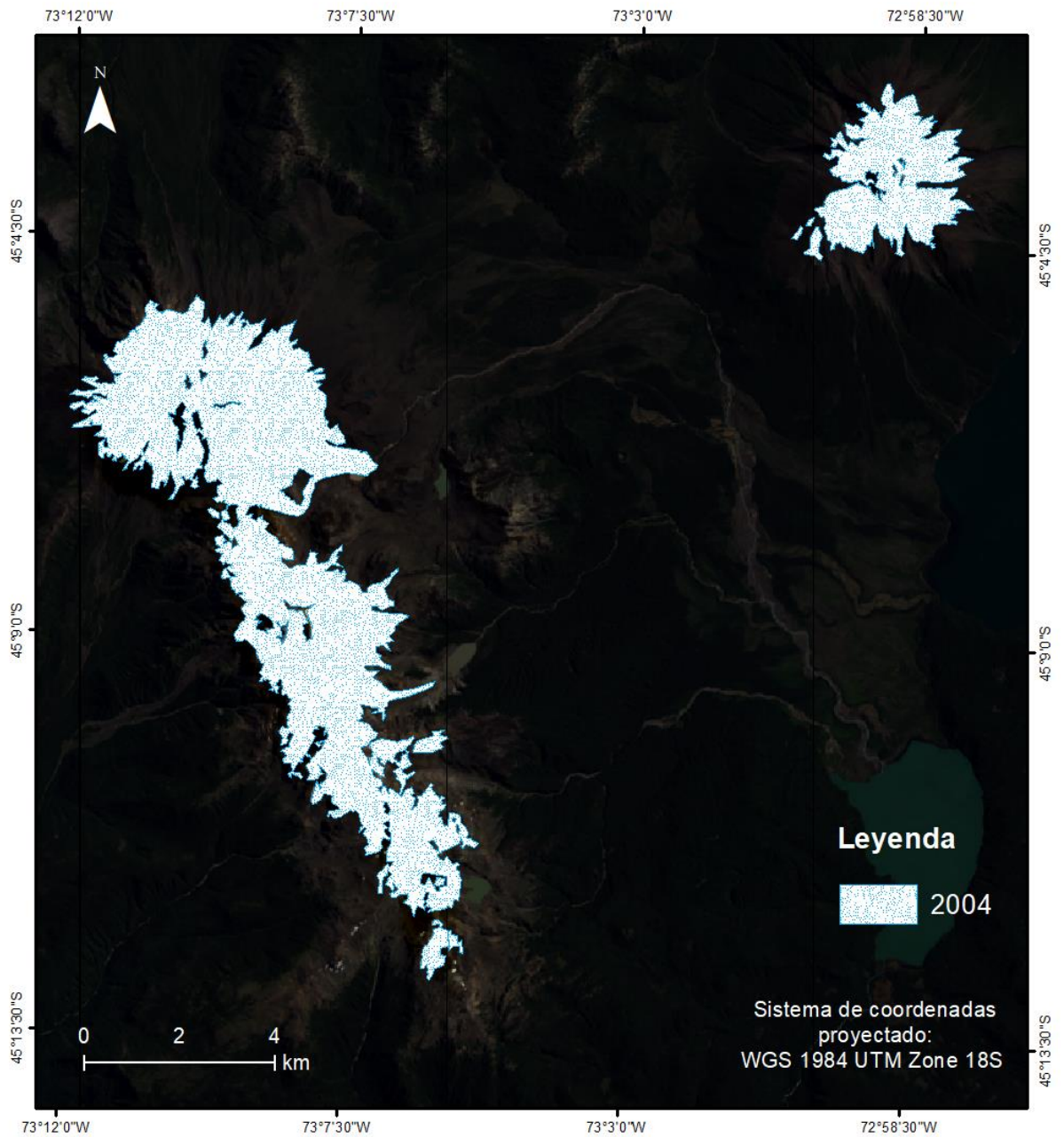


Figura 17 .Vectorización superficie glaciara 2014

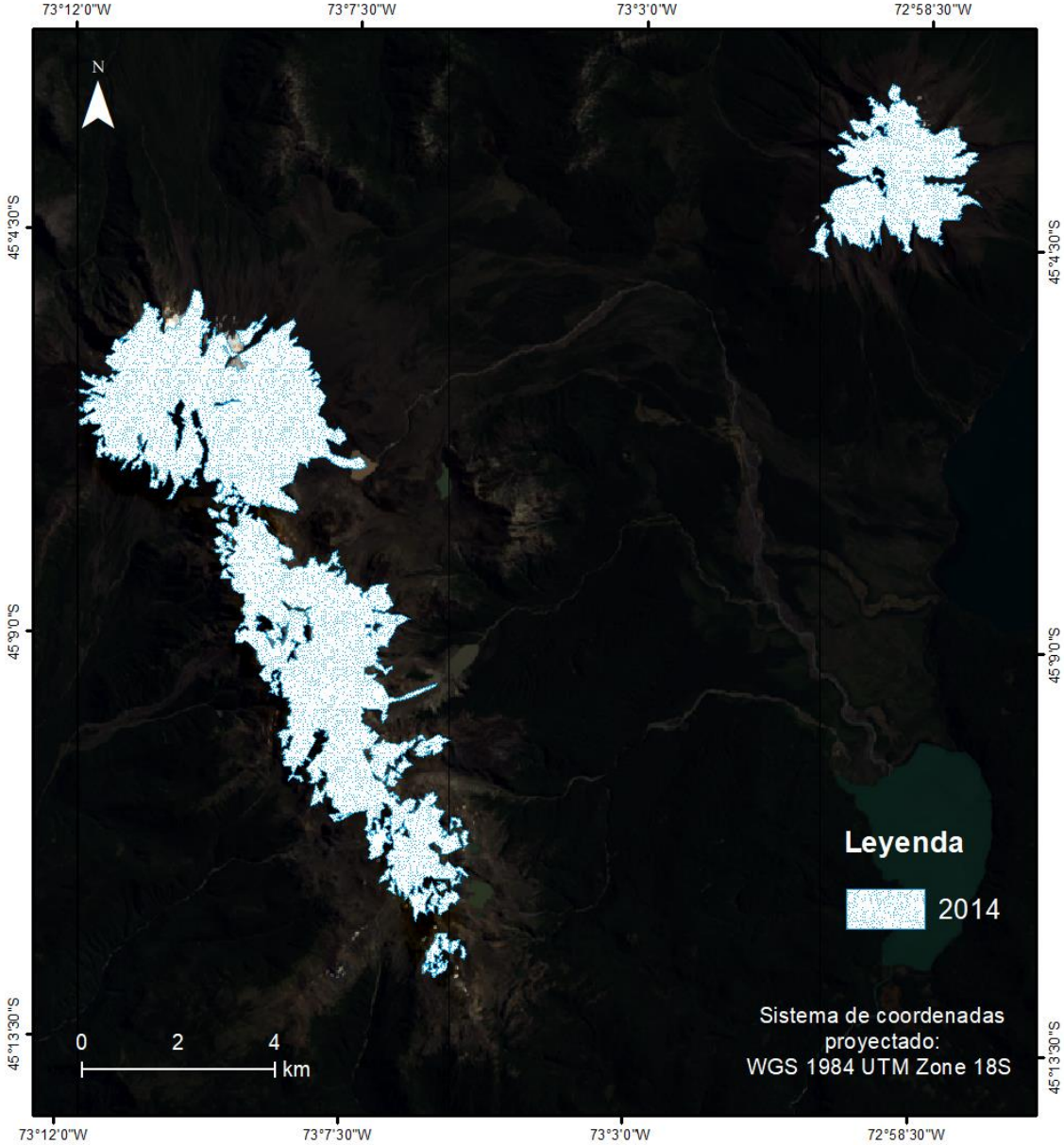


Figura 18. Vectorización superficie glaciar 2016

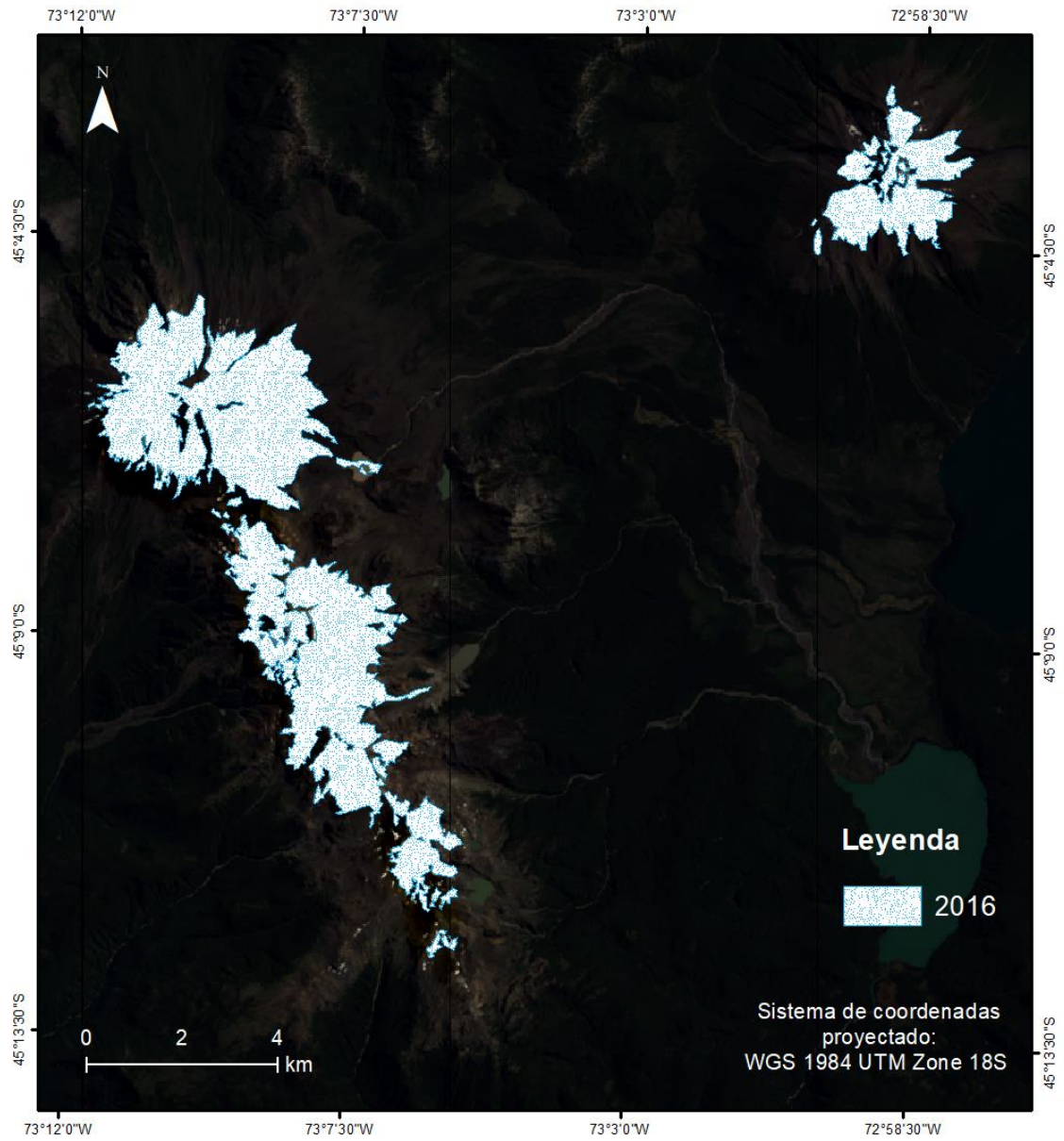


Figura 19. Vectorización superficie glaciar 2020

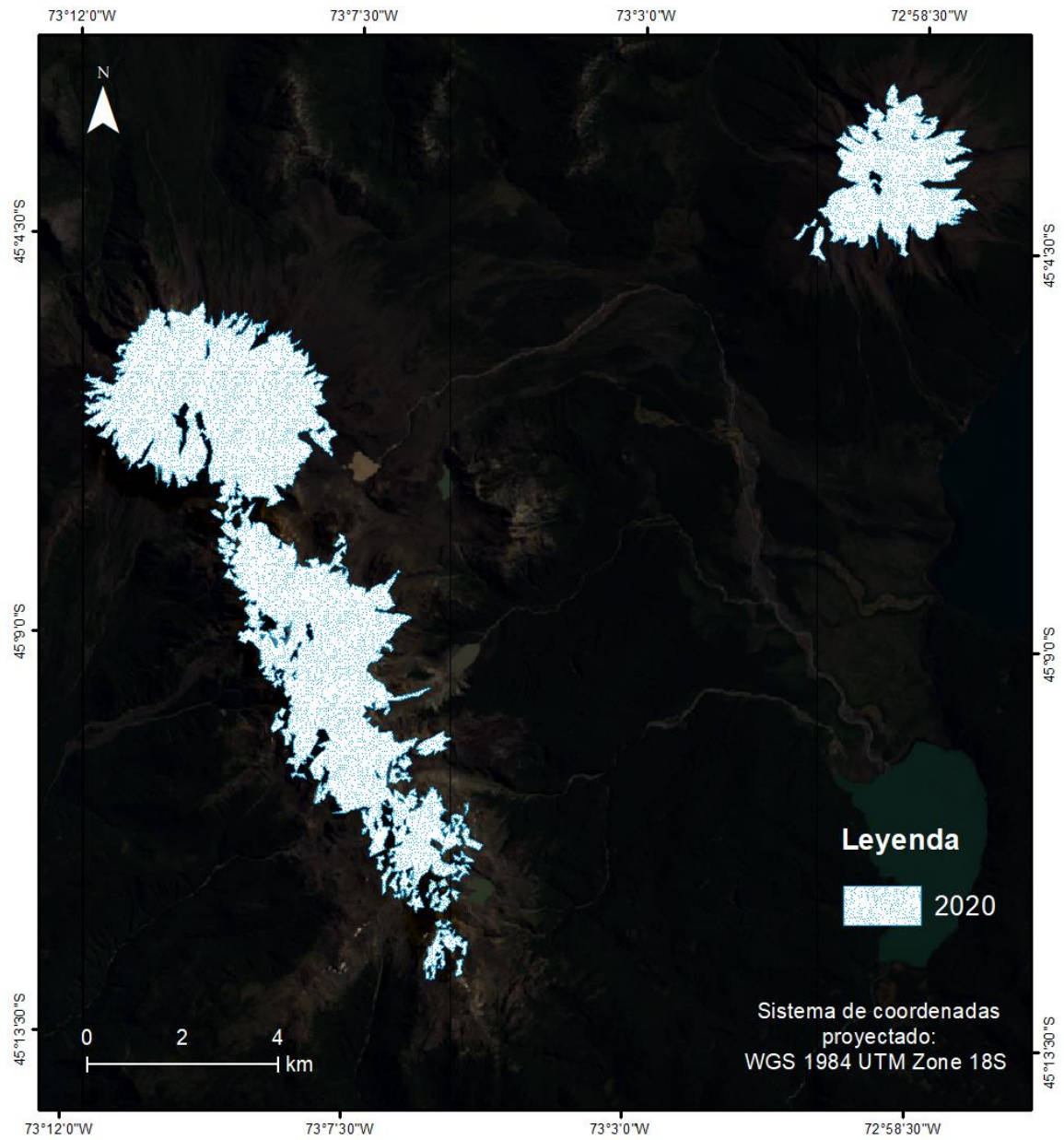
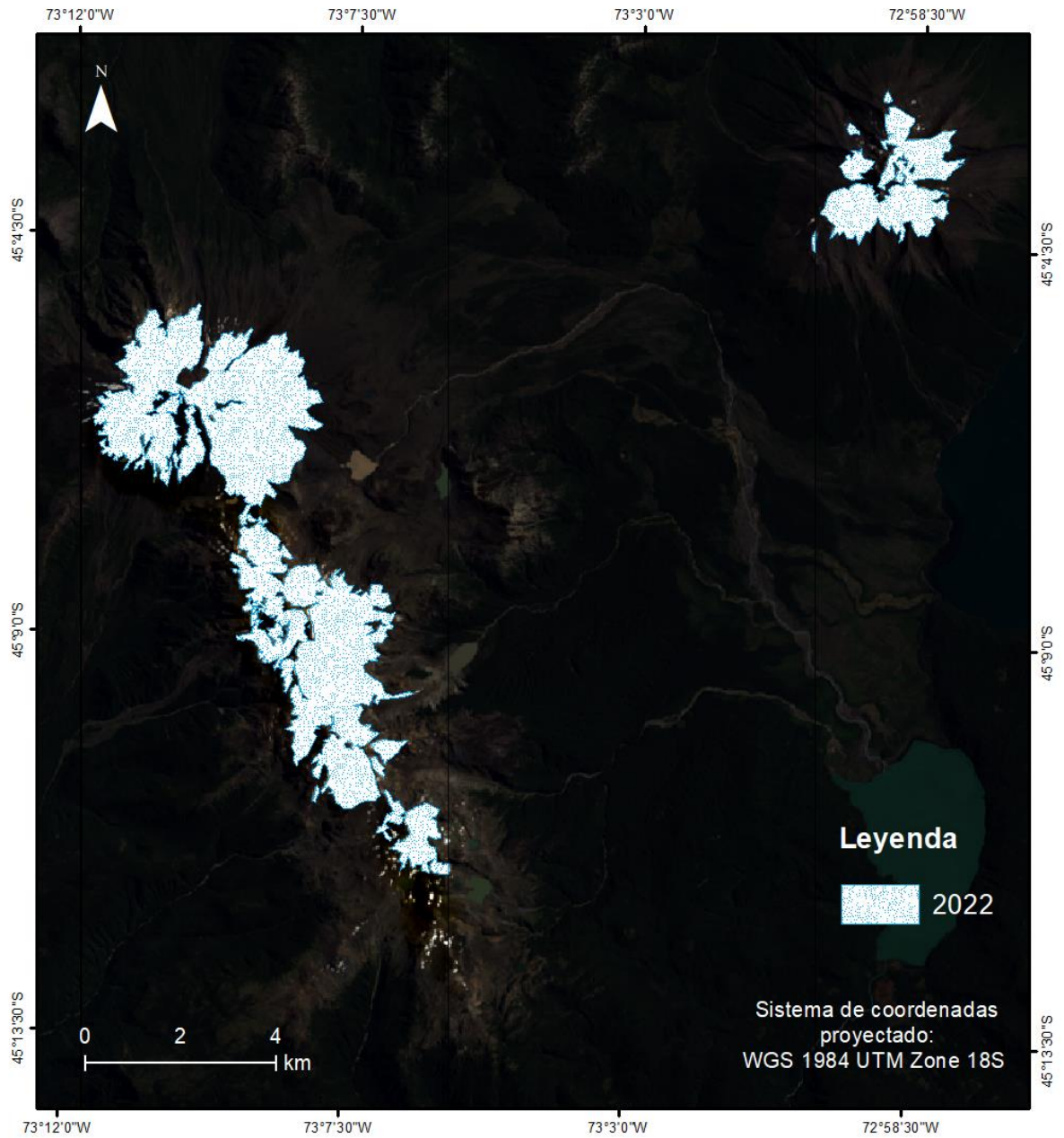


Figura 20. Vectorización superficie glaciar 2022



IX.ANEXOS

Figura 21.Precipitación acumulada anual en la estación pluviométrica Aysén Ad.

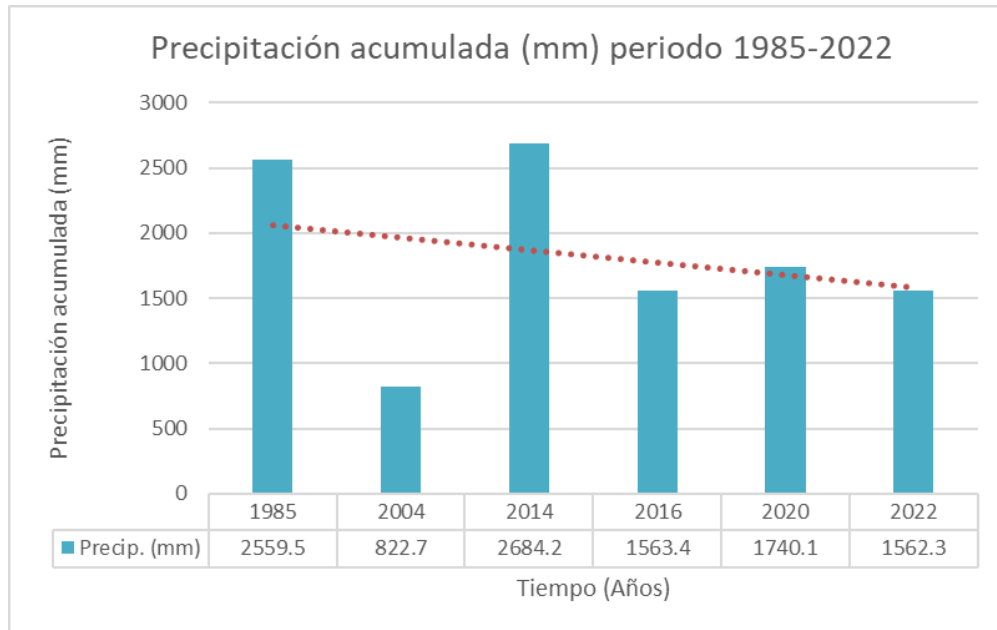


Tabla 11 Precipitación acumulada anual en la estación pluviométrica Aysen Ad.

Año	Precipitación acumulada (mm)
1985	2559.5
2004	822.7
2014	2684.2
2016	1563.4
2020	1740.1
2022	1562.3

Tabla 12. Datos para el análisis de regresión lineal de superficie y precipitación acumulada en los meses de noviembre a marzo.

Año	Superficie	Precipitación acumulada (mm)
1985	48.58	712.4
2004	39.84	484.9
2014	35.84	687.2
2016	30.13	621.8
2020	35.98	640.1
2022	25.98	472.5

Tabla 13. Datos para el análisis de regresión lineal de superficie y temperatura media

Año	Superficie	Temperatura media (°C)
1985	48.58	3.3
2004	39.84	6.5
2014	35.84	5.1
2016	30.13	7.7
2020	35.98	6.4
2022	25.98	9.3

Tabla 14. Características de Landsat 5

Sensor	Bandas	Longitud de onda (um)	Resolución espacial (m)
TM	1 (Azul)	0.45 – 0.52	30
TM	2 (Verde)	0.52 – 0.60	30
TM	3 (Rojo)	0.63 – 0.69	30
TM	4 (NIR)	0.76 – 0.90	30
TM	5 (SWIR 1)	1.55 – 1.75	30
TM	6 (TIR)	10.40 – 12.50	120
TM	7 (SWIR 2)	2.08 – 2.35	30
MSS	1 (Verde)	0.5 – 0.6	60
MSS	2 (Rojo)	0.6 – 0.7	60
MSS	3 (NIR)	0.7 – 0.8	60
MSS	4 (NIR)	0.8 – 1.1	60

Tabla 15. Características de Landsat 8

Sensor	N° de banda	Longitud de onda (um)	Resolución espacial (m)
OLI	1 (Coastal)	0.43 – 0.45	30
OLI	2 (Azul)	0.45 – 0.51	30
OLI	3 (Verde)	0.53 – 0.59	30
OLI	4 (Roja)	0.63 – 0.67	30
OLI	5 (NIR)	0.85 – 0.88	30
OLI	6 (SWIR 1)	1.57 – 1.65	30
OLI	7 (SWIR 2)	2.11 – 2.29	30
OLI	8 (Pancromático)	0.50 – 0.68	15
OLI	9 (Cirrus)	1.36 – 1.38	30
TIRS	10 (TIRS 1)	10.60 – 11.19	100
TIRS	11 (TIRS 2)	11.50 – 12.51	100

Tabla 16. Características de Landsat 9

Sensor	N° de banda	Longitud de onda (um)	Resolución espacial (m)
OLI	1 (Coastal)	0.43 – 0.45	30
OLI	2 (Azul)	0.45 – 0.51	30
OLI	3 (Verde)	0.53 – 0.59	30
OLI	4 (Roja)	0.63 – 0.67	30
OLI	5 (NIR)	0.85 – 0.88	30
OLI	6 (SWIR 1)	1.57 – 1.65	30
OLI	7 (SWIR 2)	2.11 – 2.29	30
OLI	8 (Pancromático)	0.50 – 0.68	15
OLI	9 (Cirrus)	1.36 – 1.38	30
TIRS	10 (TIRS 1)	10.60 – 11.19	100
TIRS	11 (TIRS 2)	11.50 – 12.51	100