

Consecuencias del cambio climático en los glaciares de la región de los Andes del sur de la Patagonia Argentina¹

Climate change consequences on the glaciers of the Southern Andes region of Argentine Patagonia

Graduada USAL:
Cappa, Cecilia Belén (c.cappa@usal.edu.ar)

Palabras clave: cambio climático, glaciares andinos, sensores remotos, Patagonia sur, retroceso glaciar, Argentina

Keywords: *climate change, Andean glaciers, remote sensing, South Patagonia, glacial retreat, Argentina*

Resumen

Los glaciares en la Argentina representan un importante recurso y servicio ecosistémico, además de portar un valor intrínseco. Su significación radica, entre otros motivos, en que constituyen reservas de agua dulce de relevancia regional, son reguladores naturales del ciclo hidrológico, se comportan como hábitats de diversas especies y se destacan como una fuente de ingresos económicos debido a su atractivo turístico. En la República Argentina, se relevaron más de 8484 km² de superficie glaciar, y existen más de 16 968 cuerpos de hielo y 36 cuencas hídricas que son alimentadas por los glaciares. Investigaciones recientes determinaron que el cambio climático genera numerosas consecuencias a nivel global. Una de ellas es el derretimiento de las masas de hielo glaciar que producen aumento de nivel medio del mar, incrementos en la magnitud y frecuencia de inundaciones, erosión de suelos y pérdida de calidad ecosistémica, tanto en las zonas periglaciarias como en las áreas marinas y costeras. En este estudio se analizaron los cambios en la longitud de ocho glaciares ubicados en la provincia de Santa Cruz entre los años 1986 y 2021 mediante imágenes satelitales, con el objetivo de relacionarlas con las variables climáticas locales obtenidas a partir de series meteorológicas históricas. El esclarecimiento de este punto permitirá generar conciencia en la población sobre la importancia del cuidado de esta masa de agua dulce y alertas en la comunidad científica que permitan diseñar estrategias para su conservación.

¹ La presente investigación es producto del trabajo final de grado presentado para obtener el título de Licenciada en Ciencias Ambientales de la Universidad del Salvador. En este artículo se resumen los principales resultados. Tutor del TFG: Álvaro Sánchez Granel.

Abstract

Glaciers in Argentina represent an important resource and eco-systemic service, in addition to carrying intrinsic value. Their importance lies in the fact that, among other reasons, they constitute freshwater reserves of regional relevance, they are natural regulators of the hydrological cycle, behave as habitats for various species and stand out as a source of economic income due to their tourist attraction. In the Argentine Republic, more than 8,484 km² of glacial surface have been surveyed, there are more than 16,968 ice bodies and 36 water basins are fed by glaciers. It has been observed that climate change generates different consequences at a global level as melting of glacial ice masses which, in turn, is related to an increase in average sea level, increases in the magnitude and frequency of floods, soil erosion and loss of eco-systemic quality, both in the peri-glacial areas as in marine and coastal areas. In this work, we study the changes in the length of eight glaciers located in the province of Santa Cruz between 1986 and 2021 using satellite imagery with the objective of relating them with the local climate variables obtained from historical meteorological series. Clarifying this point will raise awareness among the population about the importance of caring for this body of freshwater and alert the scientific community to design strategies for its conservation.

Introducción

Se puede definir a los glaciares como cuerpos de hielo perennes, que se han formado por la acumulación, compactación y recrystalización de la nieve (IANIGLA, 2018). Los glaciares se forman por acumulación de sucesivas capas de nieve que van perdiendo porosidad, hasta que finalmente se compactan aumentando su densidad y disminuyendo su volumen, para luego transformarse en hielo. Este proceso ocurre en regiones polares y áreas montañosas, donde predominan las bajas temperaturas, que permiten la acumulación constante de nieve y el calor del verano no es suficiente para derretir el cuerpo de hielo. También es fundamental la orientación de las laderas y el relieve, porque los sectores fríos que no reciben radiación solar intensa o las áreas que acumulan más cantidad de nieve debido a las corrientes eólicas son las más propicias para la formación de glaciares. La formación de un glaciar es un proceso que depende enormemente de las precipitaciones y temperaturas regionales, por lo que es un excelente indicador de cambio climático. Un glaciar pierde masa por derretimiento y sublimación de nieve y hielo, y también por desprendimientos de témpanos si el frente del glaciar termina en un cuerpo de agua (IANIGLA, 2018a). Si la pérdida es mayor que la acumulación, se observa un retroceso del cuerpo de hielo.

A nivel global, se estima que un 97,5 % del agua es salada, lo que implica que solo un 2,5 % del agua en el mundo es agua dulce y más de las dos terceras partes se encuentran congeladas en glaciares, en el Ártico y la Antártida, entre otros (Pedace *et al.*, 2011).

En la República Argentina se han relevado 8484 km² de superficie glaciar y existen más de 16.968 cuerpos de hielo en el país y 36 cuencas hídricas que son alimentadas por los glaciares (IANIGLA, 2018b; IANIGLA 2018c, IANIGLA 2018d; SAyDS, 2019). Los glaciares de la zona más austral de la cordillera de los Andes son innegablemente un patrimonio de gran relevancia, porque son un enorme reservorio de agua dulce de la República Argentina y de Chile. Las provincias cordilleranas se abastecen del agua de deshielo que proveen los campos de hielo para actividades productivas, salud y satisfacción de las necesidades diarias de los habitantes de las cuencas. Además, constituyen un enorme atractivo turístico y de ingreso de divisas, dado que son visitados anualmente por viajeros de todo el mundo.

La región de los Andes del sur de la Patagonia Argentina posee bosques con flora y fauna características. Se observa vegetación del género *Nothofagus* hasta la altura de los lagos, aproximadamente, y vegetación altoandina (Rodríguez Catón *et al.*, 2018); *Uncinia brevicaulis*, *Valeriana lapathifolia*, *Viola immaculata*, entre otras gramíneas. Entre los 1000-1600 metros de altura, cerca del límite inferior de las nieves permanentes y que se podría asociar a los semidesiertos de altura, se observa muy escasa cobertura con predominio de gramíneas xerofíticas y dicotiledónicas en cojín (*Azorella* y Bo-

lax). En sitios húmedos se forman pequeños prados con vegetación densa e incluso aparece una faja de vegetación arbustiva poco densa con especies como *Empetrum rubrum* y *Pernettya spp.* (Correa, 1998).

Respecto de la fauna característica de la zona, los mamíferos más comunes son las liebres, el zorro colorado y el zorro gris, además de huemules, una especie protegida debido a su peligro de extinción. Por otra parte, numerosas aves habitan la zona, siendo las más reconocidas el cóndor andino (*Vultur gryphus*), el choique (*Pterocnemia pennata*) y el águila escudada (*Geranoaetus melanoleucus*), entre otras (Povedano *et al.*, 2016).

Los glaciares son una valiosa fuente de agua dulce, contribuyen al equilibrio del ecosistema y constituyen un atractivo turístico. Eso los convierte en un patrimonio natural de la República Argentina. Es una función fundamental del Estado (Constitución Nacional y Ley N.º 25675) y de los argentinos cuidar a los glaciares acordemente con su enorme valor.

En este trabajo evaluamos el comportamiento de los glaciares en relación con los cambios de temperatura y precipitaciones regionales. Dado que los glaciares son parte indispensable de un ecosistema complejo y que existen numerosos impactos que podrían derivarse de su derretimiento, es fundamental generar conciencia en la población en general y científica en particular sobre el diseño de estrategias destinadas a su cuidado y/o preservación.

En este trabajo se propone la evaluación del comportamiento de los glaciares en relación con los cambios de temperatura y precipitaciones regionales a partir de la utilización de imágenes satelitales integradas en sistemas de información geográfica.

Metodología

La metodología que se propone en este trabajo se desarrolla a partir de datos de teledetección y análisis en entorno de sistemas de información geográfica.

Área de estudio

Al oeste de la provincia de Santa Cruz, una de las más australes de la Argentina, se pueden reconocer dos casquetes de hielo separados: el hielo patagónico norte y el hielo patagónico sur. El Campo de Hielo Norte se encuentra exclusivamente en Chile.

El hielo patagónico sur, de mayor superficie, se extiende a lo largo de 350 km desde los 48° 20' S hasta los 51° 30' S con una superficie aproximada de 13 000 km², y se encuentra comprendido entre Argentina y Chile. La porción del Campo de Hielo Sur que se encuentra dentro de la Argentina ocupa 3500 km² (Malagnino, 2008). Solamente abarca la provincia de Santa Cruz y la mayor parte del área se encuentra dentro del Parque Nacional Los Glaciares. El parque comprende un escenario de montañas, lagos y bosques, que incluye una vasta porción de la cordillera de los Andes prácticamente cubierta de hielo y nieve al oeste y la árida estepa patagónica al este. Desde los campos de hielo de la cordillera ubicados en Santa Cruz, nacen numerosas cuencas que abastecen de agua dulce a toda la provincia. Los cambios que pudieran ocurrir en la zona glaciaria afectan en gran medida nuestra porción del territorio.

La mayor parte de la superficie del Campo de Hielo Sur, o también llamados Hielos Continentales Patagónicos se encuentra dentro del Parque Nacional Los Glaciares. Esta área protegida debe su nombre a la presencia de numerosos glaciares que se originan en el gran Campo de Hielo Patagónico, el cual ocupa casi la mitad del parque. También conocido como Hielo Continental Patagónico, alimenta 47 grandes glaciares, de los cuales solo 13 descienden hacia la cuenca Atlántica. Ordenados de norte a sur son los siguientes: Marconi, Viedma, Moyano, Upsala, Agassiz, Bolado, Onelli, Peineta, Spegazzini, Mayo, Ameghino, Moreno y Frías (SAyDS, 2015).

Además, existen más de 200 glaciares de menor magnitud, independientes del Campo de Hielo Patagónico.

Los glaciares que se abordan en este estudio son los siguientes:

a. Glaciar Viedma: cuenta con 2,5 km de ancho por 50 m de altura y abarca una superficie de 977 km², aproximadamente. En su paso se encuentran los cerros subglaciales, también denominados *nunataks*, Whitte y Viedma (Suárez *et al.*, 2019) y recibe la afluencia del glaciar situado en el Circo de los Altares. Es el glaciar más grande del Parque Nacional Los Glaciares, seguido por el Upsala, y el segundo más grande del hemisferio sur después del glaciar Pío XI. Su nacimiento se encuentra al suroeste del volcán Lautaro, que le ha impreso bandas de ceniza características en erupciones pasadas. Desciende del Campo de Hielo Patagónico Sur y corre en un cañón formado entre los cerros Huemul y Campana, para finalmente desembocar sobre el lago Viedma.

b. Glaciar Upsala: destaca por su magnitud, ya que comprende aproximadamente 595 km². Desagua en el lago Argentino y se alimenta de varios glaciares.

c. Glaciar Perito Moreno: es el más conocido de la República Argentina, y uno de los más visitados por turistas en todo el mundo. Se encuentra en el departamento Lago Argentino dentro del Parque Nacional Los Glaciares. Tiene paredes de 65 metros de altura y una profundidad del hielo que se estima en 170 metros. La velocidad de movimiento es de aproximadamente 2 metros por día, lo que implica alrededor de 700 metros por año. Nace en el Campo de Hielo Patagónico Sur y desemboca en el brazo sur del lago Argentino, específicamente en el denominado canal de los Témpanos, sector circunscripto entre el hielo y la península de Magallanes. La lengua central del glaciar suele llegar hasta la península, clausurando el canal e impidiendo el paso del agua. Finalmente, la presión ejercida por el agua origina filtraciones y rompe el hielo generando una bóveda de más de 50 metros de altura, que finalmente se derrumba y constituye uno de los espectáculos naturales más atractivos. Otros autores (Minowa, 2015) han detectado que el glaciar Perito Moreno tiene un ciclo particular y no sigue necesariamente las tendencias zonales. Glaciar Onelli: se encuentra ubicado en el Parque Nacional Los Glaciares y desagua en la laguna del mismo nombre. Se encuentra localizado entre los glaciares Ameghino y Upsala y posee un notable desnivel.

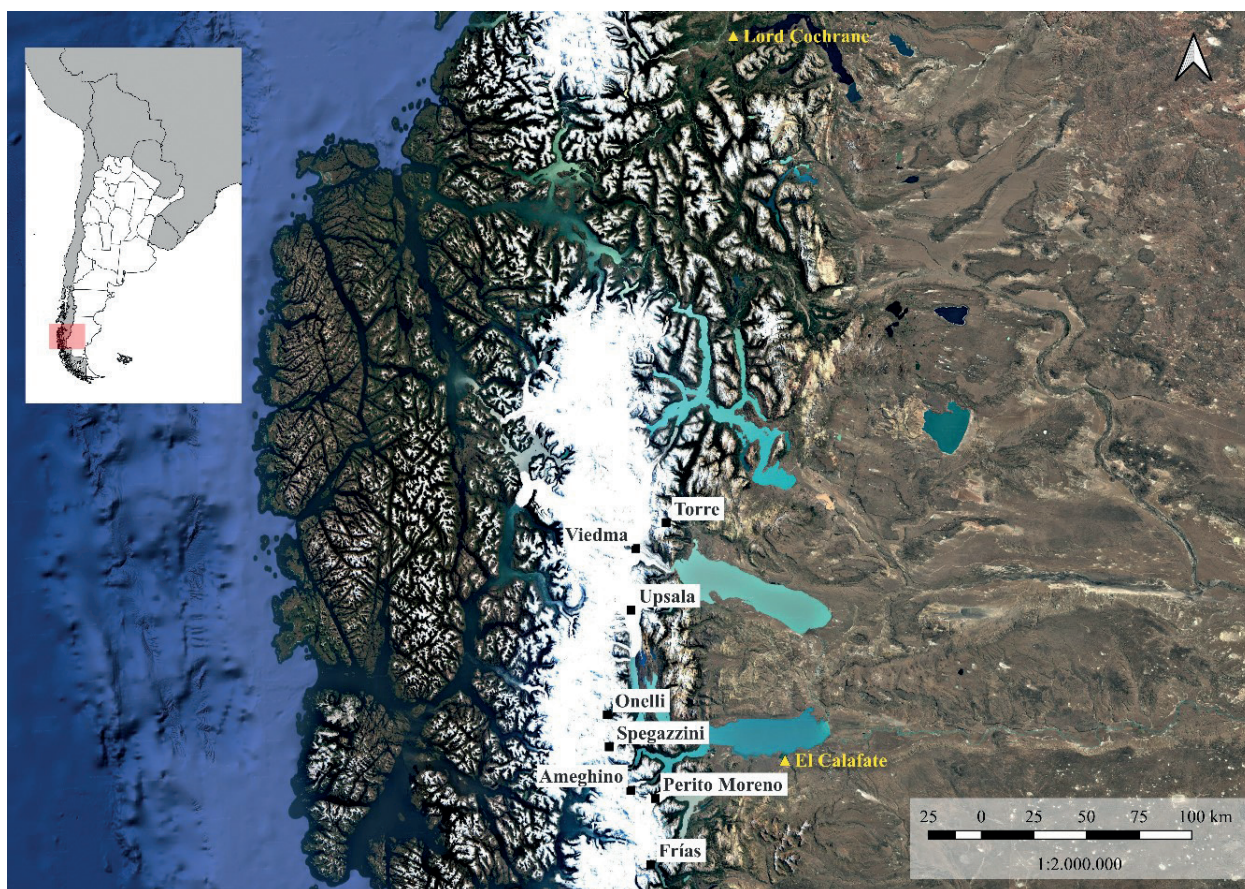
d. Glaciar Spegazzini: también nace del Hielo Patagónico Sur, especialmente desde los glaciares Mayo Norte y Peineta, y fluye hacia el este, llegando hasta el lago Argentino. Tiene una superficie de 66 km² y un ancho de 1,5 km. Se destaca por sus altas e imponentes paredes que llegan hasta los 135 metros en el frente y porque está rodeado de vegetación, particularidad dada porque su orientación lo protege de los fuertes vientos del oeste.

e. Glaciar Ameghino: nace a unos 2200 metros de altura sobre el nivel del mar, se desplaza de sentido sur a norte y desemboca sobre una laguna con la que comparte nombre, donde forma un frente de 720 metros de ancho y entre 30 y 35 metros de alto.

f. Glaciar Frías: se encuentra alejado de los grandes lagos de la zona, inmerso en la cordillera y, en consecuencia, inaccesible desde las típicas expediciones lacustres.

g. Glaciar Torre: tiene la particularidad de que no nace en el Campo de Hielo Patagónico, sino que nace en las alturas del cerro Torre y desemboca en la laguna que tiene su mismo nombre. Es un glaciar de montaña, por lo que tiene notablemente menor tamaño que el resto de los seleccionados.

En la figura 1 se incluye un mapa con la localización de los glaciares.

Figura 1*Mapa de la zona de estudio.*

Nota. Área de estudio en el Campo de Hielo Sur entre los límites de Argentina y Chile. Ubicación de los glaciares Torre, Viedma, Upsala, Onelli, Spegazzini, Ameghino, Perito Moreno y Frías (negro) en el Campo de Hielo Sur y de las estaciones meteorológicas (amarillo). Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos del Instituto Geográfico Nacional. Mapa base proporcionado por Google Satellite.

Las variables a analizar en este trabajo son las siguientes:

1. Estudio de los glaciares
 - a. Las longitudes de los glaciares
 - b. Variaciones de las distancias de las longitudes
2. Análisis del cambio climático
 - c. Temperatura
 - d. Precipitaciones

1. Longitud de glaciares

La medición de las longitudes de los campos glaciares se realizó mediante el estudio de imágenes satelitales: se optó por trabajar con la serie Landsat debido a su resolución espacial, y su extensa amplitud temporal. La misión se caracteriza por tratarse de satélites pasivos con órbitas repetitivas, heliosincrónicas y cercanas a los polos con una periodicidad de entre 8 y 16 días, dependiendo de su cercanía con el Ecuador. Además, en todos los casos de los satélites utilizados para este estudio,

la resolución espacial de las bandas en el espectro visible e infrarrojos es de 30 metros. Se tomaron imágenes del satélite Landsat 5, que contó con los sensores Multispectral Scanner (MSS) y Thematic Mapper (TM), y que proporcionó imágenes desde 1984. El MSS contó con cuatro bandas distribuidas entre los 0,5 a 1,1 μm , mientras que el TM contó con siete bandas entre los 0,45 y los 2,35 μm , además de una banda térmica.

También se emplearon diversas imágenes de Landsat 7, que cargaba el sensor MSS y el Enhanced Thematic Mapper (ETM+). Este último tiene unas bandas similares al TM del Landsat 5, aunque agrega una pancromática con 15 metros de resolución espacial. Solamente las imágenes generadas por el sensor ETM+ fueron utilizadas para el estudio. Finalmente, las imágenes más actuales fueron capturadas por Landsat 8, cuyos sensores son el Operational Land Imager (OLI) y el Thermal Infrared Sensor (TIRS). El sensor OLI fue el único utilizado para el estudio y cuenta con 9 bandas distribuidas entre los 0,43 y los 2,29 μm .

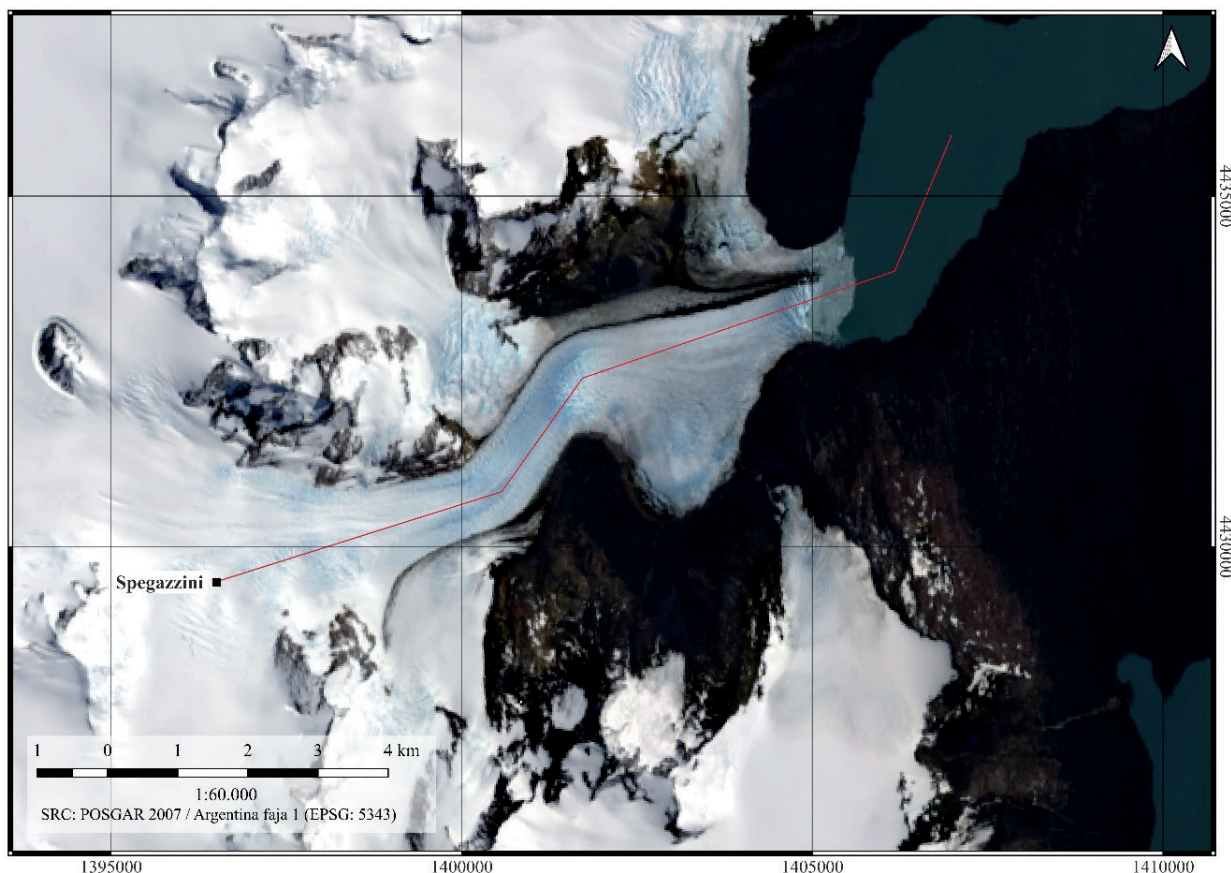
Todos los productos descargados son imágenes con correcciones radiométricas realizadas por la National Aeronautics and Space Administration (NASA) de los Estados Unidos de América y distribuidas por el Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS). Las imágenes no tienen correcciones atmosféricas, por eso se trata de productos nivel 1 (L1). Las imágenes fueron visualizadas y procesadas con el Software de Procesamiento de Imágenes Satelitales (SoPI) desarrollado por la Comisión Nacional de Actividades Espaciales (CONAE) de la República Argentina.

Se descargaron imágenes del mes de julio y del mes de enero entre los años 1986 y 2021, con el objetivo de comparar la evolución de las longitudes de los glaciares a lo largo del tiempo. Se obtuvieron 15 imágenes sin altas coberturas nubosas, pero que no necesariamente abarcan todo el campo de hielo.

En la mayoría de los casos se visualizaron las imágenes con las bandas en combinación de color real, a excepción de las provenientes del MSS del Landsat 5, cuya visualización se hizo combinando NIR, rojo y verde. En todos los casos se aplicó un realce lineal del 2 %. El sistema de referencia de coordenadas utilizado fue PosGAR 98 Argentina faja 1 (EPSG: 22171), para facilitar la medición de distancias en unidades métricas mediante el uso de coordenadas planas.

Se generó un punto en la zona de acumulación de cada glaciar a partir del que se trazó una transecta que superara ampliamente los frentes de los glaciares (Figura 2). Esta transecta constituyó una referencia para mantener homogéneas las direcciones de medición en todos los años y que los valores resultantes fueran comparables entre sí.

Las distancias en cada imagen fueron calculadas mediante el trazado de una línea sobre la transecta, siempre partiendo desde el punto en la zona de acumulación hasta la intersección con el frente del glaciar.

Figura 2*Ejemplo de la metodología utilizada.*

Nota. Transecta trazada sobre el glaciar Spegazzini utilizada para las mediciones sobre imagen Landsat 8 de enero de 2019. Fuente: Elaboración propia.

1.b. Variación de distancias

Con el objetivo de cuantificar las diferencias observadas en cada glaciar, se buscó el valor mínimo para cada uno de los meses estudiados por separado y se calculó la variación entre las distancias medidas:

$$\Delta d = d_1 - d_{min}$$

Donde Δd es la variación entre las distancias d_1 y d_{min} . d_1 es cada medición obtenida mientras que d_{min} es la mínima obtenida para el glaciar en el mes en que se está trabajando.

Mediante el uso de esta metodología, el procedimiento resulta replicable sin importar las imágenes de las cuales se tomen las mediciones, la cantidad y extensión temporal de las imágenes ni el glaciar en el cual se aplique.

2. Análisis climático regional. Temperatura y precipitaciones

Las variables climatológicas: temperatura y precipitaciones fueron recopiladas de la estación agrometeorológica de El Calafate perteneciente al Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), ubicada en las costas del lago Argentino (50.36472° S, 72.27278° O), y de la estación meteorológica del aeropuerto de Lord Cochrane (47,243888°S, 72,58299° O), perteneciente a la Dirección

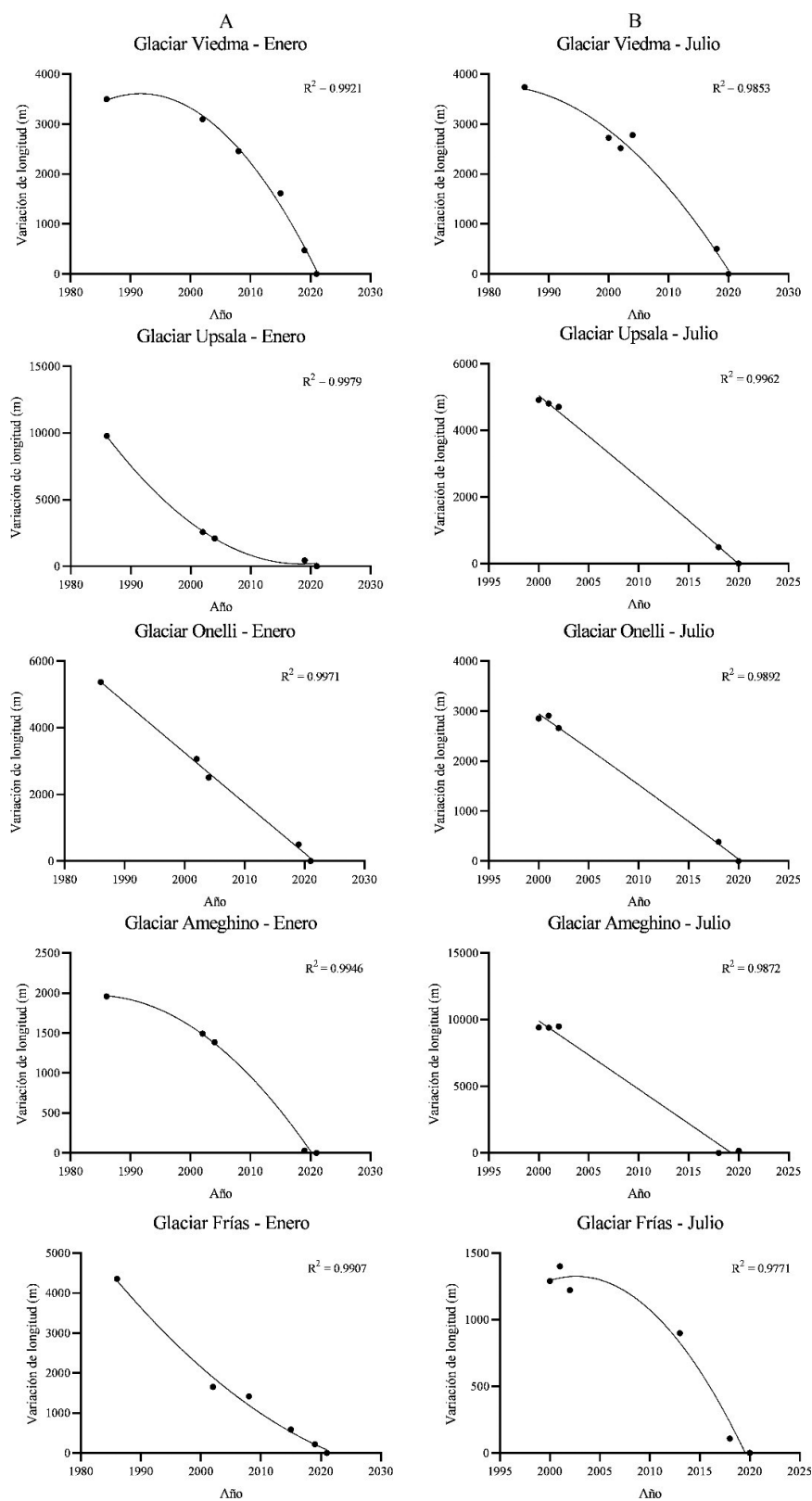
General de Aeronáutica Civil (DGAC) de la Dirección Meteorológica de Chile (Figura 1). Los datos de la estación de El Calafate abarcan el período de 2008 a 2018. De la estación de Lord Cochrane, se obtuvieron datos de la serie temporal 1971 a 2021, con algunos faltantes de años intermedios. En ambos casos se utilizaron agrupamientos mensuales para analizar los datos. La central meteorológica de Chile se encuentra al norte del campo de hielo estudiado, por lo que resulta poco representativa de la zona de estudio. Además, se debe considerar que los glaciares estudiados se encuentran en áreas muy remotas donde la obtención de datos meteorológicos mediante mediciones de estaciones *in situ* es imposible debido a su inaccesibilidad.

Resultados

Respecto de la evaluación de las longitudes de los campos glaciares, pudimos observar que todos los glaciares estudiados presentan longitudes mínimas entre el año 2015 y 2021. El 75 % de las mediciones mínimas se encontraron entre 2020 y 2021. Por el contrario, no se registraron longitudes mínimas en ninguno de los ocho glaciares medidos en las dos estaciones con anterioridad al 2015.

Figura 3

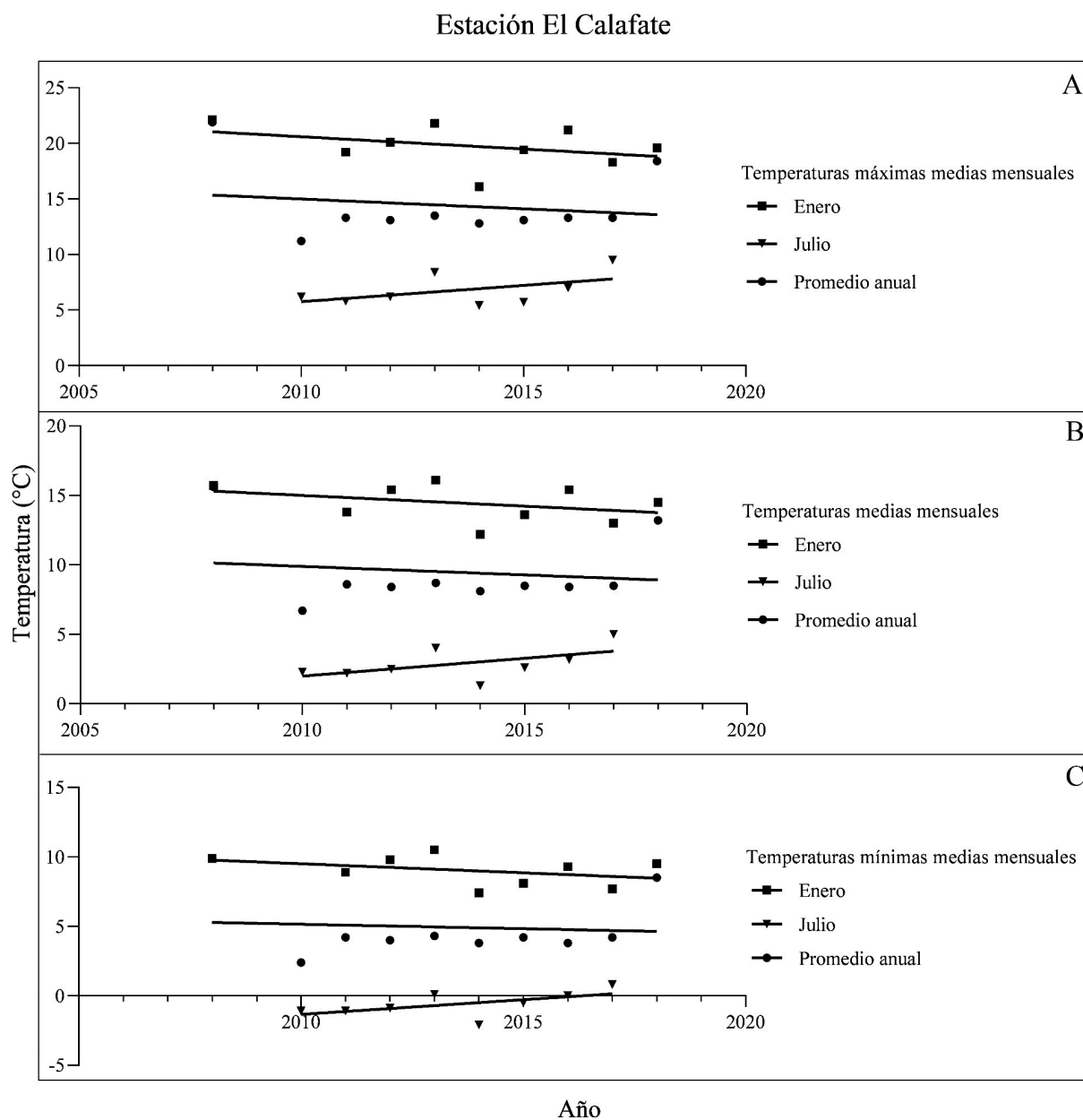
Variaciones en las longitudes de los glaciares Viedma, Upsala, Onelli, Ameghino y Frías.



Nota. Mediciones de la variaciones en las longitudes (metros) de los glaciares Viedma, Upsala, Onelli, Ameghino y Frías, durante los meses de enero (A) y julio (B) entre 1986 y 2021. Para cada uno de los glaciares se muestra la regresión polinómica y su grado de ajuste. Fuente: Elaboración propia.

Como muestra la Figura 3, los glaciares Viedma, Upsala, Onelli, Ameghino y Frías tienen una clara tendencia de retroceso. El glaciar Viedma disminuyó casi 4000 metros de su longitud máxima, el Upsala mostró un retroceso de aproximadamente 10 km entre los años 1986 y 2021, el Ameghino disminuyó su tamaño unos 1960 metros entre los meses de enero de 1986 y 2021. También se observa que en los meses de julio entre el año 2000 y el 2020 hubo una disminución de aproximadamente 10 000 metros. Este cuerpo de hielo es el único que muestra una divergencia amplia en los comportamientos entre enero y julio. El glaciar Frías muestra una disminución de 4356 metros desde enero de 1986. Los glaciares Torre, Perito Moreno y Spegazzini no muestran tendencias significativas.

Considerando que los cambios climáticos podrían explicar el comportamiento de los glaciares, realizamos un análisis climatológico de la región relevando los datos de la variable temperatura de las estaciones meteorológicas de las localidades de El Calafate y Lord Cochrane. Los datos obtenidos de la estación agrometeorológica de El Calafate dependiente del INTA y analizados muestran una reducción en el rango de temperaturas entre los meses de enero y julio comparando las temperaturas medias máximas y medias mínimas (Figura 4). Las temperaturas medias mínimas del mes de julio se elevaron desde $-1,1^{\circ}\text{C}$ en 2010 a $0,8^{\circ}\text{C}$ en 2017, igualando y superando el umbral de los 0°C en los últimos dos años de mediciones; las temperaturas medias fluctuaron entre los $2,3^{\circ}\text{C}$ hasta los 5°C en el mismo período temporal, y las medias máximas aumentaron $3,3^{\circ}\text{C}$ entre 2010 y 2017, llegando hasta los $9,5^{\circ}\text{C}$. Contrariamente, las temperaturas medias mínimas en los meses de enero son levemente más frías, y la tendencia parecería ser opuesta: entre los años 2008 y 2018 ha habido un descenso de $0,4^{\circ}\text{C}$ entre las temperaturas medias mínimas, un descenso de $1,2^{\circ}\text{C}$ entre las temperaturas medias y de $2,5^{\circ}\text{C}$ entre las temperaturas medias máximas. La misma tendencia se observa cuando se analizan las temperaturas medias anuales. Nótese que la cantidad de mediciones en la estación de El Calafate es insuficiente para analizar los datos con el objetivo de definir un patrón climático zonal.

Figura 4*Temperaturas máximas, mínimas y medias promedio en la Estación Meteorológica El Calafate.*

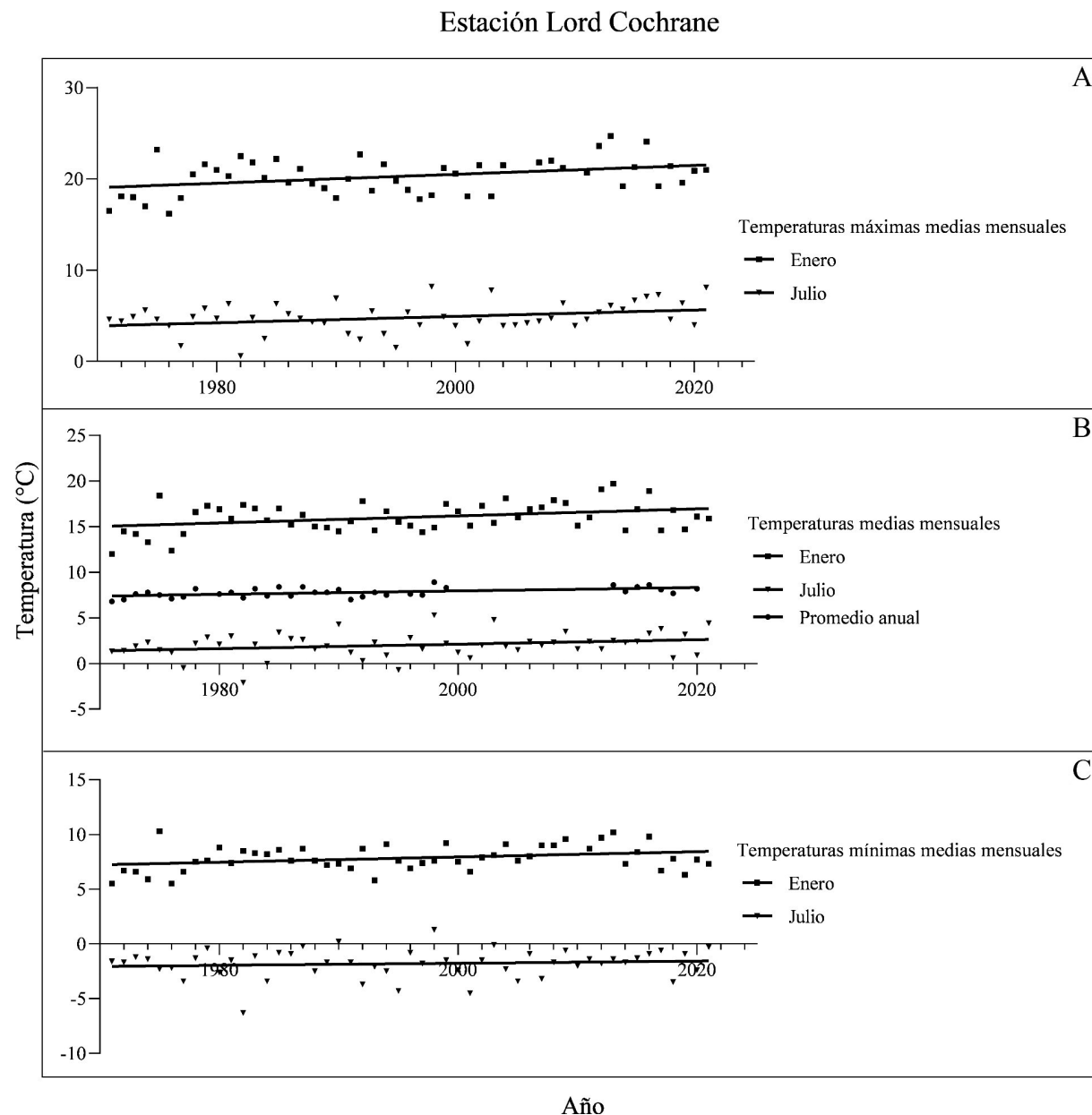
Nota. Temperaturas máximas, medias y mínimas obtenidas en la estación agrometeorológica de El Calafate medidas en grados celsius (°C) entre los años 2008 a 2018. A: Temperaturas máximas medias para los meses de enero y julio y el promedio anual. B: Temperaturas medias para los meses de enero, julio y el promedio anual. C Temperaturas mínimas medias para los meses de enero, julio y el promedio anual. Fuente: Elaboración propia.

Las temperaturas máximas medias en la estación de Lord Cochrane (Figura 5) muestran una tendencia al aumento, durante los meses de enero y de julio. Durante los meses de enero de los años 1971 y 1974, las temperaturas máximas medias oscilan alrededor de los 17,4 °C, mientras que entre 2018 y 2021, el promedio es de 20,7 °C. Durante el mes de julio se observa un incremento de 0,9 °C de los promedios de las temperaturas, tanto en los primeros como en los últimos cuatro años. Una tendencia

muy similar se muestra en el caso de las temperaturas medias mensuales. Las temperaturas obtenidas por promedio anual muestran una menor dispersión en asociación con la tendencia. Se puede observar que en el periodo comprendido entre los años 1971 y 1978 se observó que la temperatura promedio fue de $7,4^{\circ}\text{C}$ y de $8,2^{\circ}\text{C}$ entre los años 2013 y 2018. Finalmente, las temperaturas mínimas medias parecen tener un aumento más leve, con una tendencia que permanece casi constante a lo largo de los años estudiados.

Figura 5

Temperaturas máximas, mínimas y medias promedio en la Estación Meteorológica Lord Cochrane.

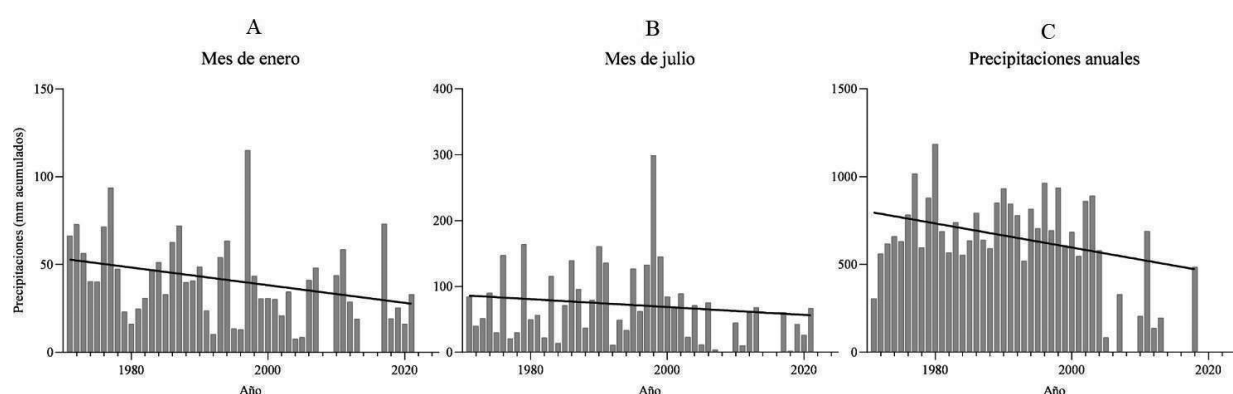


Nota. Temperaturas máximas, medias y mínimas obtenidas en la estación aeronáutica de Lord Cochrane medidas en grados celsius entre los años 1971 a 2021. A: Temperaturas máximas medias para los meses de enero y julio. B: Temperaturas medias para los meses de enero, julio y el promedio anual. C. Temperaturas mínimas medias para los meses de enero y julio. Fuente: Elaboración propia.

Respecto de las precipitaciones, de los datos obtenidos de la estación meteorológica de Lord Cochrane, se observa una disminución en la cantidad de milímetros acumulados anualmente (Figura 6). Desde el año 1972 hasta el año 2004 inclusive, las precipitaciones acumuladas anuales no descendían del umbral de los 500 mm, y a partir del año 2004 se observaron valores por debajo de este umbral, que promedian los 268 mm de precipitaciones anuales. A pesar de que hay una tendencia evidente hacia la disminución de las precipitaciones en el área, las precipitaciones durante los meses de enero y julio parecen mostrar comportamientos similares. Las tendencias muestran un descenso de alrededor de 22 mm entre la acumulación de enero, que representa aproximadamente un 42 % de las precipitaciones típicas del mes en los primeros años de la serie temporal, y de 10 mm en la acumulación de julio, cercano a un 10 %.

Figura 6

Precipitaciones medias medidas en la estación meteorológica Lord Cochrane.



Nota. Precipitaciones medidas en milímetros acumulados en la estación de Lord Cochrane entre 1971 y 2021 (barras) y su línea de tendencia. A: mediciones obtenidas durante el mes de enero. B: mediciones obtenidas durante el mes de julio. C: mediciones obtenidas a partir de la sumatoria anual.

Fuente: Elaboración propia.

Conclusiones y discusión

En este trabajo observamos un retroceso de los glaciares Ameghino, Viedma, Upsala, Frías y Oñelli, siendo notorios el paulatino incremento de las temperaturas máximas y medias mensuales y la disminución de las precipitaciones. Este retroceso fue observado en los grandes glaciares de la región (Masiokas, 2020) y en glaciares pequeños (Masiokas, 2015), como una tendencia general que describe el área. No se observó el mismo comportamiento en los glaciares Perito Moreno, Torre y Spegazzini.

Estos hallazgos podrían indicar que el menor volumen de precipitación, que deriva en menor acumulación de nieve en los campos de hielo de la región de los Andes del sur de la Patagonia Argentina, podría ser en parte responsable del retroceso observado; sin embargo, también podría deberse al aumento de las temperaturas, que genera un mayor derretimiento (Rabassa, 2011). En última instancia, esto afectaría el tamaño de los glaciares de una forma compatible con las mediciones obtenidas.

Una de las limitaciones del trabajo es la disponibilidad de datos, ya que estos se obtuvieron exclusivamente de las imágenes satelitales de la misión Landsat durante los meses de enero y julio. Durante estos meses se obtuvieron gran cantidad de imágenes con cobertura nubosa. Sería muy importante la obtención de un mayor número de imágenes con mejor nitidez mediante la extensión del recorte temporal o la incorporación de imágenes de otros satélites con su correspondiente ajuste espacial para mantener las escalas de medición. Se sugiere la incorporación de imágenes de radar de apertura

synthetic (SAR for its siglas in inglés), cuya captura de rasgos superficiales es independiente de las condiciones meteorológicas.

Respecto de los datos climatológicos, es importante mencionar que la estación meteorológica de El Calafate no tiene relevados los datos correctamente. No ocurre lo mismo con la estación meteorológica de Lord Cochrane, que posee datos más extendidos en el tiempo y más completos, aunque no resulta igualmente representativa del área de estudio. Los vientos y los regímenes de lluvias pueden variar de acuerdo con la latitud y los relieves de cada zona de la Cordillera de los Andes, por ello, sería ideal complementar los datos de las estaciones de El Calafate y de Lord Cochrane con otros datos meteorológicos obtenidos con sensores remotos o cualquier otra fuente más específica del área de estudio.

Los glaciares Perito Moreno y Ameghino son unos de los glaciares que no muestran retroceso significativo en el periodo estudiado. Existen estudios (Minowa *et al.*, 2015) que analizan el comportamiento de estos dos glaciares. El Ameghino parece mostrar un leve retroceso, pero tiene una importante pérdida de masa en altura. Por otra parte, el glaciar Perito Moreno no posee un retroceso significativo. Sin embargo, se concluye en el estudio que a futuro podría adecuarse a las tendencias regionales.

En consecuencia, es de interés comprender qué otras variables afectan el comportamiento de los glaciares, además de la cantidad de precipitación y las temperaturas regionales. Sin dudas, se trata de un ecosistema complejo, en el que las interrelaciones entre los diferentes componentes del medio tienen diferentes grados de influencia sobre los comportamientos estudiados.

Referencias

- Correa, M. (1998). *Flora Patagónica*. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA).
- Instituto Argentino de Nivología, Glaciología y Ciencias Ambientales (IANIGLA). (2018a). *Inventario Nacional de Glaciares. Resumen ejecutivo de los resultados del Inventario Nacional de Glaciares*. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación.
- Instituto Argentino de Nivología, Glaciología y Ciencias Ambientales (IANIGLA). (2018b). *Inventario Nacional de Glaciares. Informe de la subcuenca del Lago Viedma. Cuenca del río Santa Cruz. Parque Nacional Los Glaciares*. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación.
- Instituto Argentino de Nivología, Glaciología y Ciencias Ambientales (IANIGLA). (2018c). *Inventario Nacional de Glaciares. Informe de la subcuenca Brazo Norte del Lago Argentino. Cuenca del río Santa Cruz. Parque Nacional Los Glaciares*. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación.
- Instituto Argentino de Nivología, Glaciología y Ciencias Ambientales (IANIGLA). (2018d). *Inventario Nacional de Glaciares. Informe de las subcuencas Brazo Sur del Lago Argentino y río Bote. Cuenca del río Santa Cruz. Parque Nacional Los Glaciares*. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación.
- Malagnino, E. C. (2008). El Campo de Hielo Patagónico Sur. Un pasado, un presente... y un futuro incierto. En Sitios de Interés Geológico de la República Argentina, *Servicio Geológico Minero Argentino. Instituto de Geología y Recursos Minerales* (pp. 815-837). <https://repositorio.segemar.gob.ar/handle/308849217/1375>
- Masiokas, M. H., Rabatel, A., Rivera, A., Ruiz, L., Pitte, P., Ceballos, J. L., Barcaza, G., Soruco, A., Bown, F., Berthier, E., Dussaillant, I. & MacDonell, S. (2020). A Review of the Current State and Recent Changes of the Andean Cryosphere. *Frontiers in Earth Science*, 8. <https://doi.org/10.3389/feart.2020.00099>
- Masiokas, M. H., Delgado, S., Pitte, P., Berthier, E., Villalba, R., Skvarca, P., Ruiz, L., Ukita, J., Yamamoto, D., Tadono, T., Marinsek, S., Couvreur, F. & Zalazar, L. (2015). Inventory and recent changes of small glaciers on the northeast margin of the South Patagonian Icefield, Argentina. *Journal of Glaciology*, 61(227), 511–523. <http://doi.org/10.3189/2015JoG14J094>

- Minowa, M., Sugiyama, S., Sakakibara, D., and Sawagaki, T. (2015). Contrasting glacier variations of Glaciar Perito Moreno and Glaciar Ameghino, Southern Patagonia Icefield. *Annals of Glaciology*, 56(70), 26–32. doi:10.3189/2015AoG70A020
- Pedace, R., & Vega, C. (2011). Glaciares: algo más que hielo... Para entender los impactos del cambio climático sobre los ecosistemas, las comunidades y el agua en Aedo, M. & Montecinos, T. (Ed.), *Glaciares andinos, recursos hídricos y cambio climático: desafíos para la justicia climática en el Cono Sur* (1 ed., pp. 9-21). Programa Chile Sustentable.
- Povedano, H. E., & Bisheimer, M. V. (2016). *Aves Terrestres De La Patagonia*. Povedano.
- Rabassa, J. O. (2007). El impacto del cambio climático en los glaciares patagónicos y fueguinos. *Ciencia Hoy*, 17 (97), 50-57.
- Rodríguez Catón, M. R., & Villalba, R. (2018). Indicadores del decaimiento en bosques de *Nothofagus pumilio* en el norte de la Patagonia, Argentina. *Madera y Bosques*, vol. 24, N.º 2 Instituto de Ecología A.C. <https://doi.org/10.21829/myb.2018.2421588>
- Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación. (2019). *Atlas de Glaciares de la Argentina*. Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación. https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/atlas_glaciares_parte_1.pdf
- Suárez, R., Ghiglione, M., Calderón, M., Sue. C., Martinod, J., Guillaume, B., Rojo, D. (2019). The metamorphic rocks of the Nunatak Viedma in the Southern Patagonian Andes: Provenance sources and implications for the early Mesozoic Patagonia-Antarctic Peninsula connection. *Journal of South American Earth Sciences*, Volume 90, 471-486.