



# Análisis geomorfológico e identificación de amenazas asociados al cambio climático en la cuenca del Glaciar Torrecillas, Parque Nacional Los Alerces, Patagonia Argentina

**Agustina REATO<sup>1</sup>, Lorena PERCUDANI<sup>1</sup>, Bruno COLAVITTO<sup>2</sup>, Luciano LÓPEZ<sup>3</sup>, Camilo ROTELA<sup>4</sup> y Oscar A. MARTÍNEZ<sup>5</sup>**

<sup>1</sup> CONICET – Centro de Investigación Esquel de Montaña y Estepa Patagónica (CIEMEP– UNPSJB), Esquel (Chubut)

<sup>2</sup> CONICET - Universidad de Buenos Aires. Instituto de Estudios Andinos “Don Pablo Groeber” (IDEAN). Buenos Aires, Argentina.

<sup>3</sup> CONICET - Instituto de Recursos Minerales (INREMI). Facultad de Ciencias Naturales y Museo. Universidad Nacional de La Plata, La Plata,

<sup>4</sup> Departamento de Conservación y Educación Ambiental (APN-PNLA), Villa Futalaufquen (Chubut)

<sup>5</sup> Facultad de Cs. Naturales y Cs. de la Salud, Universidad Nacional de la Patagonia San Juan.Bosco, Esquel

Email: agustinareato@comahue-conicet.gob.ar

**Editor:** Andrés Bilmes

Recibido: 21 de mayo de 2023

Aceptado: 20 de noviembre de 2023

## RESUMEN

En la cuenca del Glaciar Torrecillas, ubicada en la cordillera Norpatagónica, en el Parque Nacional Los Alerces, se han identificado fenómenos paraglaciales que están introduciendo importantes modificaciones en el área. La glaciología del sector es compleja dado que coexisten y se vinculan un glaciar descubierto en la cabecera y un glaciar cubierto de detrito ubicado aguas abajo. Considerando que el sitio reviste un alto valor natural y científico y que está siendo utilizado con fines turísticos se ha procedido a estudiar la morfo-dinámica pasada y presente del área, con el fin de identificar posibles comportamientos futuros en el sector, asociados principalmente a eventos de desborde repentino del lago proglacial (*Glacial Lake Outburst Flow*). Mediante el análisis y comparación temporal de imágenes satelitales, fotografías aéreas, modelos digitales de elevación, y control de campo, se ha confirmado un rápido retroceso del glaciar cubierto en los últimos 14 años y el desarrollo de una mayor intensidad de los procesos paraglaciales. Se destaca la ocurrencia de un desborde repentino del lago proglacial, ocasionado por el ingreso súbito de un volumen de más de 12000 m<sup>3</sup> de detritos, nieve y hielo hacia el lago proglacial, proponiéndose como factor desencadenante precipitaciones y temperaturas por encima del promedio. Complementariamente se han reconocido otros sectores que amenazan las propuestas de uso del área de estudio. Debido al aumento de temperatura y disminución de las precipitaciones que se observa en las últimas décadas, y a la variabilidad climática reconocida, es importante profundizar el estudio y monitoreo de zonas inestables y riesgosas para detectar potenciales fenómenos gravitacionales de manera temprana.

**Palabras clave:** Remoción en masa, paraglaciarismo, calentamiento global

## ABSTRACT

*Geomorphological analysis and identification of threats associated with climate change in the Torrecillas Glacier basin, Parque Nacional Los Alerces, Patagonia Argentina.*

In the Torrecillas Glacier watershed, located in the North Patagonian Andes, in the Parque Nacional Los Alerces, paraglacial processes that are introducing essential changes in the area have been identified. The glaciology and geomorphology of this sector are complex, characterized by the coexistence of a free glacier at the headwaters and a debris-covered glacier downstream within a watershed

exhibiting significant geomorphological activity. The past and present morphodynamics of this area have been studied to identify possible future behaviors, especially those related to *Glacial Lake Outburst Flow* events. Field control and the analysis and comparison of temporal satellite images, aerial photographs and Digital Elevation Model allowed the recognition of the rapid retreat of the covered glacier in the last 14 years and the development of a greater intensity of paraglacial phenomena. Besides, in recent years a *Glacial Lake Outburst Flow* type event was caused by the sudden entry of more than 12.000 m<sup>3</sup> of debris, snow, and ice into the proglacial lake. Precipitation and temperatures above the average are being proposed as the triggering factor. Additionally, the detailed study of the Glaciar Torrecillas watershed allowed the recognition of threatening areas. Due to rising temperatures and decreasing precipitation in the last decades, and the short-term climate variability registered in the area, it is necessary to study and monitor unstable sites to detect gravitational phenomena.

**Key words:** Gravitational processes, paraglacialism, global warming

## INTRODUCCIÓN

En los sectores más occidentales y topográficamente más elevados de la Cordillera Norpatagónica se conservan reliquios de los glaciares que formaron parte del Manto de Hielo de Montaña Patagónico durante el Pleistoceno (Clapperton 1993). Sin embargo, los mismos se encuentran en retroceso a un ritmo acelerado respecto a otras regiones de la Cordillera de los Andes. Esto se debe principalmente a las condiciones extremadamente áridas imperantes en ésta región desde 2010 (Davies y Glasser 2012, Dussailant et al. 2019, Masiokas et al. 2020). El retroceso de las masas de hielo genera, por un lado, la formación de lagos proglaciales y por otro, deja expuestas laderas de pendientes abruptas, muchas veces cubiertas por material inconsolidado, que son propensas a generar procesos de remoción en masa (Hubbard et al. 2005, McColl 2012, Rounce et al. 2016, Rounce et al. 2017, Moragues et al. 2019). Esta situación puede implicar un riesgo geológico en sitios donde hay interacción humana (Winocur et al. 2015, Moragues et al. 2019). Estos procesos no glaciales pero condicionados directamente por el ambiente glacial son típicos de los ambientes denominados paraglaciales (Ryder 1971, Church y Ryder 1972, Ballantyne 2002).

En este tipo de ambientes, muchas veces asociados a procesos de remoción en masa, son habituales los eventos de desborde repentino del lago proglacial ó *Glacial Lake Outburst Flow*. Los desbordes repentinos de lagos proglaciales incluyen diversos factores condicionantes y eventos disparadores (Harrison et al. 2018). A grandes rasgos, se pueden identificar aquellos que ocurren por (a) la ruptura de los diques naturales (usualmente, morenas frontales) que contienen a los lagos proglaciales o (b) el desborde de agua por alguna de las márgenes de un lago proglacial; en cualquiera de los casos, entre los disparadores más comunes está el ingreso súbito de una avalancha de rocas, hielo o nieve hacia

el cuerpo de agua (Richardson y Reynolds 2000, Emmer y Cochachin 2013, Liu et al. 2013, Rounce et al. 2016).

A nivel mundial los eventos de desborde repentino del lago proglacial (*Glacial Lake Outburst Flow*) han generado daños y pérdidas de vidas humanas en tiempos relativamente recientes, por ejemplo, en la Cordillera Blanca (Perú) y en los Alpes Europeos (Carey 2008, Carrivick y Tweed 2016, Taylor et al. 2023). En los Andes Patagónicos del Sur se han registrado eventos de tipo *Glacial Lake Outburst Flow* en el Brazo Rico y Brazo Sur del Lago Argentino (provincia de Santa Cruz), asociados a la retracción del Glaciar Perito Moreno (Chinni y Warren 2004). Winocur et al. (2015) describieron un evento reciente de inundación en el Lago Argentino, debido a un megadeslizamiento en el cuerpo lacustre del brazo Upsala. Por su parte, un informe del Servicio Geológico Minero Argentino (Winocur et al. 2015, Schmidt et al., 2022, Balbi et al. 2019) analiza la estabilidad de la ladera norte del cerro Solo, y la potencialidad de que se produzca un evento de tipo *Glacial Lake Outburst Flow* en la laguna Torre (El Chaltén, Santa Cruz), producto de procesos de remoción en masa asociados al retiro del glaciar. En la Cordillera Norpatagónica han sido descritos diferentes eventos de tipo *Glacial Lake Outburst Flow* vinculados al retiro de las masas glaciares. En el lago Témpanos, en las inmediaciones del glaciar Frías, Rabassa et al. (1978) vincularon la ruptura de la morena frontal que contenía al lago proglacial a un evento de tipo *Glacial Lake Outburst Flow*, ocurrido en la década del 40'. En la laguna Derrumbe, en las nacientes del lago Cholilla, Colavitto et al. (2012) reconocieron los depósitos vinculados a un *Glacial Lake Outburst Flow*, ocurrido entre las décadas del 50' y 60'. En mayo de 2009, la morena terminal del Ventisquero Negro, en el Monte Tronador, colapsó producto del aumento del nivel del lago proglacial debido a intensas precipitaciones (Worni et al. 2012). Estos eventos, conjuntamente con aquellos ocurridos en la vertiente pacífica de la cordillera, han sido recopilados

dos en distintos inventarios regionales (Iribarren Anacona et al. 2014, Wilson et al., 2018, Colavitto et al. 2022).

El presente trabajo se focaliza, a partir del análisis geomorfológico de los ambientes glaciarios y paraglaciarios, en la identificación, caracterización y evaluación de potencial recurrencia de eventos de desborde repentino de lagos proglaciales (o *Glacial Lake Outburst Flow*) y de remoción en masa que tuvieron lugar la cuenca del glaciar Torrecillas en los últimos quince años. En este sector han sido registrados eventos de inundación repentina de diferentes escalas, afectando recientemente el sendero de acceso y uso turístico (Martínez y Reato 2018). Debido a la marcada actividad que reviste la cuenca del arroyo Torrecillas, y al interés científico que presentan este tipo de áreas en la observación del cambio climático global, se han propuesto como objetivos de trabajo a) lograr un mejor conocimiento de la dinámica de los cuerpos glaciarios del área b) describir y caracterizar el ambiente paraglacial y los procesos geomorfológicos asociados al mismo (esencialmente procesos de remoción en masa y eventos tipo *Glacial Lake Outburst Flow*) c) determinar el estado de amenaza natural relacionada con fenómenos paraglaciarios y su relación con la degradación glaciaria y d) proponer escenarios futuros que atiendan a los objetivos de conservación y de uso público del sector.

## CARACTERÍSTICAS DEL ÁREA DE ESTUDIO

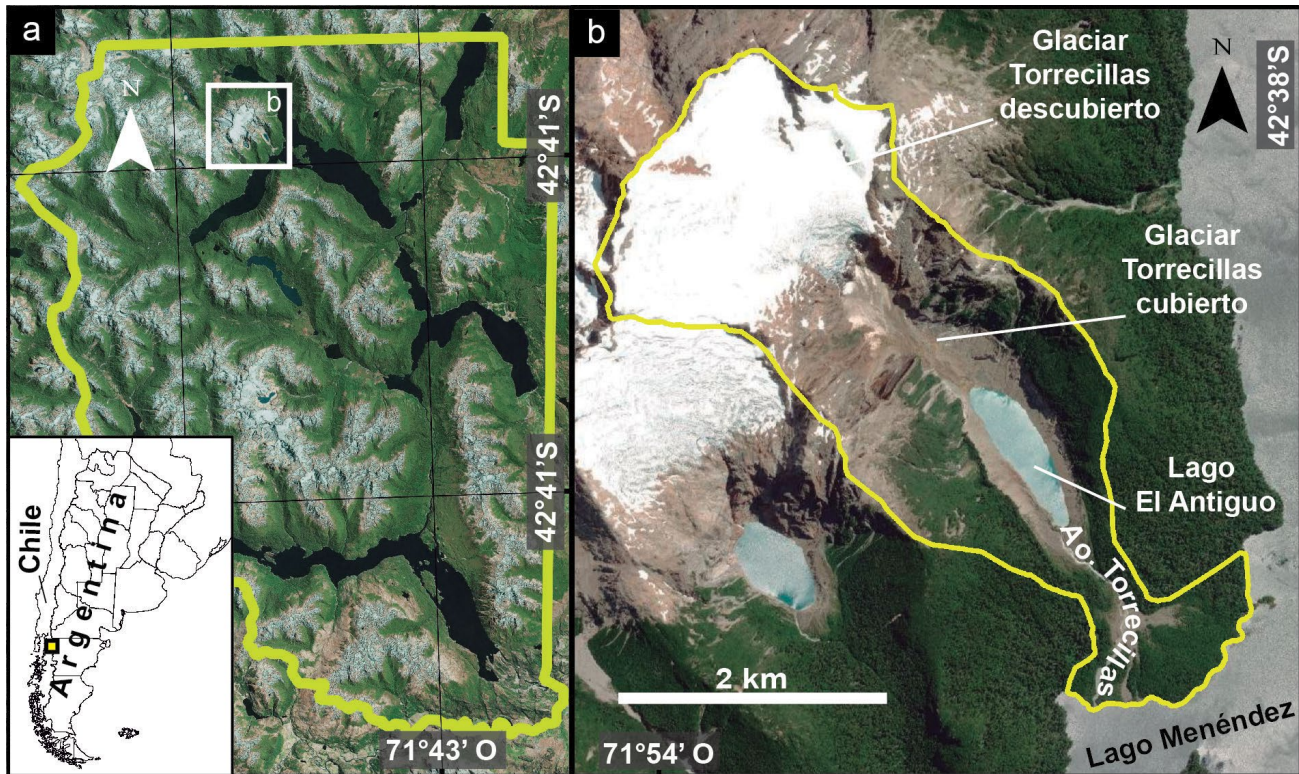
El área estudiada en este trabajo coincide con una cuenca hídrica de 11 km<sup>2</sup> que ocupa parte de la ladera suroriental del Cerro Torrecillas (2200 m s.n.m.) en el Parque Nacional Los Alerces, (42°38'36.00" de latitud sur y 71°56'7.73" de longitud oeste), en el noroeste de la provincia de Chubut, (Fig. 1). La cabecera de esta cuenca está conformada por una masa de hielo principal descubierta (i.e., Glaciar Torrecillas descubierta). Este glaciar alimenta por avalanchas de hielo, nieve y rocas a un glaciar cubierto de detritos (i.e., Glaciar Torrecillas cubierto), que corresponde a un cuerpo de hielo relíctico. El Glaciar Torrecillas cubierto se encuentra separado del Glaciar Torrecillas descubierta por una ladera vertical de roca desnuda, de más de 80 m de altura. Entre la ladera vertical y el Glaciar Torrecillas cubierto, se encuentra una zona de acumulación de hielo y nieve, descubierta de detritos, que también alimenta al Glaciar Torrecillas cubierto. El Glaciar Torrecillas cubierto se ubica a unos 650 m aguas abajo de su homónimo descubierta, confinado en el fondo del valle (Fig. 1). A unos 100 m de distancia del mismo se encuentra el lago El Antigu, alimentado por las aguas de fusión glacial, ubicado en

un valle glaciario con laderas de 100 m de altura y pendientes de hasta 50°, cubiertas de till y escasamente vegetadas. En la margen oriental de este lago, a 750 m s.n.m., nace El Arroyo Torrecillas el cual escurre, con una pendiente aproximada de 13°, atravesando un conjunto de morenas frontales holocenas (Garibotti y Villalba 2009). Este curso de agua se encajona luego en un sustrato constituido por rocas volcánicas para desembocar en el lago Menéndez sobre el cual ha desarrollado un delta (Fig. 1).

El Glaciar Torrecillas cubierto ha mostrado un acelerado retroceso en el último siglo (Masiokas et al. 2008), generando un lago proglacial hacia el frente y dejando al descubierto laderas cubiertas de till (material poco consolidado). Entre los días 20 y 27 de septiembre de 2018 ocurrió una crecida extraordinaria del lago El Antigu producto del desplazamiento de una masa de detritos y hielo movilizadas desde las laderas que circunscriben al glaciar cubierto, y desde el frente del mismo, hacia el cuerpo lacustre (Martínez y Reato 2018). Esto ocasionó un evento de inundación de tipo *Glacial Lake Outburst Flow*, ocurrido por desborde del lago El Antigu. Este evento afectó la senda de uso turístico que accede hasta el entorno del glaciar y sectores de la planicie de inundación del arroyo Torrecillas, afectando también algunas de las terrazas fluviales adyacentes al curso. El evento fue reportado inicialmente por prestadores turísticos locales, quienes reconocieron modificaciones en el cauce del arroyo Torrecillas y los disturbios ocasionados en la senda. Mediante análisis geomorfológicos *in situ* y la observación detallada de imágenes satelitales previas y posteriores al evento, se delimitó la zona afectada por la inundación y se determinaron las causas posibles.

Las rocas presentes en el área de estudio son las volcánicas de la Formación Lago La Plata de edad jurásica y los granitoides del Batolito Andino de edad cretácica (Lizuin 2010). Los depósitos modernos, que cubren buena parte de los sectores medios e inferiores de la cuenca, son de naturaleza glaciogénica, que en su gran mayoría conservan la morfología de morenas marginales (laterales y frontales) depositadas durante la Pequeña Edad de Hielo (Garibotti y Villalba 2009). En el sector distal de la cuenca predominan los depósitos fluviales, asociados al valle del Arroyo Torrecillas y al delta que culmina en el lago Menéndez.

El clima del área de estudio es del tipo frío-templado húmedo de transición, con una temperatura media anual de 8.1°C, una máxima de 24.1°C y una mínima de 2.1°C (APN 1997, Coronato et al. 2017). Se registran heladas frecuentes, incluso durante la temporada estival. El anticiclón del Pacífico determina la presencia de vientos del oeste, que debido al efecto de barrera orográfica (Prohaska 1976) provocan abundantes precipitaciones en el área, cuyo promedio es de 2000



**Figura 1.** a) Área de estudio en el contexto del Parque Nacional Los Alerces (contorno amarillo); b) Detalle de la zona de estudio donde se destacan los principales elementos de la cuenca: el Glaciar Torrecillas descubierto, el Glaciar Torrecillas cubierto, el lago El Antiguo, el arroyo Torrecillas y el Lago Menéndez.

mm de precipitación anuales concentradas esencialmente en el invierno (PG-PNLA 2019-2029). En toda la región del Parque Nacional Los Alerces (PNLA) las precipitaciones tienen un marcado gradiente oeste-este, con promedios anuales de 3000 mm en el sector occidental y entre 800 y 900 mm en el sector oriental. Esta situación meteorológica determina la transición entre el clima húmedo del oeste con el clima semi-árido hacia el este (PG-PNLA, 2019-2029).

## METODOLOGÍA

### Mapeo geomorfológico

El mapeo geomorfológico de la región fue realizado mediante el análisis de fotografías aéreas (fotogramas del Instituto Geográfico Nacional tomadas en enero del 1981), imágenes satelitales de Google Earth, World Imagery Map y Bing Maps (~5 m o menos de resolución espacial), Modelos Digitales de Elevación (MDE) de la misión SRTM (<https://earthexplorer.usgs.gov/>, de 30 m de resolución espacial), fotografías aéreas y MDE (resolución espacial en el orden de los centímetros) obtenidas mediante vuelos de Vehículos Aéreos No Tripulados (VANT) y trabajos de campo. Los vuelos fotogramétricos se realizaron con un equipo Dji Mavic Enterprise

2 Dual, en modo de vuelo manual, con planificación de vuelo realizada previamente en gabinete, manejado por personal del área de Incendios Comunicación y Emergencias (ICE) del Parque Nacional Los Alerces, en febrero y abril del 2023. Los ortomosaicos (10.1 cm/pixel) y MDE (20.1 cm/pixel) se generaron mediante el uso de *structure from motion - Multiview Stereo* (SfM-MVS) en AgiSoft Metashape Professional (versión 1.5.2). A partir de los MDE se realizaron mediciones morfométricas y cálculos volumétricos de diferentes geoformas y depósitos reconocidos en el campo y en los ortomosaicos, como geoformas de remoción en masa, depósitos de detritos, entre otros. Toda la información cartográfica fue centralizada en un Sistema de Información Geográfica de acceso libre (QGIS, versión 3.10.14). Los mapas elaborados fueron proyectados en UTM Zona 19S, usando el datum WGS84. Las geoformas relevadas fueron caracterizadas según su forma, tamaño y ubicación, clasificándolas según el proceso geomorfológico que les dio origen y según su grado de actividad.

### Análisis temporal del Glaciar Torrecillas

Para analizar el comportamiento del Glaciar Torrecillas cubierto y Glaciar Torrecillas descubierto se analizaron las fotografías aéreas, (fotogramas del Instituto Geográfico Nacional tomadas en enero del 1981) imágenes satelitales del 2009,

2016, 2018 y 2021 extraídas de Google Earth y los ortomosaicos obtenidos a partir de un vehículo aéreo no tripulado con fecha de adquisición en febrero y abril del 2023. También se analizaron fotografías de campo históricas (fotos obtenidas en 1898-1900 del Archivo Cancillería Chubut, Comisión de límites y de 1936, obtenidas a partir de Registros del Parque Nacional Los Alerces) y fotografías tomadas en las últimas décadas mediante cámaras digitales. Para conocer la dinámica del frente del glaciar cubierto, las imágenes satelitales y los ortomosaicos obtenidos fueron georreferenciados y ortorrectificados en sistema de coordenadas UTM zona 19S con datum WGS84, en el software de uso libre (QGIS, versión 3.10.14). A partir de estas imágenes se compararon las distintas posiciones del frente del glaciar cubierto y se cuantificó la tasa de retroceso del mismo según diferentes análisis temporales.

### Análisis climático

Se analizaron las mediciones pluviométricas y de temperatura media mensual de la estación meteorológica del centro experimental INTA (43° 7' 21" latitud sur y 71° 33' 38" longitud oeste). Ésta estación abarca un prolongado registro de datos históricos de precipitación y temperatura en las cercanías del área de estudio (1972-2022). A partir de éstos datos se realizó un análisis general del comportamiento climático de las últimas 5 décadas y un análisis detallado del clima para los últimos 20 años. El análisis detallado de los últimos 20 años surge de observar un pico en las precipitaciones pluviales durante el 2002, que presenta un marcado descenso en las precipitaciones medias para los años posteriores. Para los datos de precipitaciones se calculó la precipitación acumulada anual y se obtuvo la tendencia del comportamiento de las precipitaciones para el periodo completo. Para los datos de temperatura se promediaron los valores medios mensuales para cada año y se obtuvo la tendencia en el comportamiento de la temperatura media anual para todo el periodo. Además, se analizaron los promedios de temperatura para las estaciones de verano (diciembre, enero y febrero) e invierno (junio, julio y agosto) de cada año y luego se obtuvo la tendencia en el comportamiento de la temperatura para dichas estaciones. Debido a la inexistencia de los datos correspondientes a los años 1974-1979, 1989 y 2011, éstos no fueron incorporados en los análisis. Por su parte, existe ausencia de registro de datos de temperatura en algunos meses de los años 1981, 1984, 1985 y 1987. Los datos faltantes se completaron en base a la propuesta metodológica de Bastidas et. al (2020), que utiliza el promedio de temperaturas anuales anterior y posterior al año donde se encuentra el mes faltante, la temperatura media mensual correspondiente al mes problema y la

temperatura media anual de la serie de datos. La metodología presenta una limitante cuando el mismo mes de años consecutivos no tiene datos, razón por la cual las medias anuales de los años 1983, 1984 y 1985 no fueron incorporadas en la media anual de la serie completa.

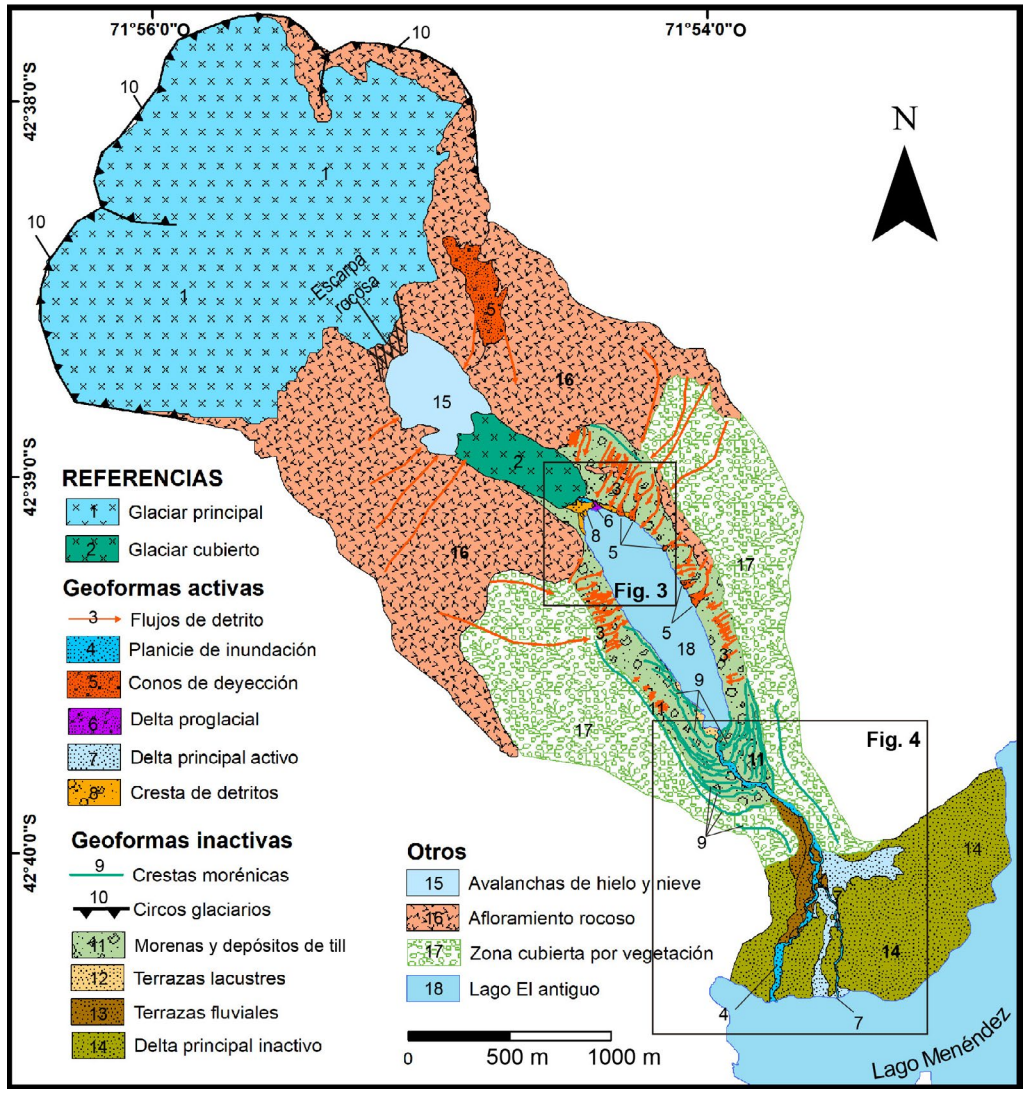
Por otra parte, se estudiaron las condiciones meteorológicas particulares para el caso del evento de inundación extraordinaria en la cuenca del Arroyo Torrecillas, ocurrido durante el mes de septiembre de 2018 (Martínez y Reato 2018). Se colectaron los datos provenientes del análisis climático ERA-5, del Centro Europeo de Predicción a Mediano Plazo (o ECMWF por sus siglas en inglés). En particular, se utilizó la integral del vapor de agua (IVT, por sus siglas en inglés), con la cual se analizó la situación atmosférica en los días que se sospecha ocurrió el evento. El análisis de estos datos se realizó mediante un algoritmo en el programa R, utilizado por Colavitto et al. (2022) para la detección de eventos de tipo "ríos atmosféricos en Patagonia". A su vez, se utilizaron los datos de precipitación (y temperatura) de las estaciones Bahía Rosales (datos proporcionados por la administración del Parque Nacional Los Alerces) y Arrayanes-Lago Verde (Secretaría de Infraestructura y Política Hídrica de la Nación, <https://snih.hidricosargentina.gob.ar/>) para realizar series de tiempo más detalladas.

A partir del análisis integral de los datos geomorfológicos, del análisis temporal del comportamiento del glaciar y de los datos meteorológicos, se analizaron los procesos geomorfológicos ocurridos en el área y se establecieron las principales causas y/o desencadenantes de los mismos. Este análisis permitió formular posibles comportamientos futuros del sector. Información de gran utilidad para colaborar en la toma de decisiones en relación al uso del área de estudio.

## RESULTADOS

### Geomorfología

Los glaciares Glaciar Torrecillas cubierto y Glaciar Torrecillas descubierto constituyen relictos de lo que fue el Manto de Hielo de Montaña Patagónico del Pleistoceno. El sustrato del Glaciar Torrecillas descubierto lo constituye una serie de al menos 3 circos ubicados en las cabeceras de la cuenca estudiada (entre los 2200 y los 1550 m s.n.m.). La cabecera del arroyo Torrecillas está conformada por al menos tres circos glaciares que contienen al Glaciar Torrecillas descubierto (Fig. 2). Aguas abajo del Glaciar Torrecillas descubierto se desarrolla un valle de origen glaciario que conserva su forma en artesa y que contiene en su parte proximal al Glaciar Torrecillas cubierto. Este cuerpo de hielo presenta en la actualidad



**Figura 2.** Mapa geomorfológico de la cuenca del Glaciar Torrecillas, donde se destacan las geomorfias activas e inactivas del área de estudio, diferenciando los depósitos que no conservan una morfología clara.

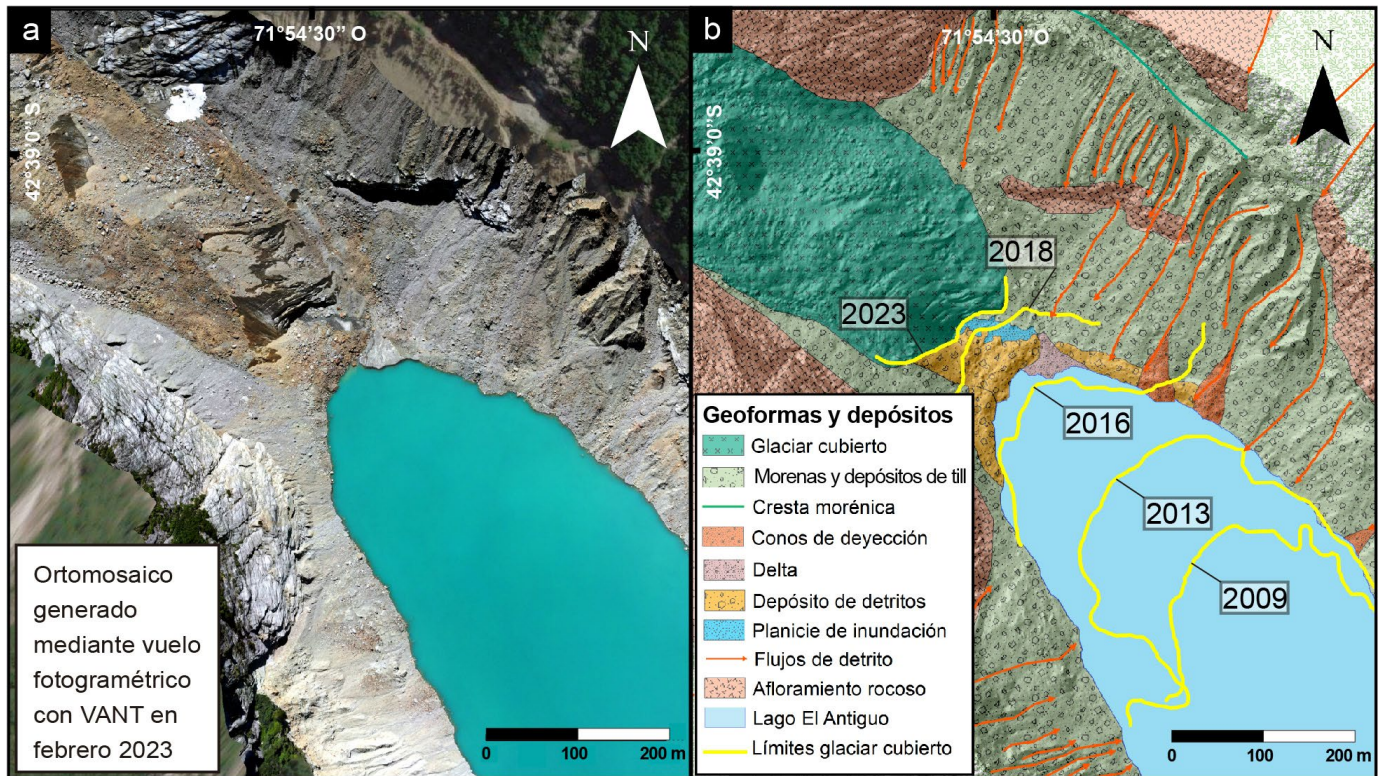
una longitud aproximada de 700 m, y un espesor de 60 m, con una cobertura de detritos prácticamente continua de por lo menos 50 cm, aunque contiene bloques que superan el metro de diámetro. Las paredes rocosas que limitan el Glaciar Torrecillas cubierto presentan pendientes que superan en algunos casos los 70° y constituyen la principal fuente de aporte detrítico sobre la superficie de dicho cuerpo de hielo mediante desprendimientos y caída de rocas. En el ámbito del lago El Antiguo las laderas de la artesa, de unos 50° de inclinación, aparecen cubiertas por depósitos de till, que son afectados en la actualidad por flujos y caída de detritos (deyección) que alcanzan las márgenes del lago (Figs. 2 y 3). Aguas abajo del valle se desarrollan al menos 11 crestas morénicas marginales (9 de las cuales corresponden a las morenas de la Pequeña Edad del Hielo mapeadas por Garibotti y Villalba 2009) que forman parte del cierre del lago El Antiguo.

Hacia el frente de las morenas marginales comienza el dominio de las geomorfias fluviales activas entre las que se

destaca el cañadón del arroyo Torrecillas. Este curso es sinuoso y desarrolla, en sectores muy localizados, una angosta planicie aluvial con diseño anastomosado. Sobre las márgenes de esta planicie aluvial se desarrollan al menos tres terrazas fluviales (Fig. 2). En el sector más distal de la cuenca aparece un delta que está progradando hacia el sur, con dos canales activos, aunque es el más occidental el que mantiene un régimen permanente en la actualidad.

### Comportamiento reciente de los glaciares

Tanto el Glaciar Torrecillas cubierto como el Glaciar Torrecillas descubierta han conformado un único cuerpo de hielo en el pasado reciente (Fig. 5a). El segmento más distal, correspondiente a la lengua glaciaria, presentaba para el año 1898-1899 una cubierta de detritos. El Glaciar Torrecillas cubierto y Glaciar Torrecillas descubierta se habrían desconectado en algún momento posterior al año 1981 según el registro de fotografías aéreas (Fotografías tomadas por el IGN



**Figura 3.** Glaciar Torrecillas cubierto: a) Ortomosaico (Febrero de 2023); b) Mapa geomorfológico, con delimitación del frente del glaciar cubierto durante los años 2009, 2013, 2016, 2018 y 2023 (datos extraídos del análisis de imágenes satelitales de Google Earth y ortomosaicos).

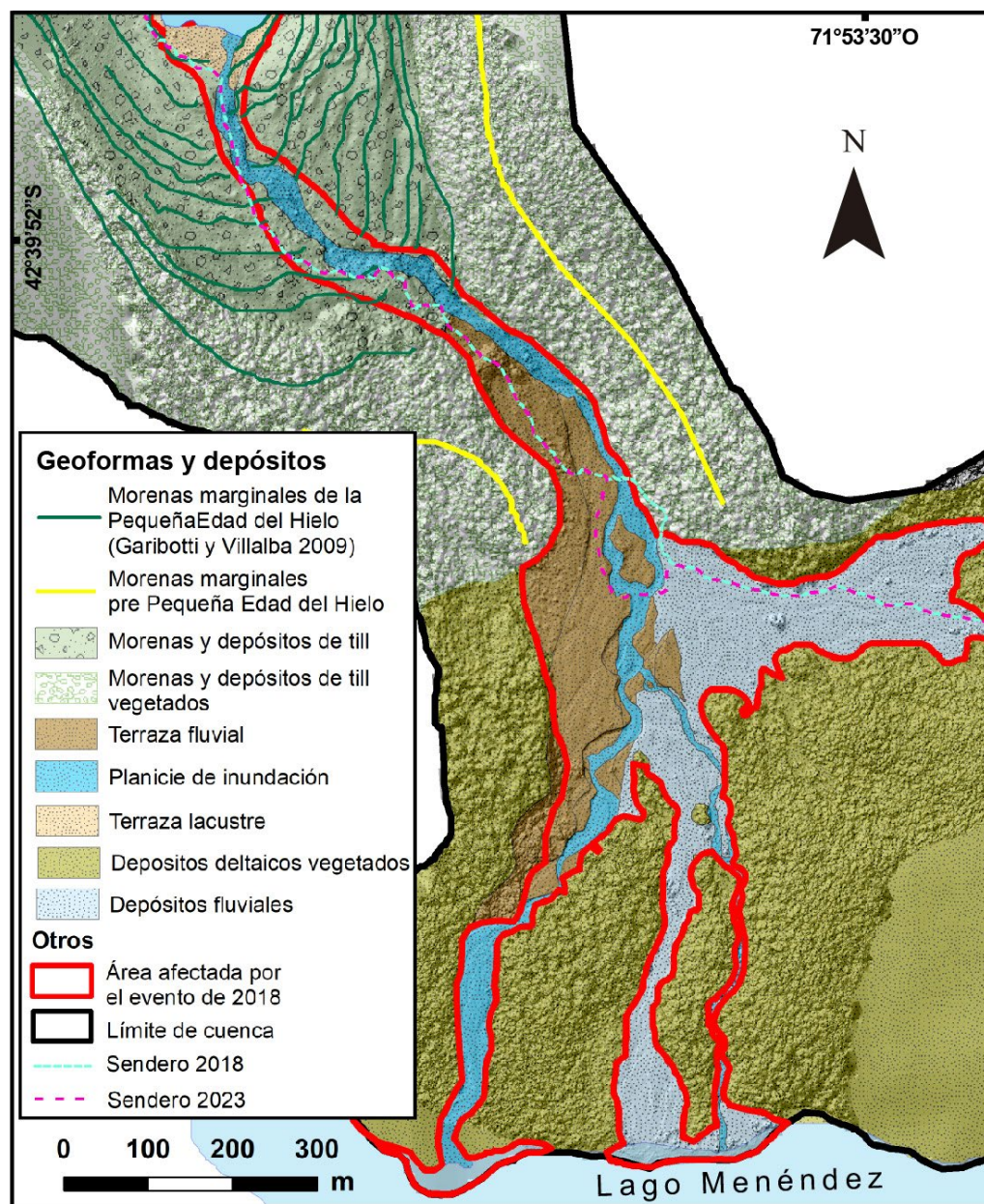
durante los vuelos fotogramétricos realizados en enero de 1981). Las fotografías más antiguas registradas muestran al frente del glaciar Torrecillas en contacto con el sistema fluvial para el 1898-1899 (Fig. 5a), mientras que para el año 1937 ya se reconoce la formación de un incipiente lago proglacial marginal, correspondiente a lo que hoy denominamos lago El Antigua (Fig. 5d y e).

Aunque se observan leves diferencias en la extensión del Glaciar Torrecillas descubierto entre 1898-1899 y el año 2023, el mismo no parece haber tenido importantes fluctuaciones por encima de los 1550 m.s.n.m. (Fig. 5 a y b). En la actualidad el frente del Glaciar Torrecillas descubierto es afectado por un constante desprendimiento de hielo y por una significativa producción de agua de ablación subglacial que fluye hacia el valle de El Antigua, fenómenos que fueron verificados en el campo, aunque las observaciones realizadas no han permitido constatar cambios en el espesor y la forma de éste glaciar durante la última década (Fig. 5 f y g).

El análisis de imágenes satelitales y fotografías de campo tomadas hacia el Glaciar Torrecillas cubierto han permitido reconocer modificaciones sustanciales en la posición de su frente en los últimos años, confirmándose un retroceso de alrededor de 400 m entre los años 2009 y 2023 (Fig. 3). Sin embargo, es posible reconocer una diferencia en la tasa de retroceso entre el periodo 2009-2016 y el periodo 2016-2023.

Desde el 2009 hasta el 2016 el frente del glaciar cubierto retrocedió con una tasa de 36 m/año, mientras que desde el 2016 al 2023, la tasa de retroceso fue de 16 m/año (Figs. 3 y 6). Hasta el año 2017 el glaciar cubierto se encontraba en contacto con el lago El Antigua, desconectándose del mismo para el año 2018 (Fig. 3). Esta desconexión se encuentra vinculada al evento de remoción en masa ocurrido en septiembre del 2018, en el cual un gran volumen de detritos, hielo y nieve alcanzó la superficie del lago El Antigua, afectando parte del frente del Glaciar Torrecillas cubierto (Figs. 4 y 6). Este depósito de detritos ubicado entre el frente del Glaciar Torrecillas cubierto y el lago El Antigua comenzó a funcionar como barrera entre ambos.

El comportamiento del lago El Antigua se ha modificado sustancialmente entre el 2009 y el 2023 en relación al retroceso del Glaciar Torrecillas cubierto. La superficie del lago en el 2009 era de 222.000 m<sup>2</sup>, mientras que para el 2023, alcanzó los 300.000 m<sup>2</sup>. Esto ha ampliado la zona de contacto entre las márgenes del lago y las laderas de los valles que circunscriben al mismo, que se encuentran cubiertas de till inconsolidado (Fig. 2 y 3). Desde 2018 hasta 2023 se ha podido monitorear con gran detalle el retroceso del frente del glaciar cubierto (Fig. 7). La ablación en este sector del glaciar cubierto es muy evidente en la base, en donde se ha generado una cavidad por la cual escurre un flujo subglacial. Se ha



**Figura 4.** Mapa geomorfológico del sector distal de la cuenca del Glaciar Torrecillas donde se observan los límites morénicos de la Pequeña Edad de Hielo (Garibotti y Villalba 2009) y morenas posiblemente anteriores a la PEH. En este sector se destaca la morfología fluvial, donde se diferencian terrazas fluviales y lacustres, la planicie de inundación activa, y el delta principal (vegetado y no vegetado). En base a rasgos geomorfológicos observados en campo (depósitos de sedimento fino en zona de planicie de inundación, detección de zonas erosionadas y alcance de troncos arrastrados por la crecida), se delimitó el alcance superficial que tuvo el evento ocurrido en septiembre de 2018 (Martínez y Reato 2018), correspondiente al trazo rojo en la figura.

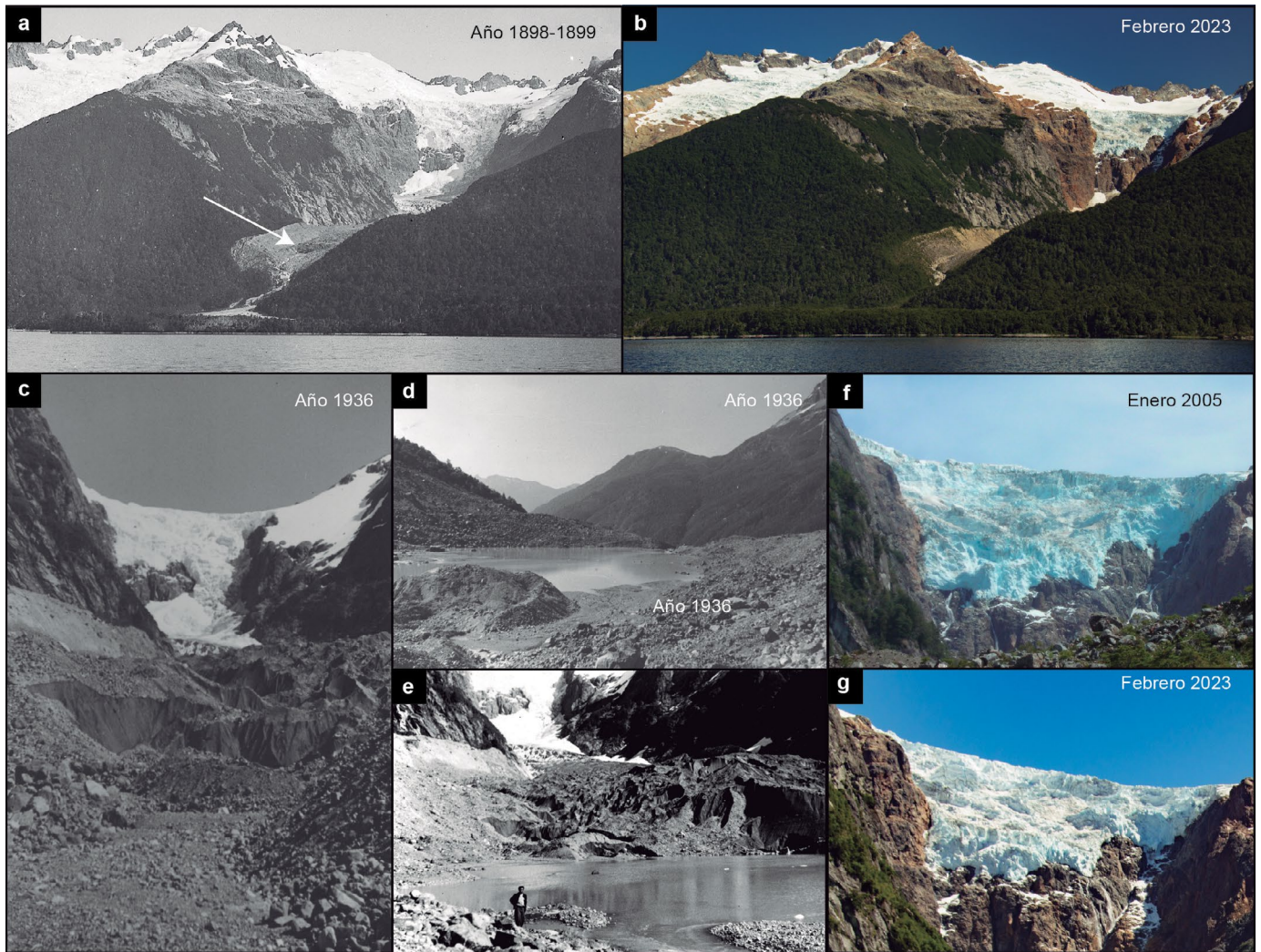
verificado la presencia de grietas transversales que disminuyen su tamaño y apertura hacia arriba. La continua ablación de éste frente genera la caída del material detrítico que se encuentra en el techo del glaciar cubierto hacia la zona de la planicie proglacial, entre el depósito de detritos generado en 2018 y el frente del glaciar (Figs. 6 y 7).

### Remoción en masa y eventos asociados (*Glacial Lake Outburst Flow*)

Observaciones locales de guías y prestadores turísticos dan cuenta de la existencia de pequeños aumentos repentinos y temporarios del nivel del lago, asociados a la caída de bloques o de hielo del frente del glaciar cubierto hacia el

cuerpo lacustre. Entre el 20 y 27 de septiembre del 2018 ocurrió el evento de inundación extraordinaria previamente descrito. Este evento ocurrió debido a un proceso de remoción en masa que afectó el frente del Glaciar Torrecillas cubierto, y que dejó un depósito de detritos (cresta de detritos en Figs. 2 y 7), nieve y hielo hacia el frente del glaciar (Figs. 3 y 10). El ingreso repentino de este depósito en el cuerpo lacustre ocasionó el aumento del nivel del lago en 3 m en la zona de desembocadura, generando una crecida identificada por evidencias geomorfológicas (alcance de sedimentos finos, altura de troncos removidos por la crecida, rasgos de erosión) de 8 m en los sectores más encajonados del arroyo. Esta crecida repentina, considerada como un evento de tipo o *Glacial Lake*





**Figura 5.** a) Fotografía del valle glaciario y Glaciar Torrecillas descubierto tomadas en 1898-1899 (Sr. Emilio Frey) durante la Exploración al Glaciar Torrecillas (Archivo Cancillería Chubut, Comisión de límites, Negativos de vidrio). La flecha blanca indica la posición del frente del Glaciar Torrecillas cubierto en el año 1898-1899, y la ubicación desde donde se tomaron las fotografías c), d) y e) en el año 1936; b) Fotografía del valle glaciario y del Glaciar Torrecillas descubierto tomada en febrero de 2023; c-e) Fotografías tomadas durante la campaña exploratoria de 1936 (Registro del PNLA, 1936); f-g) Fotografías del frente del Glaciar Torrecillas descubierto tomadas en enero del 2005 y febrero de 2023.

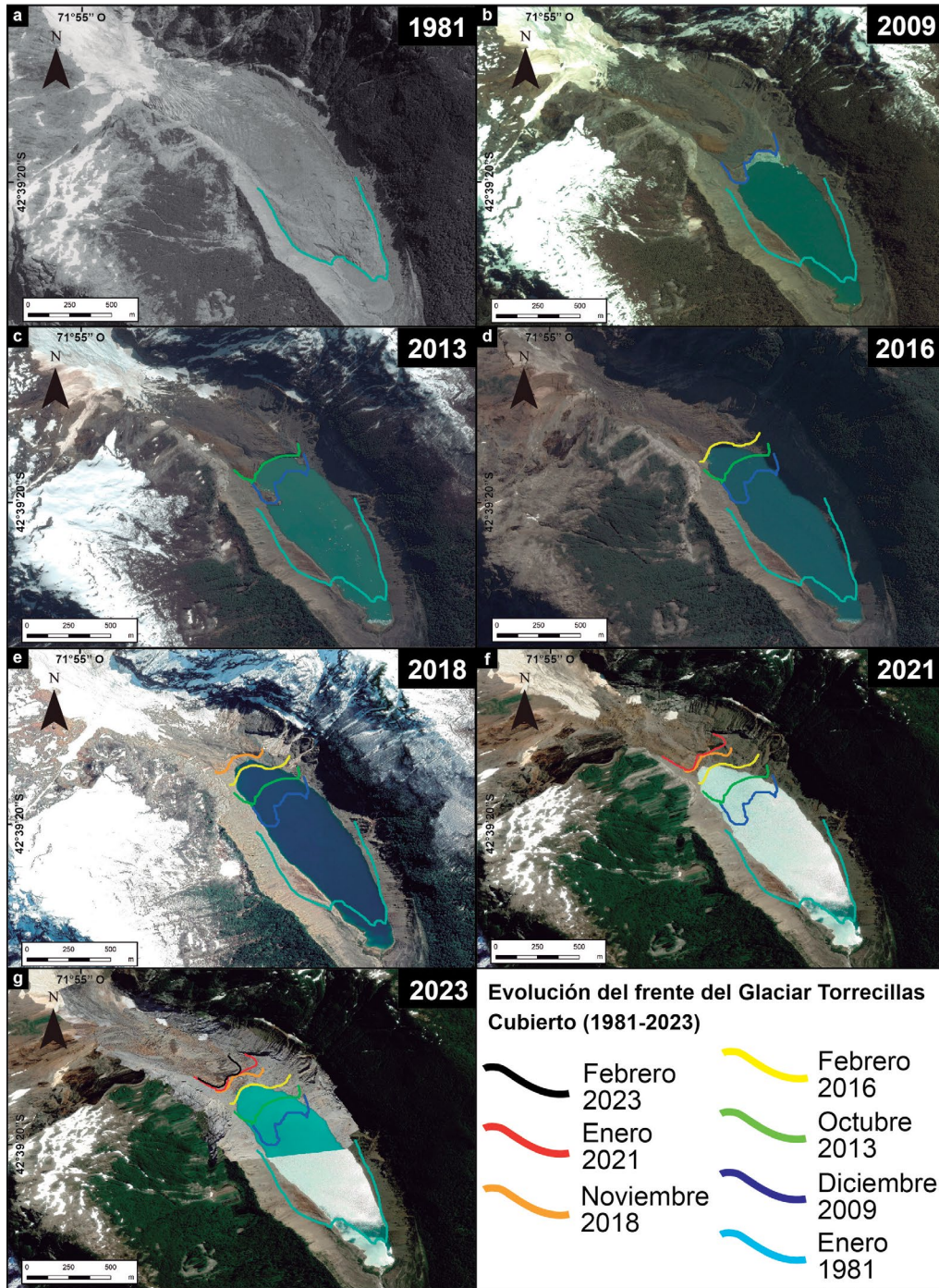
*Outburst Flow*, generó daños en la senda de uso turístico que accede hasta el Lago El Antigo (Ver área afectada por el evento del 2018 en Fig. 4).

El depósito de detritos acumulado por este evento de remoción en masa en el frente del glaciar cubierto tiene en la actualidad 70 m de largo, 30 m de ancho, 4 m de alto y un volumen estimado de 12000 m<sup>3</sup>. Se constituye mayoritariamente por bloques de roca de hasta 4 m de diámetro y muy escaso material fino donde predomina el tamaño de arena y limo, y escasa proporción de arcillas. El depósito generó un dique del desagüe del Glaciar Torrecillas cubierto observándose en mayo del 2022 un nuevo espejo de agua de 1900 m<sup>2</sup> de 10 a 20 cm de profundidad (dato obtenido de mediciones directas en el campo) ubicado 3 metros por encima del nivel del lago principal (Figs. 3 y 7). Éste nuevo nivel de base funciona como receptáculo del escurrimien-

to subglacial cargado de sedimentos limo-arcillosos. Sin embargo, en febrero de 2023 no se observó dicho espejo de agua, aunque si se reconocieron depósitos proglaciales dejados por el flujo subglacial. El flujo subglacial se infiltra en parte por debajo de la cresta de detritos ubicada en el frente del glaciar, y en parte escurren superficialmente por la pendiente de éstos depósitos hasta el lago El Antigo, donde desarrolla un pequeño delta. Esto modifica la dinámica del lago El Antigo, el cual recibe actualmente la descarga de agua subglacial y de cursos superficiales que escurren desde las laderas del valle (Fig. 7) atravesando una nueva planicie de inundación proglacial, que responde a un nuevo nivel de base local.

### Reconocimiento de zonas de peligrosidad

El mapeo geomorfológico realizado en el área de estu-

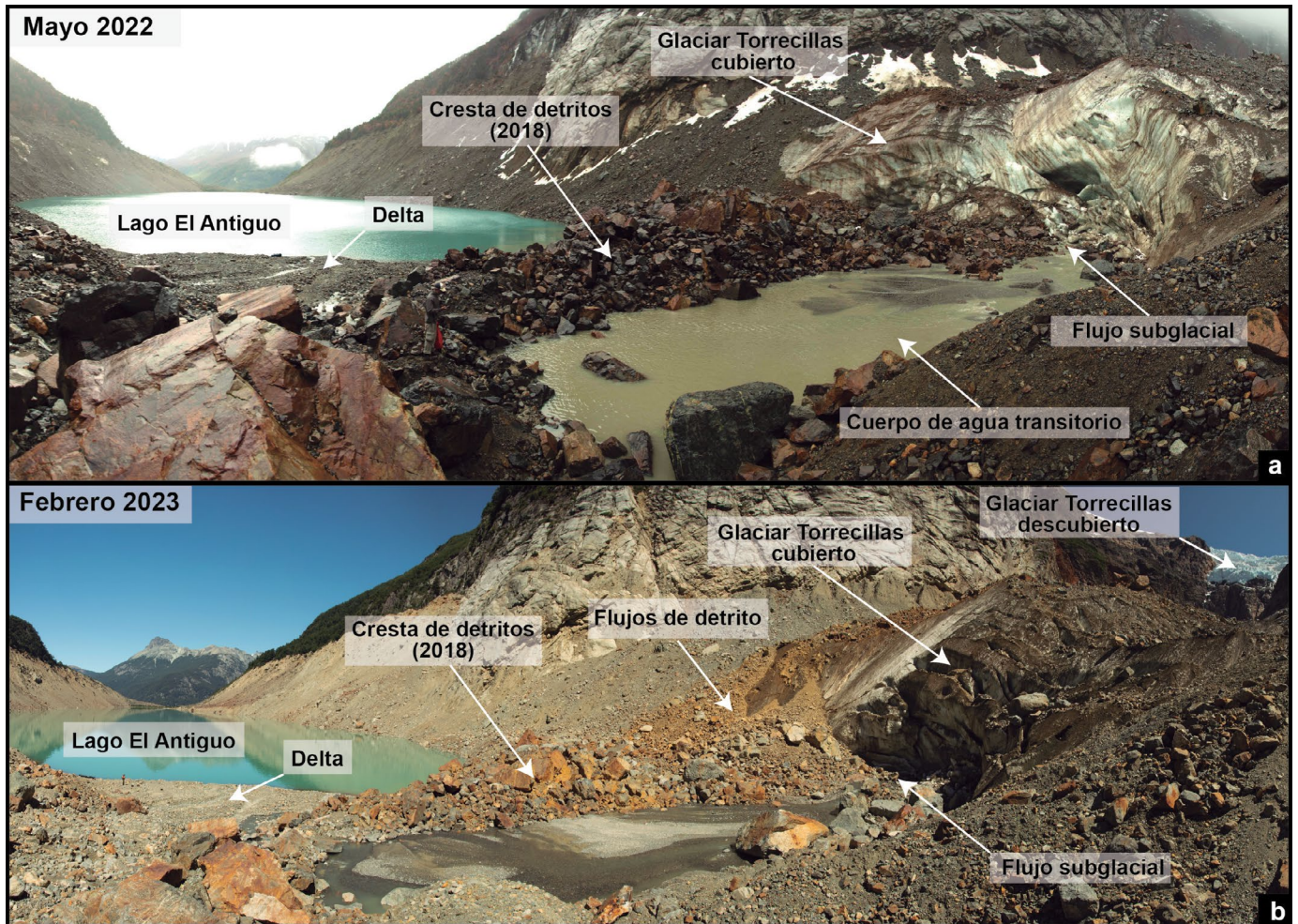


**Figura 6.** Comportamiento del glaciar cubierto y de la superficie lacustre desde 1981 hasta 2023. a) Fotografía aérea de enero de 1981 (IGN,1981), donde se observa que la lengua más externa del Glaciar Torrecillas cubierto ya presentaba una cubierta de detritos en su superficie; b-f) Imágenes satelitales extraídas de Google Earth, correspondientes a diciembre de 2009, octubre 2013, febrero 2016, noviembre 2018 y enero 2021 respectivamente. g) ortomosaico generado a partir de vuelos fotogramétricos realizados con VANT en febrero del 2023.

dio permitió reconocer zonas de peligro geológico (Figs. 2 y 3). Las zonas de mayor peligrosidad detectada constituyen aquellos sectores donde existe material suelto (usualmente till inconsolidado), apoyado sobre el afloramiento rocoso, en el sector occidental del lago, en su margen norte (Fig. 8). En la margen noroccidental del valle se conserva un relicto de una cresta morénica que está siendo erosionada por flujos de agua que escurren desde las zonas más altas producto del derretimiento de nieve, y que filtran a través del depósito no consolidado, entre la roca dura y la morena relíctica. Esta

porción de sedimento comprende un volumen aproximado de 250000 m<sup>3</sup>.

Si se compara la posición del Glaciar Torrecillas cubierto en el tiempo, hasta el 2016, la cresta morénica se encontraba inmediatamente por encima de la superficie del glaciar (Fig. 6). Luego del 2016, la cresta morénica quedó por encima de la superficie lacustre. Según el análisis de la pendiente, el depósito morénico inconsolidado podría afectar la superficie lacustre en caso de producirse una remoción en masa de éste depósito y ocasionar un *Glacial Lake Outburst Flow*.



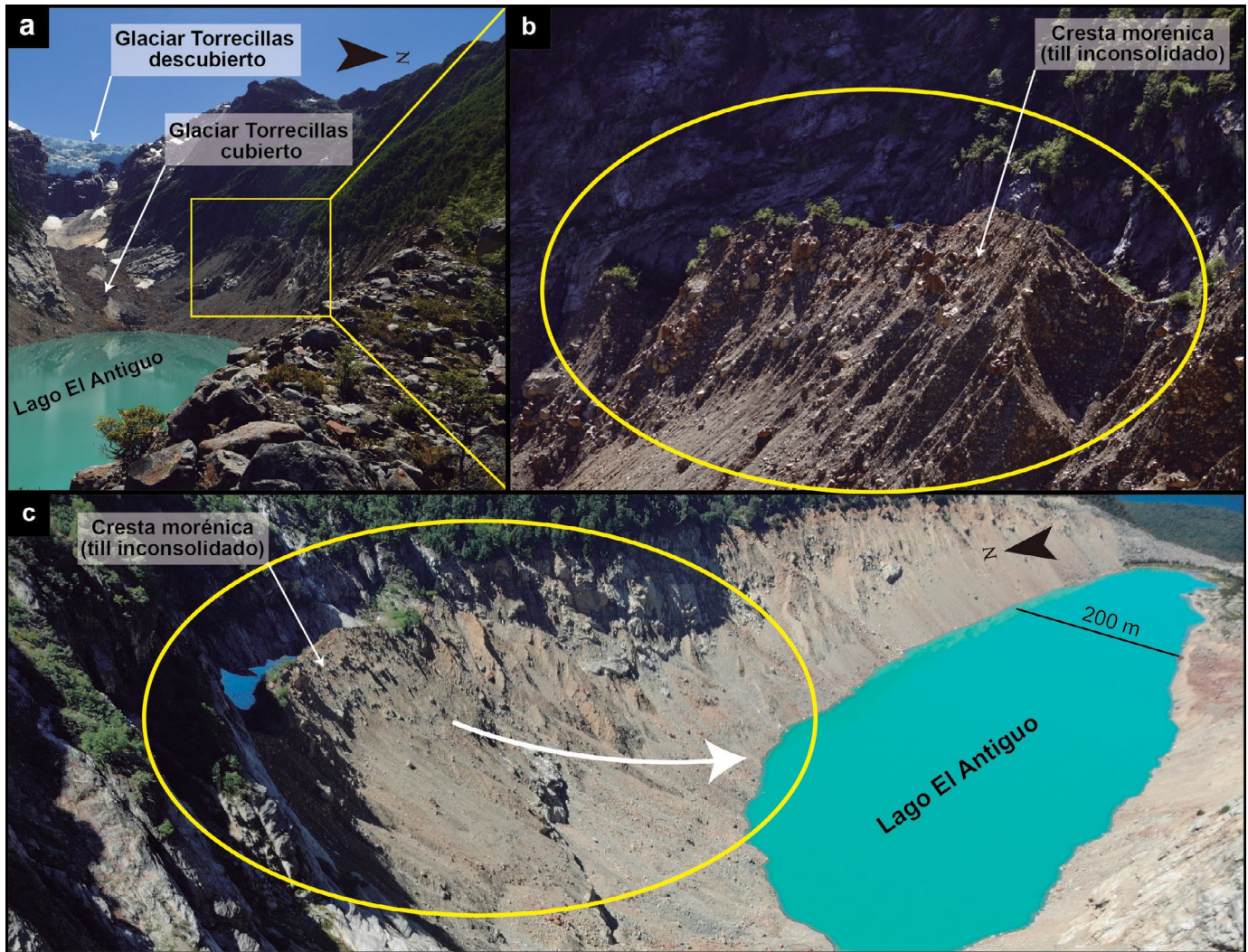
**Figura 7.** a-b) Panorámica donde se observa la relación entre el frente del Glaciar Torrecillas cubierto en contacto con la planicie aluvial desarrollada a partir de un flujo subglacial (curso de agua proglacial) que escurre desde la base del glaciar, y que es endicado parcialmente por el depósito de detritos dejado luego del evento del 2018.

### Condiciones climáticas

El análisis de los datos climáticos evidencia una tendencia en la disminución de las precipitaciones anuales y un aumento en la temperatura media anual para el periodo 1971-2022 para la región estudiada (Fig. 9 a y b). El análisis en detalle del comportamiento estacional (verano e invierno) para los últimos 20 años muestra que la línea de tendencia de las temperaturas medias, correspondientes a los meses de verano, presenta un aumento más pronunciado respecto a la línea de tendencia de las temperaturas medias de invierno (Fig. 9 c). Si bien se observan años con mayores precipitaciones y años con menores precipitaciones, mostrando, en una curva irregular una importante variabilidad climática, es interesante destacar la marcada disminución en la tendencia de las precipitaciones anuales observada para los últimos 20 años en la región (Fig. 9 c).

Por otra parte, los datos meteorológicos para las fechas en las que se presupone ocurrió el evento extraordinario en el Lago El Antiguo (entre el 20 y el 27 de septiembre de 2018) indican valores de precipitación fuera de las medias mensua-

les. Particularmente, los valores de precipitación diaria medidos en la estación Arrayanes-Lago Verde en los días 21 y 22 de septiembre (75 mm acumulados en 48 horas) superan ampliamente los valores climatológicos de precipitación mensual y el percentil 95 del mes (Fig. 10). Para la estación Bahía Rosales, se observó lo mismo con valores de precipitación por encima de los 30 mm diarios para los días 21 y 22 de septiembre. Por su parte, si bien poco precisos, los valores de temperatura provenientes de datos de reanálisis climático, pueden ser tomados como referencia, mostrando temperaturas máximas levemente por encima de la media mensual y el percentil 95 de los días previos al 21 de septiembre de 2018 (Fig. 10). Las intensas precipitaciones registradas podrían estar asociadas a un cuadro atmosférico compatible con el impacto de un río atmosférico. Ello se puede distinguir a partir del patrón de la integral de vapor de agua que impacta la Cordillera a las latitudes de estudio, estando asociado a su vez a un centro de baja presión característico de sistemas frontales a estas latitudes (Fig. 10).



**Figura 8.** a-b) Sector de correspondiente a depósitos morénicos inconsolidados. El depósito no consolidado se encuentra apoyado con un alto ángulo de reposo (alrededor de 70°) sobre la roca dura y se encuentra afectado estacionalmente por escurrimiento de agua (Fotos tomadas por Hernán Pirato Mazza); c) Foto tomada por un VANT el 17/02/2023, donde se observa el área de influencia que tendría un potencial deslizamiento del depósito de till.

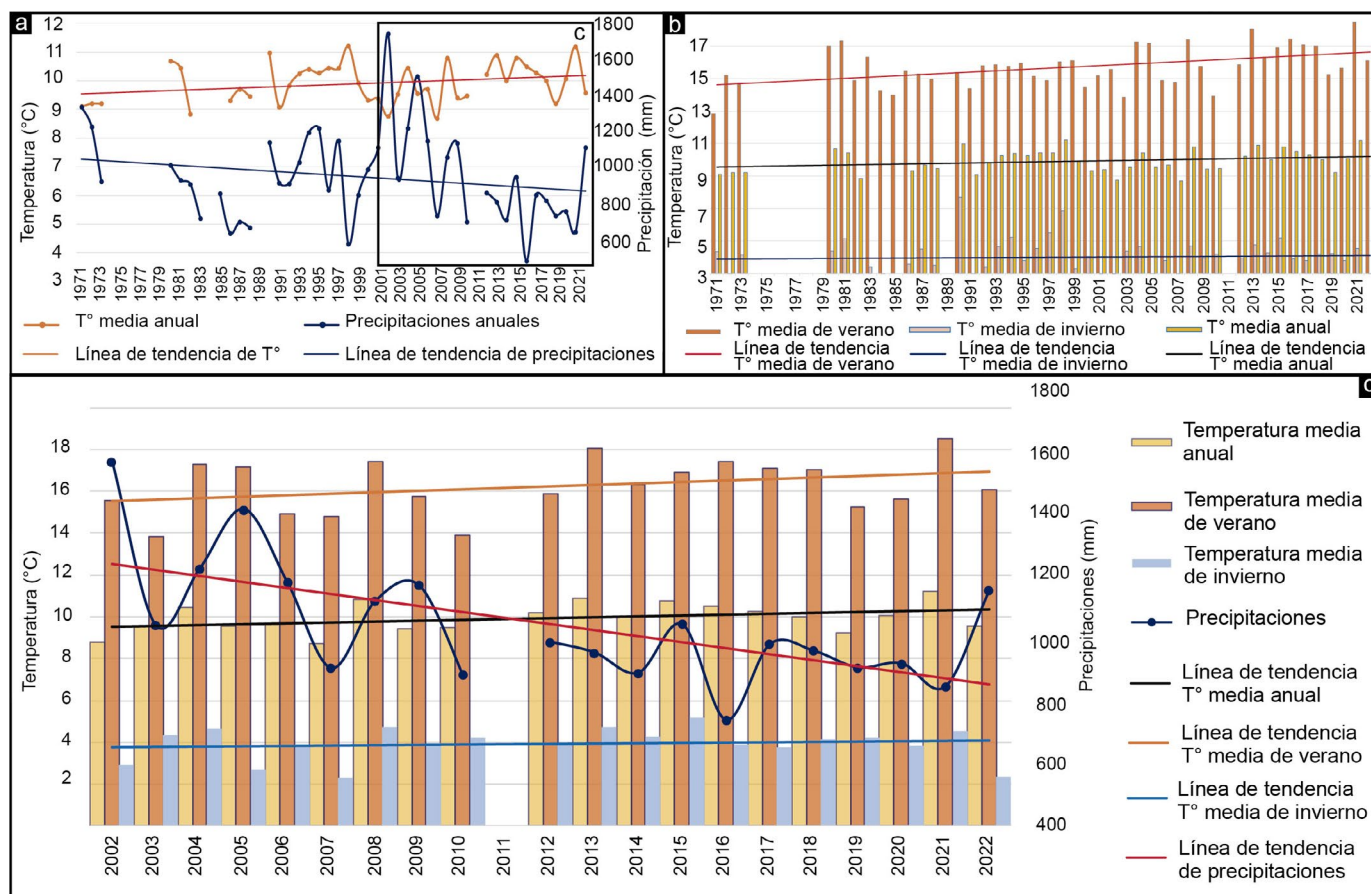
## DISCUSIÓN

La cuenca del Glaciar Torrecillas se encuentra actualmente influenciada por condiciones paraglaciaras, provocados por el retiro de la masa de hielo desde la Pequeña Edad del Hielo (Garibotti y Villalba 2009), con una mayor tasa de retracción durante las últimas décadas (Masiokas et al. 2008), que se ha acentuado en los últimos 14 años. Si bien no se cuenta con estudios glaciológicos en el Glaciar Torrecillas descubierto, el mismo no parece haber fluctuado significativamente desde fines del siglo XIX. Sin embargo, el Glaciar Torrecillas cubierto ha mostrado un acelerado retroceso durante las últimas décadas (Fig. 6). A partir de 2018, la posición del límite frontal del Glaciar Torrecillas cubierto ha disminuido su tasa de retracción, aunque los límites laterales muestran una importante reducción entre el 2021 y 2023 (Fig. 6 f y g). Estos

cambios en la posición de los límites frontales y laterales del Glaciar Torrecillas cubierto, sumado a condiciones climáticas particulares, como son la concentración de precipitaciones en lapsos de tiempo breves y temperaturas del aire por encima del promedio, han ocasionado el desarrollo de eventos de remoción en masa con distintas escalas de incidencia en el área de estudio, que podrían repetirse en el futuro cercano.

### Comportamiento del ambiente glacial

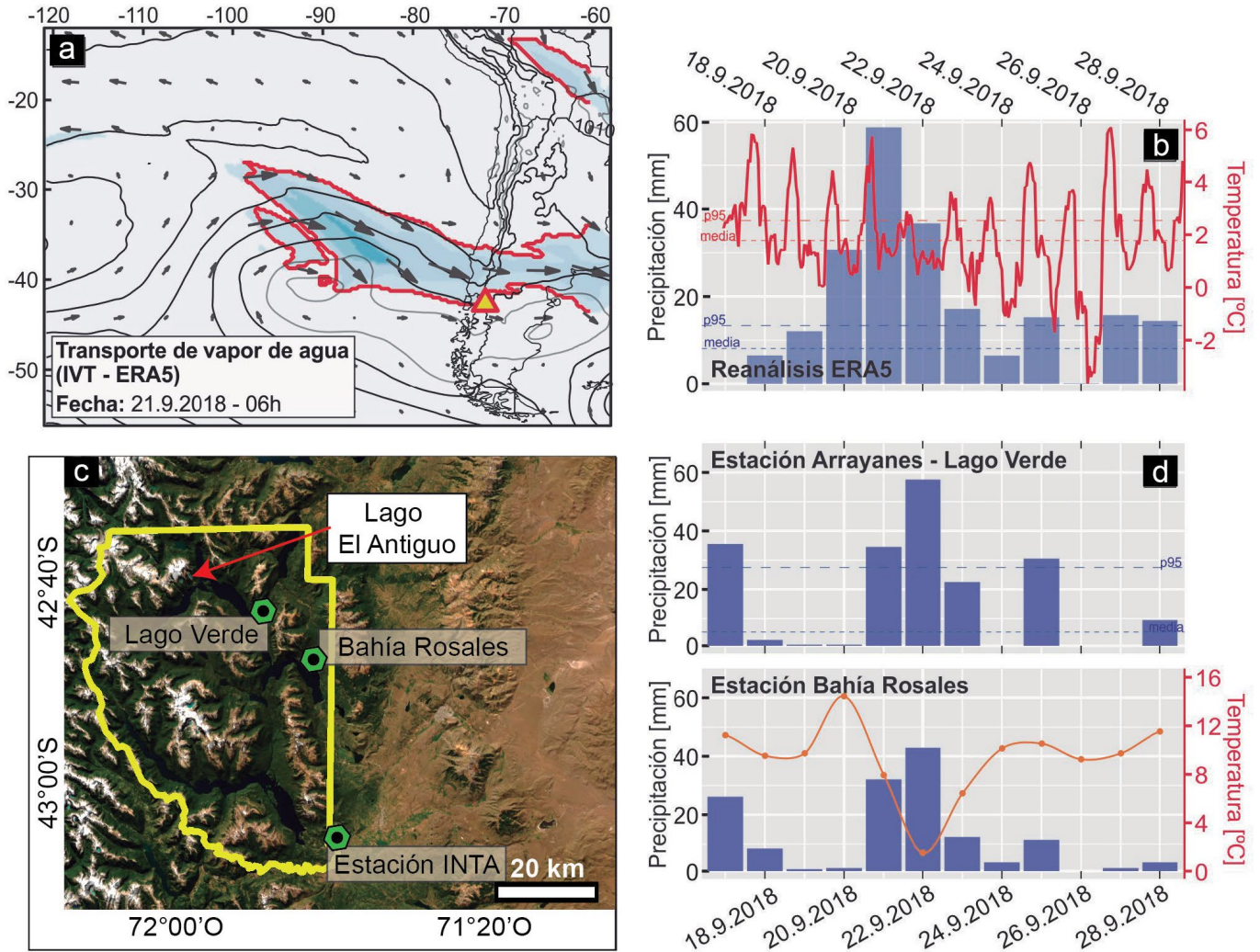
La existencia del Glaciar Torrecillas cubierto constituye un caso particular dentro del Parque Nacional Los Alerces, dado que no hay en la actualidad otros glaciares emplazados en el fondo de los valles. Uno de los fenómenos más influyentes en la conservación de la masa de un glaciar es el albedo, ya que modifica la temperatura de su superficie y por lo tanto incide en la tasa de ablación (incluyendo procesos como la fusión, evaporación y sublimación). En el caso del Glaciar



**Figura 9.** Análisis de temperatura y precipitaciones de la estación meteorológica del centro experimental INTA (ubicación reflejada en figura 10): a) Temperatura media anual y precipitaciones anuales para el periodo comprendido entre los años 1971 y 2022, donde se observa una tendencia a la disminución de las precipitaciones y un aumento en la temperatura; b) Comparación entre el comportamiento de la temperatura media anual, la temperatura media de verano y la temperatura media de invierno para el periodo 1971-2022; c) Detalle del periodo 2002-2022, donde se observan años con mayores precipitaciones y años con menores precipitaciones, aunque si se analiza el segmento completo (2008-2022) se reconoce una marcada tendencia en la disminución de las precipitaciones anuales.

Torreallas cubierto el efecto albedo depende de dos factores principales: a) las condiciones de umbría/exposición de la superficie del glaciar y b) las características de la cobertura detrítica. Aunque, en principio, la presencia de una cobertura detrítica reduce el albedo y aumenta la temperatura de la superficie colaborando así con la ablación del glaciar (Reid y Brock 2010), cuando esta capa de sedimento supera cierto espesor (mayor a 0.5 cm) revierte el efecto y actúa como capa aislante, reduciendo considerablemente la desintegración del cuerpo de hielo (Östrem 1959, Hénot et al. 2022). El Glaciar Torreallas cubierto presenta una cobertura detrítica, muy continua, al menos desde finales del siglo XIX (Fig. 5), que en algunos sitios supera los 50 cm. En la actualidad los sectores con ausencia de esta cobertura detrítica aparecen en el frente del cuerpo de hielo y en una porción de la parte media del mismo coincidiendo con los sitios en donde se ha verificado una mayor intensidad de la ablación (Figs. 6 y 7). Por otro lado, cuanto menor sea la radiación solar que recibe un glaciar cubierto, más efectivo será el efecto de aislamien-

to de la cobertura detrítica (Hénot et al. 2022). La ubicación confinada del Glaciar Torreallas cubierto entre laderas de elevada pendiente, de más de 100 m de altura, orientadas aproximadamente oeste-este, limita fuertemente la exposición a la radiación solar, favoreciendo aún más el efecto aislante de la cobertura de detritos. Otro proceso que ha influido hasta tiempos muy recientes en la dinámica del glaciar, esencialmente sobre la ablación del Glaciar Torreallas cubierto es el desprendimiento de bloques de hielo (*calving*) desde el frente del glaciar sobre el lago proglacial. A partir del año 2018 este fenómeno dejó de ser efectivo, debido a la desconexión del frente del glaciar con el lago, situación generada por la ocurrencia de desprendimientos de roca y detrito desde las laderas contiguas, y que podrían haberse desencadenado debido al paulatino retroceso del Glaciar Torreallas cubierto (Figs. 6, 7 y 11). El fenómeno ocurrido en el 2018 ocasionó profundos cambios geomorfológicos, glaciológicos e hídricos, debido a la desactivación de los procesos de *calving* (previo a la desconexión del frente del Glaciar Torreallas cubierto)



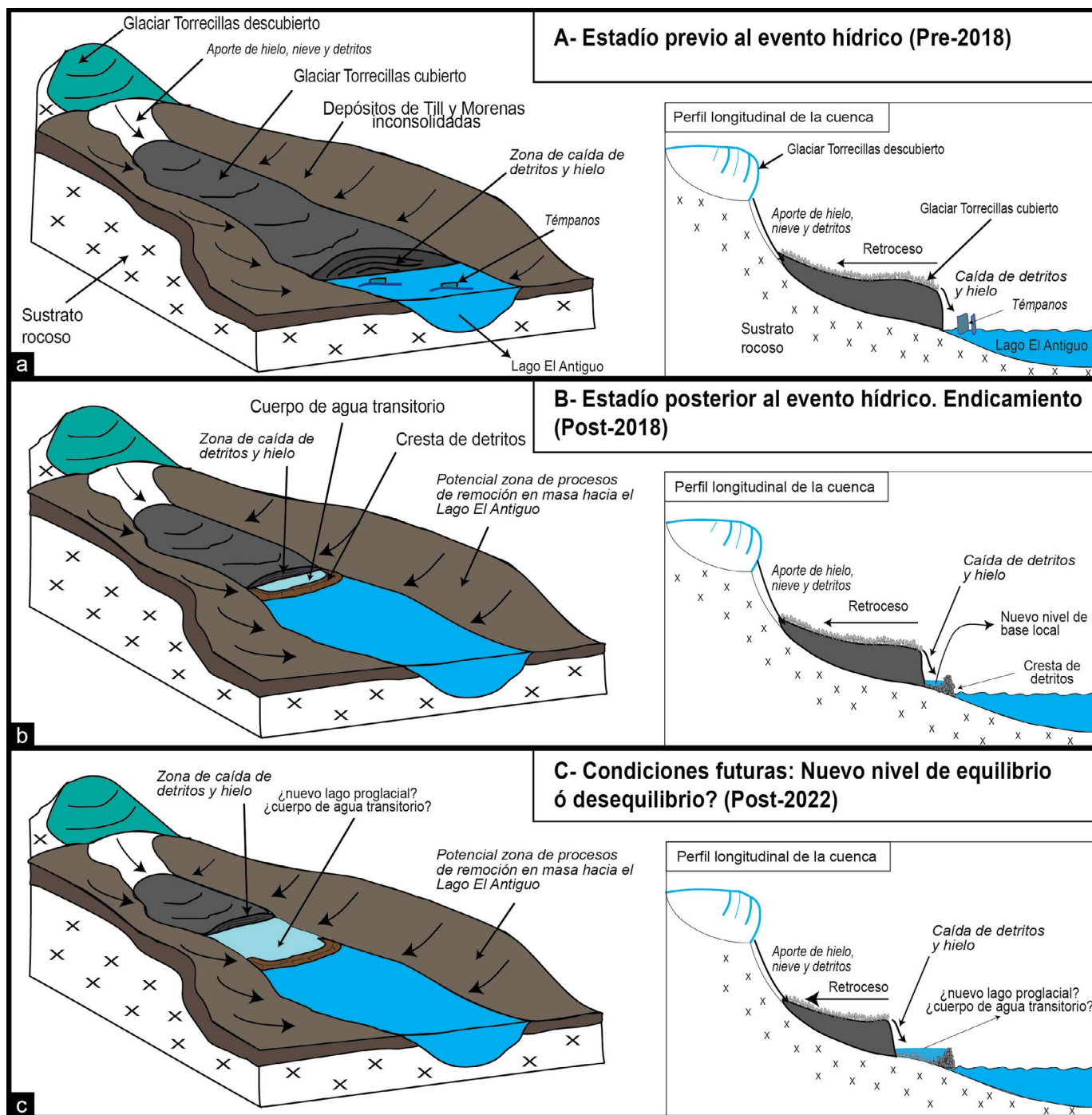
**Figura 10.** Condiciones meteorológicas relacionadas al evento tipo o Glacial Lake Outburst Flow en el Lago El Antigo: a) Integral del transporte de vapor de la atmósfera para el día 21 de septiembre de 2018, 06 horas. Los datos son tomados del modelo de ERA5 (datos de reanálisis climático) y muestran un transporte de humedad anómalo para esa fecha, asociado a altas precipitaciones; b) Serie de tiempo tomada de los datos de reanálisis (ERA5). Se observa que los valores de precipitación superan la media y el percentil 95 y 98 para los días 20 a 22 de septiembre de 2018. La temperatura muestra valores por encima del percentil 95 los días previos al 21/22 de septiembre de 2018; c) Ubicación de las estaciones meteorológicas utilizadas, en torno al lago El Antigo; d) Series de tiempo de datos de precipitación para la estación Arrayanes Lago Verde y Bahía Rosales. El día 21 y 22 de septiembre los valores de precipitación diaria superaron los de la media mensual climatológica.

y a la mayor influencia de los procesos de ablación (posteriores al evento). Estos cambios se ven expresados en el desarrollo de cursos subglaciales, pequeños deltas, barras temporarias, crestas de detrito que funcionan como diques, entre otros. Por su parte, la erosión hídrica en la base del glaciar colabora en la formación de túneles (Benn y Evans 1998, Shaw 1996), que podrían eventualmente colapsar y generar eventos de tipo o *Glacial Lake Outburst Flow* (Walder y Costa 1996, Kessler y Anderson 2004, Knight y Harrison et al. 2009, Dussailant et al., 2010). La observación del frente del Glaciar Torrecillas cubierto en los últimos 5 años permitió reconocer en el campo un incipiente desarrollo de un túnel subglacial, generado por erosión hídrica, cuya evolución está siendo monitoreada a través de imágenes aéreas obtenidas por VANT y observaciones de campo (Fig. 7). Esta erosión hídrica, suma-

do a los otros procesos mencionados (desarrollo de cursos subglaciales, pequeños deltas, barras de sedimentos temporarios, crestas de detrito que funcionan como diques) hacen que esta zona de transición entre el ámbito glacial (Glaciar Torrecillas cubierto) y el lacustre (Lago El Antigo) sea considerado el más dinámico en la actualidad, en donde los fenómenos paraglaciales tienen gran influencia.

### Comportamiento del ambiente paraglaciar

La formación del lago proglacial El Antigo y la exposición de las laderas del valle a partir del retiro del hielo en los últimos 100 años ha constituido a la cuenca del glaciar Torrecillas en un ambiente dominado por procesos paraglaciales, según el significado que le han dado al término distintos autores (Ryder 1971, Church y Ryder 1972, Ballantyne 2002).



**Figura 11.** Esquema de la dinámica del Glaciar Torrecillas cubierto, donde se representan: a) las condiciones previas al evento de *Glacial Lake Outburst Flow* del 2018, momento en el cual el frente del Glaciar Torrecillas cubierto se encontraba en contacto con el Lago El Antigu, influyendo directamente en la dinámica de éste último; b) condiciones posteriores al evento de *Glacial Lake Outburst Flow* del 2018, donde se destaca la formación de un depósito de detrito que genera un endicamiento del agua proveniente del Glaciar Torrecillas cubierto, la creación de un nuevo nivel de base local, la formación de un cuerpo de agua superficial de carácter transitorio, y c) potencial escenario futuro, con endicamiento del nuevo cuerpo lacustre desarrollado hacia el frente del Glaciar Torrecillas cubierto. Los esquemas b) y c) detallan la ampliación de la superficie del lago El Antigu y por lo tanto de la zona lacustre afectada por procesos de remoción en masa provenientes de las laderas cubiertas por till y morenas inconsolidadas, producto del retiro del Glaciar Torrecillas cubierto.

Esto ha potenciado el desarrollo en el área de un evento de *Glacial Lake Outburst Flow* y procesos de remoción en masa. El evento de *Glacial Lake Outburst Flow* ocurrido en septiembre del 2018 (Martínez y Reato 2018) se ajusta a la tipología definida por otros autores de un evento de desborde de

lago con escasa erosión (Richardson y Reynolds 2000, Emmer y Cochachin 2013, Liu et al. 2013, Rounce et al. 2016), provocado, en este caso, por un desprendimiento de hielo y detrito ocurrido desde el frente del Glaciar Torrecillas cubierto al lago proglacial (Fig. 7). Se ha calculado que dicho depósito

gravitacional involucró un volumen superior a 12000 m<sup>3</sup>, ocasionando el aumento del nivel del lago El Antiguo registrado en 3 m en la zona de desembocadura y 8 m en los sectores más encajonados del arroyo por donde desagua el espejo de agua. Las condiciones paraglaciales establecidas en la cuenca ligadas al retroceso del glaciar Torrecillas se pueden considerar como factor condicionante, en términos de la distinción que realizan diversos autores (Clague y Evans 2000, Harrison et al. 2018, Emmer et al. 2020). Por su parte, los reportes locales sugieren que el evento habría ocurrido entre el 20 y el 27 de septiembre de 2018. En base a eso, tanto las precipitaciones ocurridas durante esos días, particularmente entre el 21 y el 22, que superaron con creces los valores de precipitación media mensual históricos (por encima del percentil 95), así como las temperaturas por encima de la media en los días previos, habrían favorecido que se desencadene el proceso de remoción en masa hacia el cuerpo lacustre, el consecuente desarrollo del *Glacial Lake Outburst Flow* y la depositación de la cresta en frente del Glaciar Torrecillas cubierto que modificó la dinámica del frente de ese glaciar (Fig. 10).

Algunos elementos de naturaleza geomorfológica presentes en el área parecen demostrar que el evento de inundación (*Glacial Lake Outburst Flow*), ocurrido en 2018 constituye más una regla que una excepción en el ámbito de la cuenca estudiada. Así parecen indicarlo, por ejemplo, algunos depósitos y geoformas no vegetadas ubicadas en la planicie deltaica del arroyo Torrecillas (en su desembocadura en el Lago Menéndez), que fueron interpretadas como depósitos de outwash (Masiokas et al. 2009) (Figs. 2 y 4). Restos de troncos cubiertos por éstos depósitos fueron datados en 440 ±30 AP (Masiokas et al. 2000), por lo que estarían asociados al retiro de la masa de hielo durante los primeros estadios de la Pequeña Edad de Hielo en el área (Garibotti y Villalba 2009). Si bien no hay evidencias de la existencia de un lago proglacial que genere un evento tipo *Glacial Lake Outburst Flow* durante ese lapso, éstos depósitos y geoformas, como canales desactivados y sus respectivas planicies aluviales pueden ser interpretados como un evento de inundación repentina asociado a altas tasas de ablación, producto de las condiciones paraglaciales instaladas debido al retiro de la masa de hielo (Church y Ryder 1972, Ballantyne 2002, Moreau et al. 2008, Carrivick y Heckmann 2017). La mayor producción de agua por ablación vinculada al retiro de la masa de hielo, habría ocasionado un aumento repentino del caudal del arroyo Torrecillas, generando la depositación de grandes volúmenes de sedimentos sobre la planicie deltaica, modificando además su morfología.

Las nuevas geoformas construidas por el evento del 2018 en el frente del Glaciar Torrecillas cubierto, principalmente el

desarrollo de la cresta de detritos, elevaron el nivel de base local, lo que introdujo en el sistema un efecto de amortiguación de los procesos geomórficos de pequeña escala (Figs. 7 y 11). Por otro lado, no se descarta que algunas de estas geoformas, especialmente las crestas de detrito, puedan funcionar en el futuro cercano como verdaderos diques de contención hídrica debido a la pérdida de porosidad en la medida en que se incorporen sedimentos limo-arcillosos acarreados por los flujos subglaciales. Esto podría derivar en el emplazamiento de un nuevo espejo de agua, probablemente transitorio y de escasas dimensiones, situación que ha sido identificada en mayo del 2022 (Fig. 7a). Este posible escenario implicaría la amenaza de una eventual ruptura del dique y el desagote súbito del nuevo cuerpo lacustre (Fig. 11). En el mismo sentido no debe descartarse que procesos gravitacionales, de mayor escala, que incluyen el desprendimiento de bloques de detrito y/o de hielo desde el frente del glaciar, puedan superar el espacio que ocupan estas geoformas recientes, alcanzando la superficie del lago El Antiguo (Fig. 8).

Los estudios de detalle realizados en el marco de este trabajo permitieron detectar sectores de moderada a alta peligrosidad geológica. Este es el caso de los restos proximales de la morena lateral ubicada en la margen norte del valle (Fig. 8). Esta cresta de detrito glacial tiene un volumen aproximado de 250.000 m<sup>3</sup> y su potencial desplazamiento ladera abajo afectaría la superficie del lago El Antiguo, con consecuencias directas sobre la cuenca aguas abajo.

### Variables climáticas y su impacto en los ambientes glacial y paraglacial

La tendencia en las variables climáticas, registradas para la región para los últimos 50 años, coinciden con la desertificación detectada para toda la región de Patagonia (Pessacq et al. 2020). La tendencia al aumento de la temperatura y la disminución en las precipitaciones (Fig. 9) podrían colaborar en mayores tasas de ablación de ambos cuerpos glaciares, el Glaciar Torrecillas descubierto y el Glaciar Torrecillas cubierto, y contribuir al desarrollo de eventos paraglaciales. Teniendo en cuenta que el mayor porcentaje de las precipitaciones en esta región cae en la temporada de invierno, las precipitaciones anuales son indicadores aproximadas de la acumulación de nieve en el área del glaciar Torrecillas, considerando la altitud en la que se ubica. A su vez, la estación de verano es la temporada de derretimiento. Estas dos variables son independientes entre sí (Roe y O'neal 2009), sin embargo, dado que la tasa de ablación se incrementa con el incremento de las temperaturas de la temporada de derretimiento (Roe y Lindzen 2001), la tendencia negativa en las precipitaciones evidenciada en los registros históricos, y la tendencia positiva



en la temperatura media de la estación de verano, tiene implicancia en el retroceso de la masa glacial para la región. A su vez, es importante considerar la variabilidad climática en el área de estudio, (p.e. Fig. 9, donde se observan años con mayores y menores precipitaciones), ya que en el corto lapso de tiempo las condiciones climáticas podrían variar, afectando de manera diferencial en los procesos de ablación y/o en los procesos geomorfológicos (Roe y O'neal 2009). En base a los datos obtenidos en el presente trabajo, efectos atmosféricos anómalos en el comportamiento de las precipitaciones o la temperatura, en un ambiente de gran actividad geomorfológica, pueden ocasionar procesos paraglaciaros. Tal es el caso de precipitaciones y temperaturas por encima de la media registradas para septiembre del 2018, los cuales han sido identificados como los factores desencadenantes del evento de o *Glacial Lake Outburst Flow* descrito (Fig. 10).

## CONCLUSIONES

Los estudios realizados en el marco de este trabajo han permitido confirmar que, durante el último siglo, las masas de hielo y nieve presente en el área de estudio evidenciaron una dramática reducción, provocando una mayor influencia de los procesos paraglaciaros. La degradación del Glaciar Torrecillas derivó en su ruptura en algún momento cercano y posterior al año 1936, ocasionando la formación de dos cuerpos de hielo, el Glaciar Torrecillas descubierto y el Glaciar Torrecillas cubierto. El primero corresponde a un glaciar que ocupa tres circos ubicados en la cabecera de cuenca y no ha sufrido significativas modificaciones desde 1898-1899. Por otro lado, el Glaciar Torrecillas cubierto es un cuerpo de hielo reléctico que ha permanecido en el fondo del valle glacial y se ha conservado respecto de otros glaciares de valle de la región del Parque Nacional los Alerces, debido a su ubicación, a la presencia de una cobertura detrítica y al aporte de hielo y nieve desde el Glaciar Torrecillas cubierto. Sin embargo, el frente del Glaciar Torrecillas descubierto ha presentado un retroceso continuo en las últimas décadas favoreciendo la concentración e intensidad de procesos paraglaciaros en su entorno.

Este trabajo confirma la recurrencia de procesos de remoción en masa que afectan las laderas y que provocan inundaciones en el lago proglacial y en el sistema fluvial en general. Durante la primavera del 2018 se produjo un evento de tipo *Glacial Lake Outburst Flow*, ocasionado por procesos de remoción en masa que afectaron la superficie del lago El Antiguo, que desconectó al Lago Antiguo del frente del glaciar cubierto. Este evento provocó, además, el aumento repentino

del nivel del espejo de agua y del arroyo Torrecillas, afectando la senda de acceso y uso turístico. Los factores desencadenantes habrían sido las precipitaciones intensas, que excedieron la media mensual, y las altas temperaturas que tuvieron lugar en el área entre los días 20 y 22 de septiembre del 2018.

Las observaciones realizadas han permitido identificar y delimitar sectores de moderada a alta peligrosidad geológica ubicados en las laderas que circunscriben al lago El Antiguo, donde yacen depósitos de till inconsolidados, en pendientes de hasta 50 grados, propensos a movilizarse, por procesos de flujos de detritos y/o por caída de rocas. Estos depósitos afectan la propia margen del lago y podrían provocar eventos de o *Glacial Lake Outburst Flow* similares al evento ocurrido en el año 2018. A su vez, el continuo aumento de la superficie lacustre implicaría una mayor superficie del lago propensa a ser afectada por procesos de remoción en masa provenientes de las laderas.

El aumento de las temperaturas y la variabilidad climática detectadas en los últimos 20 años de registro, favorecen una mayor ablación de los glaciares y de los cuerpos de nieve de la región. En el entorno del Glaciar Torrecillas, aparentemente asociada a estas condiciones climáticas, se ha constatado una mayor ocurrencia de procesos paraglaciaros, esencialmente remoción en masa. Eventos climáticos ocurridos en cortos lapsos de tiempo, como precipitaciones o temperaturas por encima del promedio, favorecen el desencadenamiento de procesos de remoción en masa. Estos fenómenos gravitacionales, acompañados de aumentos de caudales y volúmenes hídricos en los cuerpos de agua, introdujeron importantes modificaciones geomorfológicas incluyendo nuevas geoformas (conos de deyección, flujos de detritos, deltas) y procesos (principalmente de remoción en masa) que podrían derivar en endicamientos, cambios en los niveles de base y eventos de tipo *Glacial Lake Outburst Flow*. Este escenario hace necesario el estudio y monitoreo del área, orientados a prevenir el riesgo en este sitio específico del área protegida.

## AGRADECIMIENTOS

Agradecemos enormemente al Parque Nacional Los Alerces, quién nos brindó en todo momento el soporte técnico para poder acceder a la zona de estudio. Particularmente a los guardaparques Federico Verna, Natalia Palucci, Juan Pablo Canio, Rodrigo Amado, Marcelo Guisasola, y a los prestadores turísticos Pablo Gervasini y Nacho Contreras quienes colaboraron en la logística de acceso al área. Agradecemos también a Juan Pablo Cagnio, Hernán Pirato Mazza y Pablo

Gervasini quienes colaboraron con el registro fotográfico del área de estudio. También agradecemos al equipo del Área técnica del Departamento de ICE del PNLA, especialmente a su encargado, Juan Pablo Díaz, quién puso a disposición el equipo de VANTs y colaboró activamente en la logística del plan de vuelos para el monitoreo del área, y a Simón Cruz, quien asistió en el porteo de material hasta el área de estudio. A su vez agradecemos a los pilotos de VANT del Ministerio de Ambiente; Rodolfo Fernández, Miguel Rodríguez, Mariano López, Nicolás Samaniego y Agustín Tiseira, quienes colaboraron en el desarrollo de los vuelos fotogramétricos. Agradecemos la colaboración del Departamento de Conservación y Educación Ambiental, especialmente a Estela Castaño, quién nos dio acceso al registro de fotografías históricas del Parque Nacional Los Alerces. También agradecemos enormemente a Andrés de Errasti, quién nos prestó un bote portable para poder acceder a zonas de difícil acceso durante las campañas. Queremos agradecer, además, al Instituto Geográfico Nacional, por proporcionarnos las fotografías aéreas tomadas en el plan de vuelo del 15 de enero de 1981, y que fueron de gran utilidad para el análisis de la evolución de los glaciares en el área. Agradecemos las observaciones y los comentarios realizados por los revisores anónimos y por el editor Andrés Bilmes, los cuales han enriquecido enormemente el presente manuscrito, y han colaborado en el enfoque que le daremos al área de estudio en trabajos futuros.

## REFERENCIAS

- Administración de Parques Nacionales (APN). 1997. Plan Preliminar de Manejo del Parque Nacional Los Alerces. <https://www.argentina.gov.ar/parquesnacionales>.
- Balbi, A. B., Bedmar, J. M., Kaufman, J. F., Oliva, J. A. y Villegas, D. 2019. Estudio de Peligrosidad Geológica de la Localidad de El Chaltén y de Procesos de Remoción en Masa de la Ladera Norte del Cerro Solo, Santa Cruz. Instituto de Geología y Recursos Minerales. Servicio Geológico Minero Argentino. Serie de Contribuciones Técnicas- Peligrosidad Geológica N° 19, 83 p., Buenos Aires.
- Ballantyne, C.K. 2002. Paraglacial geomorphology. *Quaternary Science Reviews* 21: 1935–2017.
- Bastidas Mejía, L.B., Vich, A.I.J. y Piccolo, M.C. 2020. A Methodological Proposal for Filling Missing Values in Monthly Temperature Time Series in the Absence of Nearby Stations. *Investigaciones Geográficas* 103: 2448-7279.
- Benn, D.I., Evans, D.J.A. 1998. *Glaciers and Glaciation*. Hodder Education, pp. 157–158, London.
- Carey, M. 2008. Disasters, development, and Glacial Lake Control in Twentieth-Century Peru. En Wiegandt, E. (eds) *Mountains: Sources of Water, Sources of Knowledge*. *Advances in Global Change Research* 31:181–196.
- Carrivick, J.L. y Tweed, F.S. 2016. A global assessment of the societal impacts of glacier outburst floods. *Global and Planetary Change* 144: 1–16.
- Carrivick, J.L. y Heckmann, T. 2017. Short-term geomorphological evolution of proglacial systems. *Geomorphology* 287: 3-28.
- Chinni, G.A. y Warren C.R. 2004. Correspondence. The 2004 outburst flood at Glaciar Perito Moreno, Argentina. *Journal of Glaciology* 50(171): 615–616.
- Church, M., y Ryder, J.M. 1972. Paraglacial sedimentation: a consideration of fluvial processes conditioned by glaciation. *Bulletin Geological Society of America* 83: 3059–3072.
- Clague, J.J., y Evans, S.G. 2000. A review of catastrophic drainage of moraine-dammed lakes in British Columbia. *Quaternary Science Reviews* 19: 1763-1783.
- Clapperton, C. 1993. *Quaternary geology and geomorphology of South America*. Elsevier, 779 pp., Amsterdam.
- Colavitto, B., Orts, D.L. y Folguera, A. 2012. El caso del Outburst Flood histórico de la laguna Derrumbe, Chollila, Chubut: Colapso de dique Morénico en la Cordillera Norpatagónica. *Revista de la Asociación Geológica* 69: 457-465.
- Colavitto, B., Allen, S., Winocur, D., Guillet, S., Muñoz-Torrero Manchado, A., Gorsic, S., Dussailant, A. y Stoffel, M. 2022. GLOFs conditioning and triggering mechanisms in Patagonian Andes based in an updated glacial lake inventory. IAL-IPA, Bariloche, 2022.
- Coronato, A., Mazzoni, E., Vázquez, M. y Coronato, F. 2017. Patagonia: una síntesis de su geografía física. *Universidad Nacional de la Patagonia Austral* 1, 218 p. Río Gallegos.
- Davies, B.J. y Glasser, N.F. 2012. Accelerating recession in Patagonian glaciers from the “Little Ice Age” (c. AD 1870) to 2011. *Journal of Glaciology* 58: 1063–1084.
- Dussailant, A., Benito, G., Buytaert, W., Carling, P., Meier, C. y Espinoza, F. 2010. Repeated glacial-lake outburst floods in Patagonia: an increasing hazard? *Natural Hazards* 54 (2): 469–481.
- Dussailant, I., Berthier, E., Brun, F., Masiokas, M., Hugonnet, R., Favier, V., Rabatel, A., Pitte, P., y Ruiz, L. 2019. Two decades of glacier mass loss along the Andes. *Nature Geoscience* 12: 802–808.
- Emmer, A. y Cochachin, A. 2013. The causes and mechanisms of moraine-dammed lake failures in the cordillera blanca, North American Cordillera, and Himalayas. *Acta Universitatis Carolinae. Geographica* 48: 5–15.
- Emmer, A., Harrison, S., Mergili, M., Allen, S., Frey, H. y Huggel, C. 2020. 70 years of lake evolution and glacial lake outburst floods in the Cordillera Blanca (Peru) and implications for the future. *Geomorphology*, 107178.
- Garibotti, I. y Villalba, R. 2009. Lichenometric dating using *Rhizocarpon* subgenus *Rhizocarpon* in the Patagonian Andes, Argentina. *Quaternary Research* 71: 271-283.

- Harrison, S., Glasser, N., Winchester, V., Haresign, E., Warren, C. y Jansson, K.A. 2006. Glacial lake outburst flood associated with recent mountain glacier retreat, Patagonian Andes. *Holocene* 16: 611–620
- Harrison, S., Kargel, J. S., Huggel, C., Reynolds, J., Shugar, D. H., Betts, R. A., Emmer, A., Glasser, N., Haritashya, U. K., Klimeš, J., Reinhardt, L., Schaub, Y., Wiltshire, A., Regmi, D., y Vilímek, V. 2018. Climate change and the global pattern of moraine dammed glacial lake outburst floods. *The Cryosphere* 12: 1195–1209.
- Hénot, M., Langlois, V. J., Vessaire, J., Plihon, N., and Taberlet, N. 2022. Formation of glacier tables caused by differential ice melting: field observation and modelling. *The Cryosphere* 16: 2617–2628.
- Hubbard, B., Heald, A., Reynolds, J.M., Quincey, D., Richardson, S.D., Luyo, M.Z., Portilla, N.S. y Hambrey, M.J. 2005. Impact of a rock avalanche on a moraine-dammed proglacial lake; Laguna Safuna Alta, Cordillera Blanca, Peru. *Earth Surface Processes and Landforms* 30: 1251-1264.
- Iribarren Anacona, P., Norton, K. y Mackintosh, A. 2014. Moraine dammed lake failures in Patagonia and assessment of outburst susceptibility in the Baker Basin. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 14: 3243-3259.
- Kessler, M.A. y Anderson, R.S. 2004. Testing a numerical glacial hydrological model using spring speed-up events and outburst floods. *Geophysical Research Letters* 31: L18503.
- Knight, J. y Harrison, S. 2009. Periglacial and Paraglacial Processes and Environments. *The Geological Society, Special Publications*, 320: 165–180, London.
- Liu, J.J., Tang, C. y Cheng, Z.I. 2013. The two main mechanisms of Glacier Lake Outburst Flood in Tibet, China. *Journal of Mountain Science* 10: 239–248.
- Lizuain, A. 2010. Hoja Geológica 4369-I Gastre, Provincia del Chubut. SEGEMAR, 80 p. Buenos Aires.
- Martínez, O. y Reato A. 2018. Informe Técnico “Evento hídrico en la laguna Los Antiguos, Glaciar Torrecillas, Parque Nacional Los Alerces (septiembre de 2018)”. NO-2018-50882001-APN#APNAC.
- Masiokas, M.H., Villalba, R., Luckman, B.H., Lascano, M.E., Delgado, S. y Stepanek, P. 2008. 20th-century glacier recession and regional hydroclimatic changes in northwestern Patagonia. *Global and Planetary Change* 60: 85–100.
- Masiokas, M.H., Rivera, A., Espizua, L.E., Villalba, R., Delgado, S. y Aravena, J.C. 2009. Glacier fluctuations in extratropical South America during the past 1000 years. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 281: 242–268
- Masiokas, M.H., Rabatel, A., Rivera Ibáñez, A., Ruiz, L., Pitte, P., Ceballos, J.L., Barcaza, G., Soruco, A., Bown, F., Berthier, E., Dussailant, I. y MacDonell, S. 2020. A Review of the Current State and Recent Changes of the Andean Cryosphere. *Frontiers in Earth Science* 99 (8): 1-27.
- McColl, S.T. 2012. Paraglacial rock-slope stability. *Geomorphology* 153-154: 1–16.
- Moragues, S., Lenzano, M.G., Moreiras, S. y Lenzano, L. 2019. Paraglacial geomorphology associated with slope instability in the North Branch of the Argentino Lake, Argentinean Patagonia. *Cuadernos de Investigación Geográfica* 45(1): 367-392.
- Moreau, M., Mercier, D., Laffly, D. y Roussel, E. 2008. Impacts of recent paraglacial dynamics on plant colonization: a case study on Midtre Lovénbreen foreland, Spitsbergen (79°N). *Paraglacial Geomorphology: Processes and Paraglacial Context. Geomorphology* 95: 48-60.
- Östrem, G. 1959. Ice Melting under a Thin Layer of Moraine, and the Existence of Ice Cores in Moraine Ridges. *Geografiska Annaler* 41: 228–230.
- Pessacq, N., Flaherty, S., Solman, S. y Pascual, M. 2020. Climate change in Northern Patagonia: critical decrease in water resources. *Theoretical and Applied Climatology* 140: 807-822.
- Plan de Gestión del Parque Nacional Los Alerces (PG-PNLA). 2019. Tomo 1. IF-2019-93365774-APN-DNC#APNAC. [https://sib.gov.ar/archivos/ResumenEjecutivo\\_PG\\_PNLA.pdf](https://sib.gov.ar/archivos/ResumenEjecutivo_PG_PNLA.pdf).
- Prohaska, F. 1976. The climate of Argentina, Paraguay and Uruguay. En E. Schwerdtfeger (Ed.), *Climate of Central and South America*, Elsevier. 13-112. Amsterdam.
- Rabassa, J., Rubulis, S. y Suarez, J. 1978. Los glaciares del Monte Tornador, Parque Nacional Nahuel Huapí, Río Negro, Argentina. *Anales de Parques Nacionales* 14: 261-316, Buenos Aires.
- Reid, T.D. y Brock, B.W. 2010. An energy balance model for debris-covered glaciers including heat conduction through the debris layer. *Journal of Glaciology* 56: 903–916.
- Richardson, S.D. y Reynolds, J.M. 2000. An overview of glacial hazards in the Himalayas. *Quaternary International* 65: 31-47.
- Roe, G.H. y Lindzen, R.S. 2001. The Mutual Interaction between Continental-Scale Ice Sheets and Atmospheric Stationary Waves. *Journal of Climate* 1450-1465.
- Roe, G.H. y O'Neal, M.A. 2009. The response of glaciers to intrinsic climate variability: observations and models of late-Holocene variations in the Pacific Northwest. *Journal of Glaciology* 55: 839–854.
- Rounce, D.R., Mckinney, D.C., Lala, J.M., Byers, A.C. y Watson, C.S. 2016. A new remote hazard and risk assessment framework for glacial lakes in the Nepal Himalaya. *Institute of Arctic & Alpine Research Faculty Contributions* 20: 3455–3475
- Rounce, D.R., Watson, C.S. y Mckinney, D.C. 2017. Identification of Hazard and Risk for Glacial Lakes in the Nepal Himalaya Using Satellite Imagery from 2000–2015. *Remote Sensing* 9: 654.
- Ryder, J.M. 1971. The stratigraphy and morphology of paraglacial alluvial fans in south-central British Columbia. *Canadian Journal of Earth Sciences* 8: 279–298.
- Schmidt, D., Winocur, D. y Pitte, P. 2022. Caracterización y evolución temporal de los deslizamientos activos en las laderas de los cerros Solo y Techado Negro, valle del glaciar Torre/Grande, provincia de Santa Cruz. 8° Congreso Argentino de Cuaternario y Geomorfología, Actas: 75-76, San Juan.

- Shaw, J. 1996. A meltwater model of Laurentide subglacial landscapes; en S.B. McCann and D.C. Ford (eds.) *Geomorphology Sans Frontières*, 183-226, Chichester.
- Taylor, C., Robinson, T.R., Dunning, S., Carr J.R. y Westoby M. 2023. Glacial lake outburst floods threaten millions globally. *Nature Communications* 14: 487.
- Walder, J.S. y Costa, J.E. 1996. Outburst floods from glacier-dammed lakes: the effect of mode of lake drainage on flood magnitude. *Earth Surface Processes and Landforms* 21: 701–723.
- Wilson, R., Glasser, N.F., Reynolds, J.M., Harrison, S., Anaconda, P.I., Schaefer, M. y Shannon, S. 2018. Glacial lakes of the Central and Patagonian Andes. *Global and Planetary Change* 162: 275-291.
- Winocur, D., Goyanes, G. y Viera, G. 2015. Movimiento de remoción en masa activo y su riesgo geológico asociado en la ciudad de El Chaltén, provincia de Santa Cruz. XIV Congreso Geológico Chileno, Sesión Técnica 11: 136-139, La Serena.
- Worni, R., Stoffel, M., Huggel, C., Volz, C., Casteller, A. y Luckman, B. 2012. Analysis and dynamic modeling of a moraine failure and glacier lake outburst flood at Ventisquero Negro, Patagonian Andes (Argentina). *Journal of Hydrology* 444–445: 134–145.