

Dinámica glaciar de la cuenca del río Santa Cruz, Andes Patagónicos Australes: el agua del futuro¹

Santa Cruz river basin's glacier dynamic: fresh water of future

Andrés Lo Vecchio Repetto  orcid.org/0000-0002-3606-9160

Instituto Argentino de Nivología, Glaciología y Ciencias Ambientales
Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas
Departamento de Geografía, Facultad de Filosofía y Letras, Universidad Nacional de Cuyo
 anlovechio@ffyl.uncu.edu.ar

RESUMEN

La superficie glaciar más extensa de la República Argentina se encuentra en la cuenca del río Santa Cruz (CRS), Andes Patagónicos Australes. La CRS concentra el 35% de toda la cubierta glacial nacional (incluidas las islas subantárticas), y el 52 % si solo se consideran los Andes. Sus 3023 km² están distribuidos en un millar de glaciares, aunque entre siete de ellos acumulan el ~80 % de esa área (Viedma, Upsala, Onelli, Spegazzini, Mayo, Ameghino y Perito Moreno). Esos siete glaciares terminan en lagos proglaciares, lo cual estimula procesos de aceleración, fractura y desprendimiento de hielo glaciar (glaciares de desprendimiento). El objetivo de la tesis es determinar las relaciones multiescalares existentes entre la dinámica de los glaciares de desprendimiento de la CRS, los procesos naturales disparadores, y sus impactos en el espacio geográfico. Para tal fin se propone el análisis de las últimas dos décadas a través de diferentes plataformas satelitales e información temática disponible. En este trabajo, los indicadores glaciológicos analizados son los cambios de posición frontal y los eventos de fusión supraglacial. A efectos de síntesis, los resultados muestran una

¹ Síntesis de la Tesis Doctoral de Andrés Lo Vecchio Repetto, Doctorado en Geografía, F.F.y L., UNCuyo, 2020.

retracción acumulada de $19 \pm 0,3$ km durante todo el periodo de estudio, aunque con comportamientos individuales heterogéneos. Entre 1985 y 2017 el glaciar Upsala retrocedió 8287 ± 60 m, al mismo tiempo que glaciar Moreno avanzó 101 ± 60 m. El glaciar Spegazzini es otro glaciar que sostuvo su posición en ese periodo, inmediatamente al sur del glaciar Onelli que retrocedió 3069 ± 60 m. Lo anterior sugiere la multicausalidad de la dinámica glaciar y la inexistencia de un único forzante. En términos de eventos de fusión (2001-2016), la extensión ocupada por estos tiene una marcada estacionalidad, frecuentes durante los meses de verano incluso en las altas cumbres (>3000 m). Durante el periodo estival (octubre/abril) más del 50 % del área glaciar estuvo en fusión (con máximos del 75% en el verano del 2013). Por el contrario, durante la fase invernal se redujeron drásticamente e incluso se ausentaron en los meses de junio-julio. En términos de cuenca, los eventos de fusión comenzaron a aumentar a partir del 2010, con una tendencia positiva a favor de su expansión. Las consecuencias de la dinámica glaciar han jugado un rol clave en las posibilidades de configuración de espacios humanizados. Esos enclaves están estructurados en función de esa dinámica, ya sea por la exposición a amenazas de origen glaciar o bien por significar la principal fuente de divisas para la cuenca: el turismo glaciar.

PALABRAS CLAVE: Glaciares y sociedad, cuenca del río Santa Cruz, Dinámica glaiar histórica.

ABSTRACT

The largest glacier area in Argentina is located in the Santa Cruz River Basin (CRS), Southern Patagonian Andes. The CRS concentrates 35% of the entire national glacier cover (including the sub-Antarctic islands), and 52% if only the Andes are considered. Its 3023 km² are distributed in a thousand glaciers, although between seven of them accumulate ~80% of that area (Viedma, Upsala, Onelli, Spegazzini, Mayo, Ameghino, and Perito Moreno). These seven glaciers end in proglacial lakes, which stimulate processes of acceleration, fracture, and detachment of glacial ice (detachment glaciers). The thesis aims to determine the multiscale relationships between the dynamics of the detachment glaciers of the CRS, the natural triggering processes, and their impacts on the geographic space. To this end, the analysis of the last two decades is proposed through different satellite platforms and the thematic information available. In this work, the glaciological indicators analyzed are frontal position changes and supraglacial melting events. For synthesis purposes, the results show a cumulative retraction of 19 ± 0.3 km during the whole study period, although with heterogeneous individual behaviors. Between 1985 and 2017 the Upsala glacier retreated 8287 ± 60 m, at the same time Moreno glacier advanced 101 ± 60 m. Spegazzini glacier is another glacier that sustained its position in that period, immediately south of Onelli glacier which retreated 3069 ± 60 m. The above suggests the multicausal of glacial dynamics and the inexistence of a single forcer. In terms of melting events (2001-2016), the extent occupied by these has a marked seasonality, frequent during the summer months even at high summits (>3000 m). During the

warm period (October/April) more than 50% of the glacier area was melting (with maximums of 75% in the summer of 2013). In contrast, in the cold phase, they were drastically reduced and even absent in the months of June-July. In CRS, melt events began to increase from 2010, with a positive trend. The consequences of glacial dynamics have played a key role in the possibilities for the configuration of humanized spaces. These places are structured according to these dynamics, either because of exposure to glacial hazards or because they represent the main source of foreign exchange for the basin: glacier tourism.

KEYWORDS: Glaciers and society, Santa Cruz river basin, Historical glacial dynamics.

INTRODUCCIÓN

Glaciares y sociedad, una historia en común

El 68% del agua dulce disponible en la Tierra se encuentra almacenada en los glaciares. En muchas de las regiones áridas y semiáridas del planeta el agua de ablación nivo-glaciar es la única fuente para consumo humano, agricultura, industria, para otros organismos vivos y el sostén de ecosistemas (Meier y Roots, 1982). Además de una fuente y reserva de agua dulce, los ambientes glaciares representan una amenaza para los poblados localizados aguas abajo. Durante el siglo XX numerosos desastres tuvieron lugar en distintos sitios del mundo (Williams y Ferrigno, 2012), y en Sudamérica los casos del GLOF (*Glacial Lake Outburst Flow*) del Plomo y las desastrosas consecuencias para la ciudad de Mendoza (1934); y el lahar del Nevado del Ruiz que sepultó la ciudad de Armero (Colombia), aún hoy son recordados.

Hay ~25000 km² cubiertos por glaciares en Sudamérica (Ohmura, 2009), de los cuales la República Argentina tiene jurisdicción sobre el ~38 % (8484 Km²), representada en más de 16000 cuerpos localizados en la cordillera de los Andes y las islas del Atlántico Sur (Inventario Nacional de Glaciares, 2018). Considerando únicamente el área glaciar en los Andes (5769 km²), los Andes Patagónicos del Sur argentino (APS) concentran el 60% de esta. En los APS hay una tendencia al gigantismo glaciar, a tal punto que solo el glaciar Viedma (~1009 km²) representa el 17 % del total de la superficie glaciar en los Andes argentinos.

En los APS, tiene origen el río Santa Cruz, que es el segundo más caudaloso de la República Argentina (después del río Negro) si se considera a aquellos que tienen origen y fin en territorio nacional. Allí, al igual que en todos los Andes Áridos y zonas áridas de la Patagonia extrandina los recursos hídricos son los ejes estructurantes de la expansión humana sobre el territorio (**Figura 1**).

La cuenca del río Santa Cruz (CRS) es un sistema ambiental complejo donde distintos procesos naturales y antrópicos se superponen e interactúan a diversas escalas espacio-temporales. El régimen hídrico del río Santa Cruz es ultraglaciar (Vich, 1996), lo cual supone una dependencia absoluta de la ablación glaciar en sus caudales. El 85 % de la superficie glaciar de la CRS está contenida en siete glaciares (los más extensos del país): Viedma (~1009 km²), Upsala (~853 km²), Onelli (~67 km²), Spegazzini (~169 km²), Mayo (~40 km²), Ameghino (~93 km²) y Perito Moreno (~262 km²), quienes descienden del Campo de Hielo Patagónico Sur (White y Copland, 2015). Estos, junto a otros 1079 glaciares constituyen el subsistema criosférico de la CRS (**Figura 2**). Los siete glaciares mencionados terminan en el sistema lacustre Viedma-Argentino, dos lagos proglaciares de más de 1000 km² cada uno y profundidades máximas de ~ 600 m (Sugiyama et al., 2016). Las aguas del Viedma son vertidas al Argentino, a través del río La leona, en el extremo norte del cuerpo principal. Algunos kilómetros al sur, tiene origen el río Santa Cruz, justo en extremo oriental del lago Argentino (**Figura 2**).

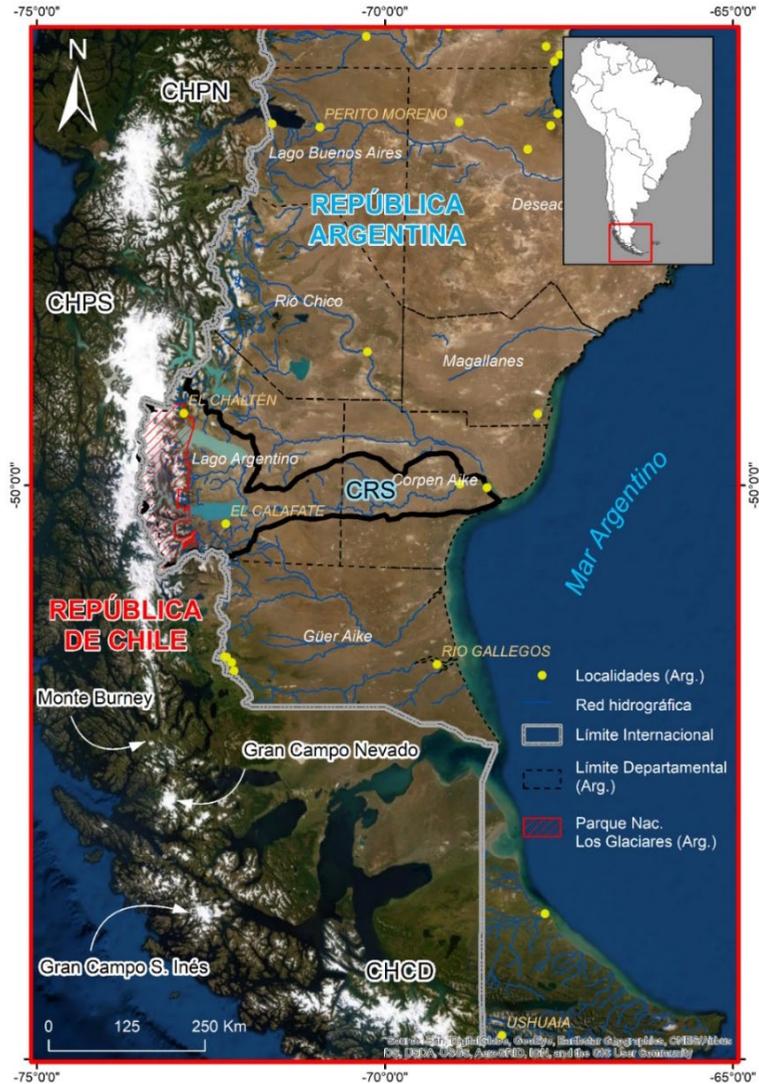


Figura 1. Sitio y posición de la Cuenca del Río Santa Cruz. Además, Campo de Hielo Patagónico Norte (CHPN), Campo de Hielo Patagónico Sur (CHPS) y Campo de Hielo de la Cordillera Darwin (CHCD). Imagen extraída de Lo Vecchio (2020).

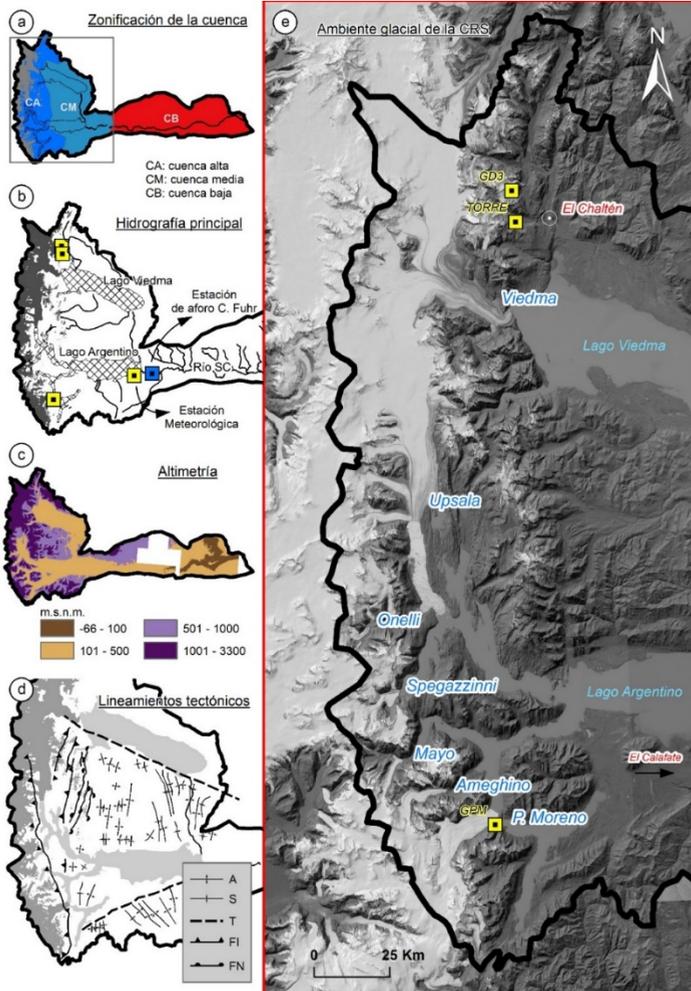


Figura 2. Cuenca del río Santa Cruz y sus diversos aspectos geográficos. a) zonificación espacial de la CRS en cuenca alta, media y baja. b) principales aspectos de la hidrografía de la cuenca y distribución espacial de las estaciones meteorológicas utilizadas en la Figura 2.5. c) Distribución espacial de la topografía: Modelo Digital de Elevación ALOS-PALSAR de 12,5 m de resolución espacial. d) Lineamientos tectónicos de la CRS, A= anticlinal; S= sinclinal; FI= falla inversa; FN= falla normal y T= falla transformante extraídos de Ghiglione et al., (2009). e) Zoom al área englazada de la CRS. Imagen de fondo: LANDSAT 5 del 20-02-2011. Imagen extraída de Lo Vecchio (2020).

Los glaciares de desprendimiento reciben ese nombre debido a su propiedad de liberar témpanos desde su frente como consecuencia de la fractura y ruptura del hielo glaciar. Aunque existen glaciares de desprendimiento “en seco”, usualmente ese término es conferido a aquellos que terminan en cuerpos de agua. En el caso de los glaciares de desprendimiento de la CRS, el fracturamiento y desprendimiento de hielo es consecuencia de las tensiones soportadas por la interacción con los lagos y lagunas proglaciares. El origen de esas tensiones es multicausal y pueden encontrarse en la aceleración del flujo glaciar, en la termo-erosión localizada en la interfaz glaciar-lago-atmosfera (línea de Notch) y por el efecto de flotación en aquellos casos que se supera el espesor crítico de flotación.

En la CRS, el ambiente criosférico ha acusado importantes cambios en los últimos treinta años, con fases de mayor intensidad durante la primera década del siglo XXI. En ese contexto, la tesis doctoral **“Dinámica glaciar de la cuenca del río Santa Cruz, Andes Patagónicos Australes: estudio y análisis multiescalar mediante el uso de geotecnologías”** (Lo Vecchio, 2020) propone reconstruir, analizar y cuantificar la dinámica glaciar en la CRS a través de indicadores glaciológicos, explorar sus posibles causas, y evaluar sus impactos sobre la organización del espacio.

En ese estudio, los indicadores glaciológicos son la fluctuación frontal (1985-2017), los eventos de fusión supraglacial (2001-2016), y las velocidades superficiales intraanuales (2015-2017). Por su parte, las variables investigadas como posibles causantes de la dinámica glaciar son categorizadas entre aquellas que tienen un área de influencia local y regional. En ese sentido, la sismicidad, el vulcanismo y los patrones de circulación atmosférica a gran escala SAM y ENSO son de alcance regional; mientras que la variación del nivel y las temperaturas del lago Argentino, la temperatura superficial glaciar y la litología del lecho glaciar son de alcance local. Los impactos de la dinámica glaciar son analizados desde las posibilidades y las amenazas naturales derivadas de la propia dinámica ambiental.

En efecto, la presente reseña de la tesis doctoral mencionada propone una síntesis de la historia reciente (últimas 3 décadas) de los glaciares de descarga en la CRS, sus posibles causas e impactos en la organización del territorio. A tal fin, los indicadores glaciológicos aquí presentados son aquellos referidos a la dinámica glaciar a largo plazo: cambios de posición frontal y eventos de fusión supraglacial.

Fluctuación frontal (1985-2017)

Los cambios de posición frontal de los glaciares de desprendimiento resultan del balance entre la tasa de desprendimiento ocurrida en el frente glaciar [ma^{-1}] y la velocidad del glaciar en la zona terminal [ma^{-1}] (Cuffey y Paterson, 2010). La reconstrucción de la fluctuación frontal histórica se enmarca en lo que Jansson (2003) denominaron estudios de periodo largo (*long-term*), focalizado en cambios anuales, decadales e incluso centurias. Esto supone que cambios mensuales y estacionales (periodo medio – *middle-term*), o menores (periodo corto – *short-term*), son omitidos. A tal fin, los glaciares analizados son Viedma, Upsala, Onelli, Spegazzini, Mayo, Ameghino y Perito Moreno.

Considerando la posición actual de los frentes glaciares respecto del año 1985, cinco de ellos retrocedieron (Upsala, Viedma, Onelli, Mayo y Ameghino) (**Figuras 3, 4, 5, 6 y 7**) uno mantuvo su posición (Spegazzini) (**Figura 8**) y uno avanzó 100 ± 60 m (Perito Moreno) (**Figura 9**).

El retroceso acumulado más importante ocurrió en Upsala con 8287 ± 60 m, quien casi duplicó a la retracción experimentada por el segundo que más lo hizo, el glaciar Onelli 4518 ± 60 m ($-122 \pm 2 \text{ ma}^{-1}$). El glaciar Mayo fue el que menos retrocedió, -450 m, notablemente inferior al Upsala, Onelli e incluso al Viedma y Ameghino (-3069 ± 60 m y -2884 ± 60 m, respectivamente).

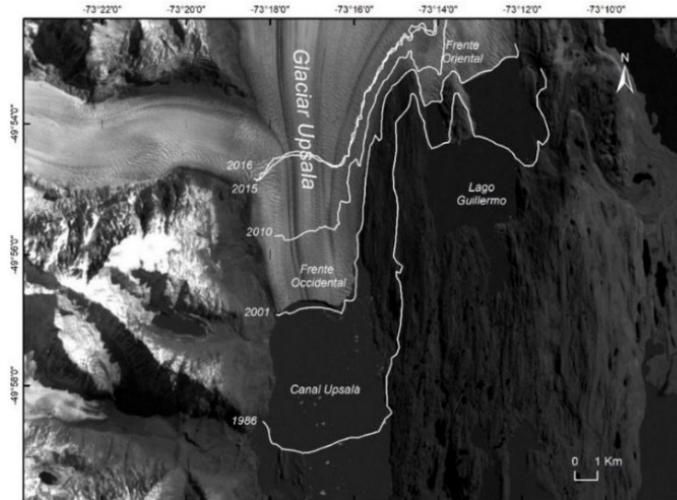


Figura 3. Glaciar Upsala. Imagen de base: LANDAST 7, correspondiente al 14-08-2002. En líneas blancas están indicadas las posiciones frontales para distintos años. Imagen extraída de Lo Vecchio (2020).

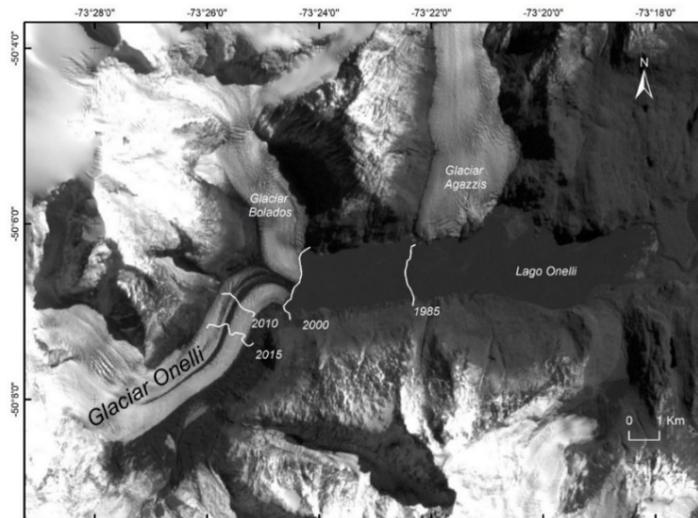


Figura 4. Glaciar Onelli. Imagen de base: LANDAST 8, correspondiente al 20-03-2001. En líneas blancas están indicadas las posiciones frontales para distintos años. Imagen extraída de Lo Vecchio (2020).

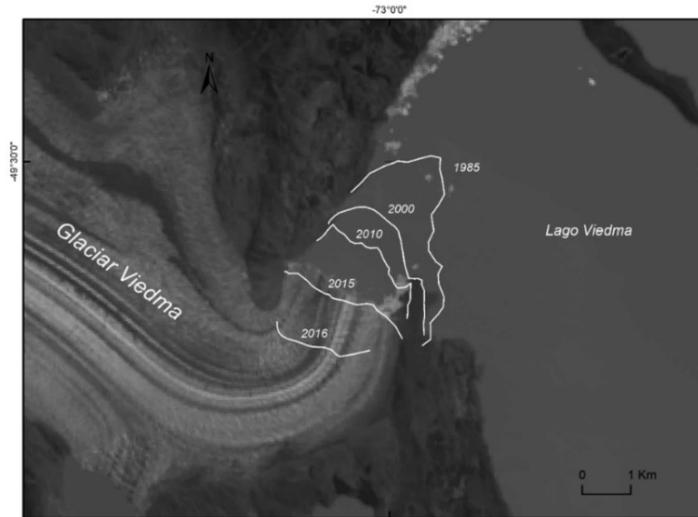


Figura 5. Glaciar Viedma. Imagen de base: LANDAST 8, correspondiente al 14-01-2014. En líneas blancas están indicadas las posiciones frontales para distintos años. Imagen extraída de Lo Vecchio (2020).

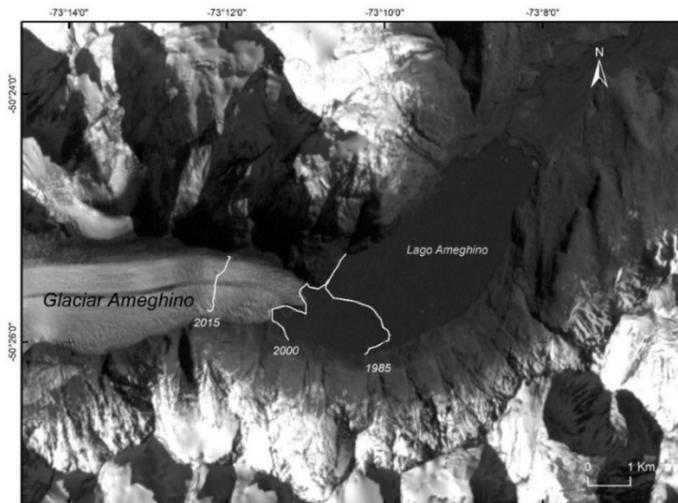


Figura 6. Glaciar Ameghino. Imagen de base: LANDAST 7, correspondiente al 20-03-2001. En líneas blancas están indicadas las posiciones frontales para distintos años. Imagen extraída de Lo Vecchio (2020).

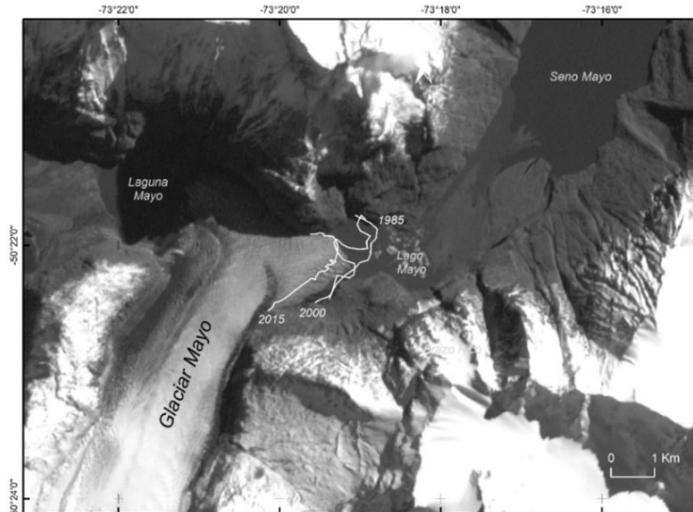


Figura 7. Glaciar Mayo. Imagen de base: LANDAST 7, correspondiente al 20-03-2001. En líneas blancas están indicadas las posiciones frontales para distintos años. Imagen extraída de Lo Vecchio (2020).



Figura 8. Glaciar Spegazzini. Imagen de base: LANDAST 7, correspondiente al 20-03-2001. En líneas blancas están indicadas las posiciones frontales para distintos años. Imagen extraída de Lo Vecchio (2020).

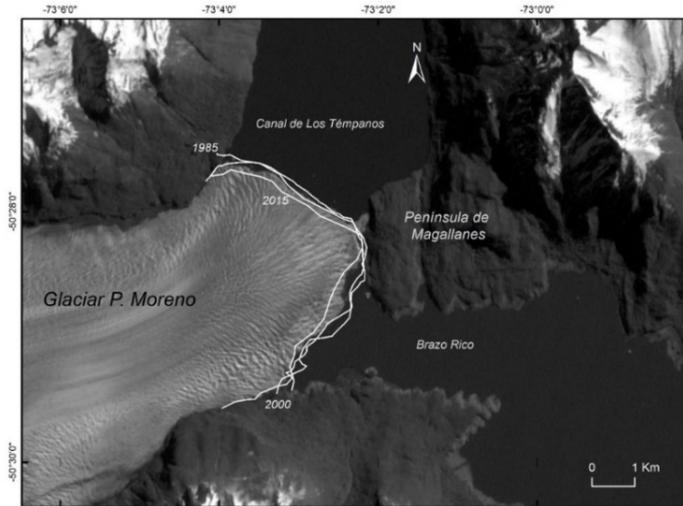


Figura 9. Glaciar Perito Moreno. Imagen de base: LANDAST 7, correspondiente al 20-03-2001. En líneas blancas están indicadas las posiciones frontales para distintos años. Imagen extraída de Lo Vecchio (2020).

El acumulado de todo el periodo indica un retroceso de $19,2 \pm 0,3$ km, traducido en una pérdida de $128 \pm 6,4$ km² de área glaciaria (-4 km²a⁻¹; $-0,13$ %a⁻¹). La velocidad de retroceso de un mismo glaciar fue variable en el tiempo. Los retrocesos más veloces ocurrieron entre los años 2005 y 2011 (-748 ± 10 m a⁻¹), año a partir del cual se desaceleró, e incluso se produjeron avances en el glaciar Mayo (264 ± 60 m). Solo el glaciar Viedma intensificó su retroceso a partir del 2011 (**Figura 10**), la mayor retracción de los últimos 40 años (-233 m a⁻¹).

Entre las posibles causas de los cambios de posición frontal, se destaca la ausencia de alguna cuenca con control o impacto sobre todos los glaciares analizados. Por el contrario, se evidenció las particularidades del sitio de cada cuenca glaciaria en el marco de un sistema ambiental mayor como es la CRS. Entre las causas de alcance regional se detectó que la oscilación norte-sur de los vientos del oeste (SAM index) acompañó la marcha de la tasa de cambio de la posición frontal [m a⁻¹] de los glaciares Perito Moreno ($r=-0,89$) y Upsala ($r=-0,76$). El desplazamiento hacia el norte (a la latitud del CHPS y la CRS) de los vientos del oeste se traduce en un aumento de las precipitaciones (Garreaud 2009; Garreaud et al. 2009), y en glaciares como los

mencionados sugiere desacelerar el retroceso o incluso favorecer el avance (Perito Moreno). En cuanto a la sismicidad, no se hallaron evidencias que vinculen el retroceso glaciar durante el periodo 1985-2017 con la mayor o menor ocurrencia de eventos sísmicos. Sin embargo, debe reconocerse el potencial de un evento sísmico a corto plazo sobre la fluctuación frontal, desatando instantáneamente eventos masivos de desprendimiento por la oscilación del nivel lacustre y la fractura y ruptura del hielo. De hecho, en la región se evidenció una actividad sísmica moderada (entre el triple punto de Aysén y el cabo de Hornos), caracterizada por la detección de 461 eventos sísmicos (entre 1930 y 2018) con una magnitud promedio de 5 Mw. En la región existe una fuerte relación glaciovolcánica, aunque poco estudiada.

Mediante los registros de (Adaros, 2003) se detectó un enjambre sísmico superficial en las adyacencias del volcán Reclus, próximo a la CRS. A pesar de la ausencia de eventos eruptivos en el periodo de estudio, los antecedentes indican que un evento eruptivo podría reconfigurar el escenario glaciológico de la región (Martinic, 2008).

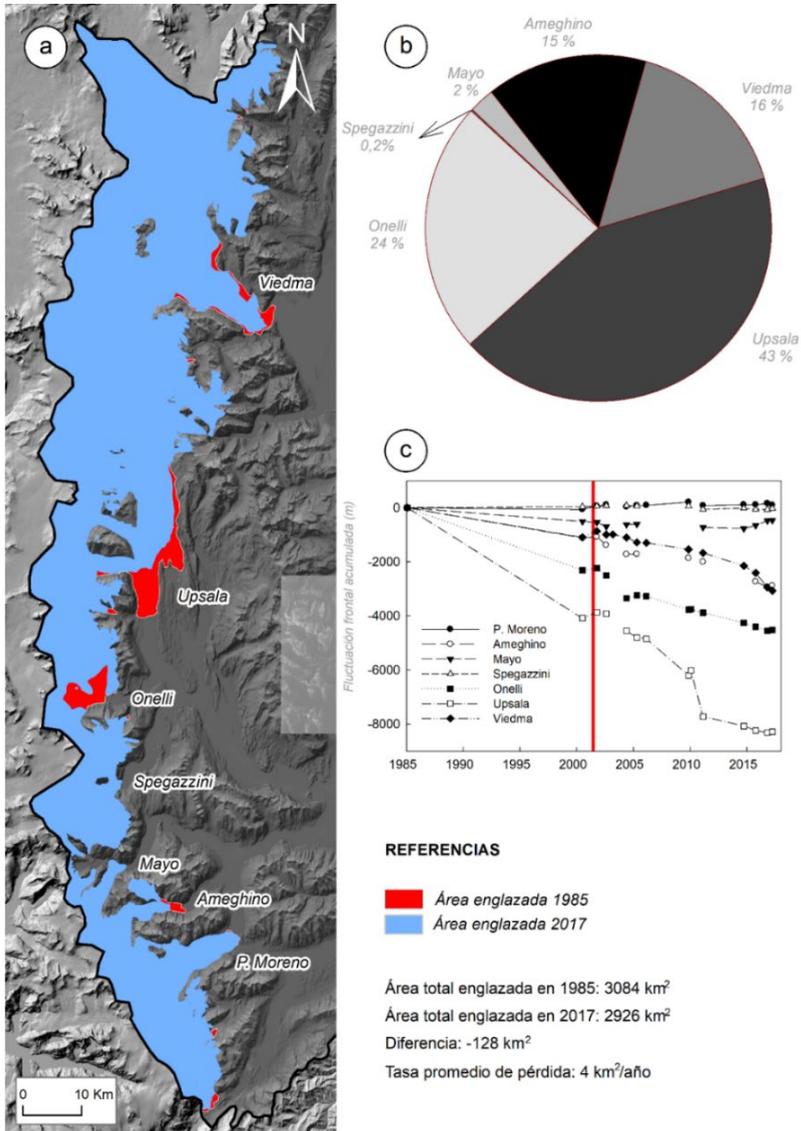


Figura 10. Síntesis de la fluctuación frontal de la CRS. a) Cambio de área entre los años 1985 y 2017. b) Porcentaje de participación por glaciar respecto de la fluctuación frontal total registrada entre los años 1985 y 2017 (-19,2 km). c) Fluctuación frontal acumulada por glaciar entre 1985 y 2017. Imagen extraída de Lo Vecchio (2020).

Entre los posibles factores locales dinamizadores de la cubierta glaciaria, las variaciones del nivel del lago Argentino fueron determinantes en los cambios de posición frontal de los glaciares Upsala ($r=-0,98$) y Perito Moreno ($r=-0,86$). Cambios en el orden de los centímetros pueden desencadenar retrocesos de hasta $\sim 3 \text{ m d}^{-1}$ en el glaciar Upsala. Los glaciares Viedma, Onelli, Mayo y Ameghino estuvieron exceptuados de este análisis, todos por terminar en lagos con niveles lacustres desacoplados respecto del lago Argentino (lago Viedma, Onelli, Mayo y Ameghino, respectivamente) de los cuales no se tiene registro. Una última propiedad del ambiente glaciario fue hallada con un importante potencial, la litología del lecho glaciario. A través de una exploración de los afloramientos rocosos de las zonas recién abandonadas por el glaciar Upsala y Viedma se notó la erosión diferencial ejercida dependiendo la presencia de rocas de origen volcánico (Complejo El Quemado) o de aquellas de origen marino-sedimentario (Fm. Río Toro y Fm. Mayer) (Kraemer y Riccardi, 1997), las primeras más duras que estas últimas. En este sentido, la capacidad de remoción de material por parte del glaciar terminará definiendo la resistencia ejercida por el lecho para fluir.

Nota metodológica

Para la identificación y cuantificación de la fluctuación glaciaria se utilizaron 26 escenas de los satélites LANDSAT 5, 7 y 8, plataformas satelitales con visión multispectral. La detección y digitalización de los frentes se realizó manualmente mediante el método de fotointerpretación en el Sistema de Información Geográfica Qgis 2.14. Esta decisión estuvo fundamentada en la difícil detección automática debido a la frecuente presencia de nubes y témpanos en las adyacencias a los frentes glaciales.

Eventos de fusión supraglacial (2001-2016)

La fusión glaciaria ocurre cuando uno o más cristales de hielo cambian su estado de agregación de sólido a líquido. La fusión puede ocurrir en la superficie (supraglacial), en el interior del cuerpo de hielo (englacial), y en la base (subglacial), sin embargo, la supraglaciaria es la que mayor cantidad de escorrentía aporta (Bennett y Glasser, 2009). Existe un fuerte consenso en que la fusión y su patrón espacio-temporal tienen un fuerte impacto en la dinámica glaciaria (McCabe et al., 2011).

Adicionalmente, otras fuentes de alimentación como la lluvia o agua subterránea pueden ser estímulos importantes. El entendimiento de la hidrología glacial es importante por diversas razones: 1) importante o única fuente de agua en diversas partes del mundo; 2) la hidrología glacial ejerce un importante control en la dinámica glacial. La escorrentía a través de los glaciares está íntimamente relacionada a procesos tales como desplazamiento basal, ablación, transferencia de calor, desprendimiento y flotación de zonas terminales; 3) el drenaje repentino de los reservorios de agua de fusión supraglacial (también englacial y subglacial) puede significar una amenaza para poblados aguas abajo; 4) el agua de fusión remueve detritos localizados sobre el glaciar, en su interior o en la base de este, transportándolos más allá de sus límites y, posteriormente, depositándolos. Históricamente, los depósitos glaciares (*till*) han sido aprovechados por su aptitud para el desarrollo de la agricultura debido a su estructura no ordenada.

En la CRS la extensión ocupada por los eventos de fusión supraglacial tiene una marcada estacionalidad, frecuentes durante los meses de verano incluso en las altas cumbres (>3000 m). En ese sentido, las principales diferencias entre la fase invernal y estival se observaron en la cantidad y extensión de los eventos de fusión. A lo largo de toda la serie se notó que durante el periodo estival (octubre/abril) el 50%, o más, del área glacial estuvo en fusión (con máximos del 75% en el verano del 2013). Por el contrario, durante la fase invernal los eventos de fusión se redujeron drásticamente e incluso se ausentaron en los meses de junio-julio (excepto 2014 y 2016). En términos de cuenca, los eventos de fusión comenzaron a generalizarse sobre la superficie glacial a partir del 2010, con un predominio de anomalías positivas. El mayor evento de fusión supraglacial superó el 80 % del área glacial de la CRS y ocurrió en enero de 2013, superando un 20% de superficie en fusión media histórica para ese mes (2001-2016). Otro aspecto a mencionar, tiene que ver con que la distribución espacial de estos eventos está controlada, principalmente, por la elevación. Entre todos los glaciares analizados, el frente del Perito Moreno es el que a menor elevación se encuentra (210 m.s.n.m.), y es allí donde se registró la mayor cantidad de días en fusión a lo largo de un mismo año. Durante el año 2016, en ese glaciar ocurrieron eventos de fusión supraglacial en la zona terminal el 33 % de los días (más de 100 días).

Entre las posibles causas analizadas, la Temperatura Superficial del Hielo (TSH) fue la que explicó en un 92 % la variabilidad de los eventos de fusión supraglaciar (p -value $< 0,005$) a través de una relación cuadrática. De lo anterior, se desprende que por cada grado centígrado de aumento de TSH la superficie en fusión se duplicará. Entre los efectos de los eventos de fusión supraglaciar, se observó que impactan directamente en los niveles lacustres ($r=0,86$) con un retardo temporal de 2 meses debido a la todavía ineficiente red de drenaje supraglaciar, englaciar y subglaciar durante el máximo pico de fusión (diciembre-enero).

Nota metodológica

Para reconstruir la temperatura superficial de los glaciares (TSH) se usó el producto térmico de MODIS del satélite Terra (MOD11A1). Nótese que no se incluyó el producto MODIS derivado del satélite Aqua debido al deficiente funcionamiento de una de las bandas espectrales (Aguirre et al., 2018). El producto MOD11A1 de ~1 km de resolución espacial utiliza la técnica de ventana partida (*Split Windows*) con las bandas 31 y 32 de MODIS (10.78-11.28 μm y 11.77-12.27 μm , respectivamente) (Wan 2013). Este producto proporciona dos valores de temperatura superficial por día (diurno y nocturno). En latitudes altas, estos valores se seleccionan de un número mucho mayor de mediciones diarias debido a la convergencia de las órbitas de los satélites (Østby et al., 2014). Las mediciones satelitales de TSH requieren cielos despejados, y las áreas cubiertas por nubes son eliminadas a través de la máscara incluida en ese producto y derivada de MOD35_L2 (Ackerman et al. 2008).

Cada imagen MOD11A1 fue binarizada por la condición “ $\geq -1^\circ\text{C}$ ”, en donde valores por encima de ese umbral indican superficies en fusión (Hall et al. 2018). En efecto, cada imagen mostró los pixels en fusión para ese día, pudiéndose estimar el área en fusión y los sectores donde ocurrió. La frecuente presencia de nubes sobre el CHPS supuso que en numerosas imágenes este se mostrara parcialmente cubierto. Por lo tanto, en ocasiones donde extensas superficies del CHPS fueron afectadas por fusión pueden haber sido omitidas debido a la presencia de la cubierta nubosa, cuantificándose únicamente aquellas áreas sin nubes (subestimación del área en fusión). De hecho, una imagen invernal desprovista de nubes podría reportar la misma cantidad de pixels en fusión “detectados”, o incluso mayor, que aquella de verano. Para minimizar este sesgo se propuso la estandarización de las superficies en

fusión. El resultado fue una probabilidad de ocurrencia de días en fusión. El detalle metodológico puede ser visto en Lo Vecchio (2020).

Glaciares y sociedad, un futuro en común

El paisaje resultante de la dinámica glacial ha ejercido un control acerca de las actividades llevadas a cabo en esta región, representadas en tres dimensiones: la formación de tierras aptas para el uso y aprovechamiento humano; fuente de agua dulce para el consumo y desarrollo humano; y su significado como amenaza natural.

Disponibilidad de tierras y aprovechamiento humano

La disponibilidad de tierras, sus aptitudes son un condicionante acerca de las actividades humanas capaces de ser desarrolladas. En la CRS, la mayor presencia y uso del espacio es en la cuenca media, donde se emplaza el sistema lacustre Argentino-Viedma. Allí, los usos del suelo son: agrícola-ganadero, residencial, comercial y servicios.

Históricamente, el uso agrícola-ganadero caracterizó a esta cuenca, siendo la ganadería ovina y bovina las actividades más importantes dentro del producto bruto geográfico de la CRS (Ministerio de Hacienda 2018; Consejo Federal de Inversión 1973). En las inmediaciones los grandes lagos la disponibilidad de suelos aptos para el crecimiento natural de pastizales jugó un rol clave en el establecimiento y desarrollo de esta actividad. El origen de esos suelos tiene un profundo vínculo con la dinámica glacial, derivados de depósitos glaciales y glacifluviales (costa sur del lago Argentino). Indicios de cambios en el patrón productivo comenzaron a ser visibles a partir de 1973, que de acuerdo al informe técnico presentado por el Consejo Federal de Inversión (1973): *“Las actividades relacionadas a la prestación de servicios tienden a incrementarse y concentrarse (...) lo que hace prever para los próximos años el desarrollo integral de la zona, basado fundamentalmente en la utilización indirecta de las bellezas naturales de la región”*. Este hecho ha sido particularmente evidente en la expansión del área urbana de El Calafate y El Chaltén entre 1986 y 2016. En 1986 la localidad de El Chaltén aún no cumplía un año de existencia y solo había unas pocas edificaciones (dependencias provinciales y del Parque Nacional Los Glaciares); sin embargo, a comienzos del 2016 el área ocupada era de 83 Ha. Por su parte, El Calafate también experimentó una fuerte expansión, en 1986 su área era de 94 Ha,

mientras que en 2016 de 1679 Ha (~18 veces la superficie de 1986). La expansión del área urbana en ambas localidades fue acompañada de un crecimiento neto en la población residente en el departamento de Lago Argentino², pasando de 1994 habitantes en el año 1970 a más de 18000 en 2010, según el Censo Nacional de Población de ese año. El vasto crecimiento demográfico en una región que hasta el momento perdía población (Consejo Federal de Inversión 1973) fue posible y estimulado por el desarrollo del turismo vinculado a los glaciares (de ahora en adelante turismo glacial).

Fuente de agua y desarrollo humano

La accesibilidad al agua es un factor esencial para el establecimiento de los enclaves humanos. En la República Argentina, el 55 % de las localidades están emplazadas a menos de 5 km de distancia de un cauce (**Figura 11**). Esto aún es mucho más evidente en regiones como la Patagonia extrandina donde las precipitaciones son escasas. En ese contexto, el río Santa Cruz se posiciona como la fuente de agua del futuro en la República Argentina por dos condiciones: 1) drena la cubierta glacial más importante del país, 2) tiene origen y fin dentro del territorio nacional. La primera condición supone que este río es un reservorio invaluable, en un marco de marcadas reducciones de precipitaciones y caudales de los ríos andinos (Penalba y Rivera, 2016). En referencia a la segunda condición, posibilita gestionar y proteger la calidad del recurso, aunque en la práctica todavía deban mejorarse los sistemas de control y consulta popular.

²Lago Argentino es el departamento en el cual se localizan El Chaltén y el Calafate, siendo esta última la localidad cabecera del departamento. Son esas dos localidades quienes concentran la mayor población (+90%) de dicho departamento. Con excepción de la localidad de Tres Lagos, en donde habitan menos de 500 personas, el resto son parajes y estancias.

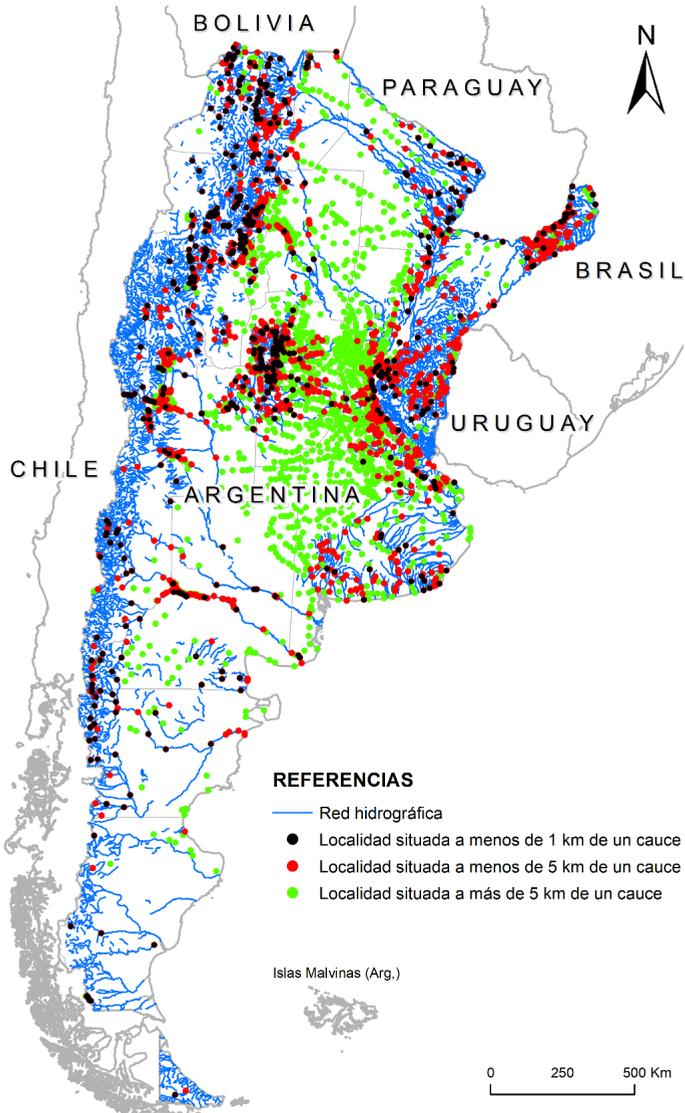


Figura 11. Distribución espacial de las localidades de la República Argentina respecto de la red hidrográfica nacional. Imagen extraída de Lo Vecchio (2020).

El caudal medio histórico del río Santa Cruz (periodo 1955-2016, medido en la estación de aforo Charles Fuhr) es de $713 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, con máximos superiores a $2000 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ y con una tendencia al incremento de su caudal igual a $0,1485 \text{ m}^3\text{s}^{-1}\text{mes}^{-2}$ ($p\text{-value} < 0,05$). Esta tendencia de aumentos de caudales ya fue detectada desde principios del siglo XXI por la Unión Transitoria de Empresas China Gezhouba Group Company Limited -Electroingeniería S.A.- Hidrocuyo S.A., quienes presentaron los primeros informes técnicos para la instalación de un sistema de represas sobre ese río a fin de generar energía hidroeléctrica (Secretaría de Estado de Ambiente 2017). Ese proyecto es considerado de desarrollo e infraestructura energética; sin embargo, numerosas protestas y campañas de concientización han tenido lugar en oposición a su construcción. Los reclamos están fundados en el impacto que las represas tendrían sobre el ecosistema de la CRS, y por la probabilidad de que la cota de las represas alcance, e incluso supere, la del Sistema Lacustre Argentino-Viedma. Conforme a los análisis realizados, pequeños cambios en el nivel del lago Argentino podrían disparar eventos masivos de desprendimiento.

Otro ejemplo que pone de manifiesto la relación glaciares y sociedad es el turismo glacial. El turismo glacial es la principal fuente de empleo y de divisas de las localidades de El Chaltén y El Calafate, traducido en hotelería, servicios gastronómicos, traslados y guías por ambientes naturales. Esas localidades concentran más del 60% de las plazas hoteleras de toda la provincia de Santa Cruz atendiendo a la alta demanda de visitantes al Parque Nacional Los Glaciares (PNLG), primer parque Nacional más visitado del país. Dentro del PNLG, el caso del glaciar Viedma es paradigmático: hasta el año 2015 una propuesta de navegación al frente de ese glaciar y una posterior caminata sobre este era una de las ofertas turísticas más demandadas en la localidad de El Chaltén. Un fuerte retroceso experimentado por el glaciar entre los años 2015 y 2016, el más intenso de los últimos 40 años, condujo a que la posición frontal de ese glaciar se emplazara en un sitio en donde el acceso a este sea muy dificultoso, sobre todo por la necesidad del uso de material de escalada por parte de los visitantes. Esa situación suprimió instantáneamente la oferta turística propia del glaciar, y en efecto, los empleos asociados.

CRS, un ambiente de multiamenazas

En la CRS las amenazas naturales son diversas, no solo por su origen, sino también debido a la manera en que se traducen al espacio geográfico. En la CRS pueden distinguirse, como mínimo, las siguientes amenazas: *seiches*, remoción en masa, GLOF, inundaciones, sismicidad, vulcanismo, lahares e incendios. Con excepción de la sismicidad, el vulcanismo y los incendios, el resto de las amenazas están directamente asociadas a la dinámica glacial. El cambio climático y la intensificación de las actividades humanas en ambientes de montaña ha incrementado el interés por el entendimiento del riesgo asociado (Orlove et al., 2008).

Las amenazas naturales en la CRS están espacialmente superpuestas. Cada una de estas tiene una influencia distinta en términos espaciales y temporales. Mientras que la actividad volcánica puede tener periodos de recurrencia decadales o de centurias y una influencia regional, los *seiches* pueden tener una recurrencia diaria y una influencia local. Sin embargo, esa superposición debe ser atendida por la concatenación de las amenazas. La efectivización de una de ellas puede desatar otras. Así pareciera ser el caso del *seiche* del canal Upsala ocurrido en febrero de 2013, donde un deslizamiento ocurrido en la ladera del cerro Mc. Andrew lo produjo (Moragues et al. 2019). En términos espaciales, la cuenca alta es la que mayor cantidad de amenazas presenta. Sin embargo, es la cuenca media la que mayor exposición posee, fundamentalmente por la concentración de la infraestructura humana (**Figura 12**).

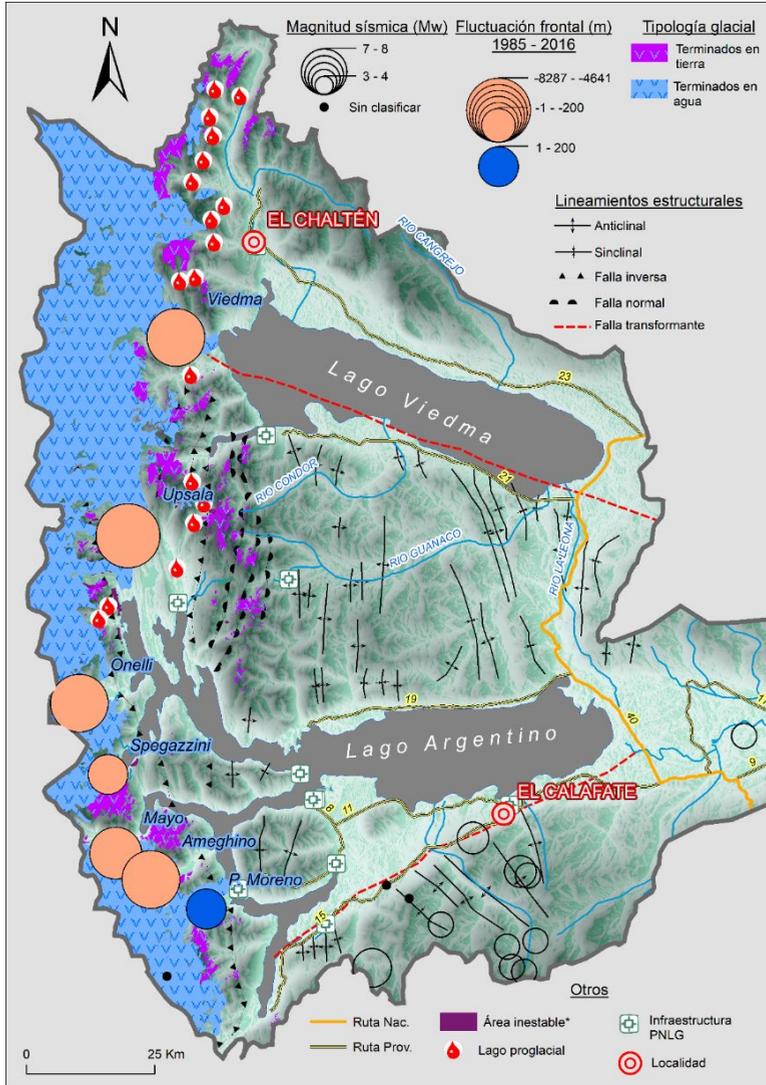


Figura 12. Mapa de correlación de los aspectos dinámicos de la cubierta glacial de la CRS y las amenazas derivadas. Los lineamientos tectónicos han sido extraídos de Ghiglione et al., (2009), mientras que las áreas inestables (*) de Moragues et al., (2019). Imagen extraída de Lo Vecchio (2020).

CONCLUSIONES

La cuenca del río Santa Cruz (CRS) es un sistema ambiental complejo donde múltiples procesos naturales y antrópicos se superponen e interactúan a diversas escalas espacio-temporales. El constante dinamismo de la CRS dispara mecanismos de retroalimentación en la búsqueda continua de un equilibrio dinámico. En ese sentido, el ambiente criosférico de la CRS ha acusado importantes cambios en los últimos treinta años, traducido en la reducción de 128 km² (4 km²a-1).

En la tesis comentada se ha puesto de manifiesto la multiescalaridad espacio-temporal de los procesos glaciológicos estudiados. El análisis de las fluctuaciones frontales ha dejado en evidencia la multicausalidad de la dinámica glacial, al mismo tiempo que se debiera visualizar a cada cuerpo de hielo como un caso único. De ello se desprende, la imposibilidad de extrapolar el comportamiento de un único glaciar al resto de la cuenca, o de la región, ni siquiera teniendo en cuenta a los denominados “representativos” (Viedma, Upsala y P. Moreno). En conjunto los glaciares Viedma, Upsala, Onelli, Spegazzini, Mayo y Ameghino han retrocedido 19,2 km entre 1985 y 2017; un aspecto fundamental ha sido la marcada heterogeneidad presentada. Mientras que el Upsala se retrajo más de 8 km, el Spegazzini lo hizo menos de 0,1 km. Un contraste similar ha sido observado entre los glaciares P. Moreno y Ameghino, donde el primero tuvo un saldo positivo de 0,1 km al mismo tiempo que el Ameghino retrocedió 2,8 km durante el mismo periodo (1985-2017). De mediar un control climático, las fluctuaciones debieran poseer cierta homogeneidad o tendencia, similar a lo ocurrido en la cordillera mendocina (Andes centrales).

Entre todas las variables disparadoras abordadas se descarta la influencia transversal sobre todos los glaciares analizados. Por el contrario, cada variable disparadora tuvo su preponderancia sobre ciertos glaciares. Ejemplo de ello son las temperaturas superficiales del lago, que mostraron un fuerte vínculo respecto de las fluctuaciones del Viedma y en menor medida con el P. Moreno; al mismo tiempo, los niveles lacustres sugirieron un fuerte control sobre los glaciares Upsala y P. Moreno, aunque los glaciares Onelli y Viedma fueron insensibles a esta influencia.

Respecto de los eventos de fusión, y su posterior impacto en los niveles lacustres, son un agente dinamizador si se considera que los frentes de los glaciares Upsala y P. Moreno se mostraron muy sensibles a los cambios en los niveles lacustres. El efecto de los eventos de fusión sobre los niveles del lago Argentino ha sido caracterizado por un fuerte vínculo ($R=0,86$). Debe hacerse la salvedad que la influencia de la fusión sobre los niveles lacustres mostró un retardo de dos meses, manifestando la ineficiencia de la red de drenaje englacial y subglacial.

De lo expuesto, se deriva la confirmación y relevancia de la hipótesis inicialmente planteada, dejando en evidencia la complejidad y relación existente entre los procesos que intervienen en la cuenca estudiada. Esta complejidad debe ser adecuadamente entendida y abordada por los gestores del territorio mediante un manejo propicio que contempla: 1) el cuidado y aprovechamiento de la reserva de agua dulce más grande de Argentina; y 2) la mitigación de las amenazas naturales a las cuales se encuentran expuestas las localidades de El Chaltén y El Calafate, sitios cada vez más poblados y sujetos a la especulación inmobiliaria.

La visión geográfica de la relación glaciares - sociedad ha cobrado gran sentido a lo largo de esa tesis, sobre todo considerando que la dinámica glacial pasada y presente ha condicionado las posibilidades de ocupación y aprovechamiento de la cuenca por parte del hombre. Inicialmente, la disponibilidad de vastas extensiones de pasturas naturales y cuerpos de agua estimuló la actividad ganadera, la cual fue la principal actividad hasta comienzos de la década de los 80 del siglo pasado. Con posterioridad, la matriz productiva comenzó a reconvertirse, direccionándose hacia el turismo glaciar. Eso condujo a que las localidades de El Chaltén y El Calafate experimentaran una fuerte expansión urbana, al punto de incrementar su área 18 veces entre 1985 y 2017 (El Calafate).

Finalmente, y a modo de corolario, surge la imperiosa necesidad de un trabajo y esfuerzo mancomunado entre el estado municipal, provincial, nacional, Parque Nacional Los Glaciares y entidades científicas para fortalecer y establecer una visión interdisciplinaria del/los fenómenos a monitorear y/o analizar mediante un abordaje integral con provisión de datos certeros. A partir de la integración de algoritmos robustos y tecnología de punta, y la integración de las disciplinas del sensoramiento remoto con adecuados métodos de procesamiento de datos geoespaciales, se

obtendrán soluciones eficientes y precisas en la detección de cambios en los glaciares en vistas de desarrollar un plan de ordenamiento territorial y gestión del riesgo capaz de preservar el ambiente natural, al mismo tiempo que reducir el impacto de la dinámica ambiental sobre el espacio humanizado.

BIBLIOGRAFÍA

Ackerman, S. A., R. E., Holz, R. Frey, E. W. Eloranta, B. C. Maddux, y M. McGill. (2008). Cloud detection with MODIS. Part II: Validation. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* 25 (7): 1073-86. <https://doi.org/10.1175/2007JTECHA1053.1>.

Adaros, R. (2003). *Sismicidad y Tectónica Del Extremo Sur de Chile*. Memoria de Magister, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad. de Chile.

Bennett, M. y Glasser, N. (2009). *Glacial Geology: Ice Sheets and Landforms, 2nd Edition*. Second. Oxford: John Wiley & Sons.

Consejo Federal de Inversión. (1973). *Departamento Lago Argentino. Estructura económica y social*. Santa Cruz. <http://biblioteca.cfi.org.ar/wp-content/uploads/sites/2/1973/01/12401.pdf>.

Cuffey, K.M., y Paterson, W.S.B. (2010). *The physics of glaciers*. Editado por Academic Press. *Journal of Glaciology*. Amsterdam: Cambridge University Press. <https://doi.org/10.3189/002214311796405906>.

Garreaud, R. D. (2009). The Andes climate and weather. *Advances In Geosciences* 7 (1): 1-9. <https://doi.org/10.5194/adgeo-22-3-2009>.

Garreaud, R. D., Vuille, M., Compagnucci, R., y Marengo, J. (2009). Present-day South American climate. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 281 (3-4): 180-95. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2007.10.032>.

Ghiglione, M. C, Suarez, F., Ambrosio, A., Poian, G., Cristallini, E., Pizzio, M.F., Reinoso, M., et al. (2009). Structure and Evolution of the Austral Basin Fold-Thrust Belt, Southern Patagonian Andes. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 65 (1): 215-26.

Hall, D., Cullather, R., DiGirolamo, N., Comiso, J., Medley, B. y Nowicki, S. (2018). A multilayer surface temperature, surface albedo, and water vapor product of Greenland from MODIS. *Remote Sensing* 10 (4): 1-17. <https://doi.org/10.3390/rs10040555>.

IANIGLA-Inventario Nacional de Glaciares, y Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación. (2018). *Resumen ejecutivo de los resultados del Inventario Nacional de Glaciares*. www.glaciaresargentinos.gob.ar.

- Jansson, P., Hock, R. y Schneider, T. (2003). The concept of glacier storage: a review. *Journal of Hydrology* 282: 116-29. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(03\)00258-0](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(03)00258-0).
- Kraemer, P., y Riccardi, A. (1997). Estratigrafía de la región comprendida entre los lagos Argentino y Viedma (49 40'-50 10' lat. S). *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 52 (3): 333-60.
- Lo Vecchio, A., Lenzano, M., Richiano, S., y Lenzano, L. (2016). Lithologic identification and characterization using ETM+ (Landsat 7). Study case of the Upsala glacier basin, Argentine. *Revista de Teledetección* 2016 (46): 57-72. <https://doi.org/10.4995/raet.2016.4482>.
- Lo Vecchio, A. (2020). Dinámica glaciaria de la cuenca del río Santa Cruz, Andes Patagónicos Australes: estudio y análisis multiescalar mediante el uso de geotecnologías, Universidad Nacional de Cuyo.
- Martinić, M. (1988). Actividad volcánica histórica en la región de Magallanes. *Revista Geológica De Chile* 15 (2): 181-86. <https://doi.org/10.5027/andgeoV15n2-a07>.
- Martinić, M. B. (2008). Registro histórico de antecedentes volcánicos y sísmicos en la Patagonia Austral y la Tierra del Fuego. *Magallania* 36 (2): 5-18. <https://doi.org/10.4067/S0718-22442008000200001>.
- McCabe, M. F., Chylek, P., Manvendra K D. (2011). *Detecting ice-sheet melt area over western Greenland using MODIS and AMSR-E data for the summer periods of 2002-2006*. <https://doi.org/10.1080/01431161.2010.501830>.
- Meier, M.F., y Roots E.F.. (1982). Glaciers as a water resource. *Nature and Resources*. <http://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=XF19830896816>.
- Ministerio de Hacienda. 2018. «CARACTERIZACIÓN SOCIO-PRODUCTIVA». Santa Cruz. http://www2.mecon.gov.ar/hacienda/dinrep/Informes/archivos/santa_cruz.pdf.
- Moragues, S., Lenzano, M.G., Moreiras, S., Lo Vecchio, A., Lannutti, E. y Lenzano, L. (2019). Slope instability analysis in South Patagonia applying multivariate and bivariate techniques on Landsat images during 2001–2015 period. *CATENA* 174 (marzo): 339-52. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.11.024>.
- Moragues, S., Lenzano, M.G., Moreiras, S., Lo Vecchio, A., Lannutti, E., Lenzano, L. (2019). Slope instability analysis in South Patagonia applying multivariate and bivariate techniques on Landsat images during 2001–2015 period. *CATENA* 174 (marzo): 339-52. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.11.024>.
- Orlove, B. S., Wiegandt, E. y Luckman, B. (2008). *Darkening peaks : glacier retreat, science, and society*. University of California Press. https://books.google.com.ar/books?hl=es&lr=&id=vG1EKyK8RoC&oi=fnd&pg=PA3&dq=darkening+peaks&ots=Wh0xE5xDX8&sig=xeswnRma8WenH2CP9L_cMNSMqwU&redir_esc=y#v=onepage&q=darkening+peaks&f=false.
- Østby, Torbjørn I., Schuler, T. y Westermann, S. (2014). Severe cloud contamination of MODIS Land Surface Temperatures over an Arctic ice cap, Svalbard. *Remote Sensing of Environment* 142: 95-102. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.11.005>.

Penalba, O. y Rivera, J.A. (2013). Future Changes in Drought Characteristics over Southern South America Projected by a CMIP5 Multi-Model Ensemble. *American Journal of Climate Change* 02 (03): 173-82. <https://doi.org/10.4236/ajcc.2013.23017>.

Penalba, O., y Rivera, J. A. (2016). Regional aspects of future precipitation and meteorological drought characteristics over Southern South America projected by a CMIP5 multi-model ensemble. *INTERNATIONAL JOURNAL OF CLIMATOLOGY* 36: 974-86. <https://doi.org/10.1002/joc.4398>.

Secretaría de Estado de Ambiente. (2017). *Informe Técnico N° 41. Comisión Evaluadora del Estudio de Impacto Ambiental: "Proyecto Aprovechamiento Hidroeléctrico del río Santa Cruz, Represas Presidente N. Kirchner y Gob. J. Cépernic"*; <http://saludsantacruz.gob.ar/secretariadeambiente/wp-content/uploads/2017/11/dictamen-tecnico-represas.pdf>.

Shin, S., Minowa, M., Daiki Sakakibara, D., Skvarca, P., Sawagaki, T., Ohashi, Y., Naito, N., y Chikita, K. 2016. Thermal structure of proglacial lakes in Patagonia. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface* 121 (12): 2270-86. <https://doi.org/10.1002/2016JF004084>.

Vich, A., (1996). *Aguas continentales: formas y procesos*. Primera. Mendoza: Centro de Economía, Legislación y Administración del Agua.

Wan, Z. (2013). MODIS Land Surface Temperature Products Users' Guide. *Contract*, (30). <https://doi.org/10.5067/MODIS/MOD11B3.006>.

White, A., y L. Copland. (2015). Decadal-scale variations in glacier area changes across the Southern Patagonian Icefield since the 1970s. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research* 47 (1): 147-67. <https://doi.org/10.1657/AAAR0013-102>.

Williams, Richard, S. y Ferrigno, J. (2012). State of the Earth's Cryosphere at the Beginning of the 21st Century: Glaciers, Global Snow Cover, Floating Ice, and Permafrost and Periglacial Environments - Global Snow Cover. *Satellite Image Atlas of Glaciers of the World*, 254. <http://pubs.usgs.gov/pp/p1386a/gallery1-fig16.html>.

EL AUTOR

Andrés Lo Vecchio Repetto, es Geógrafo profesional y Doctor en Geografía por la Universidad Nacional de Cuyo. Actualmente posee una beca postdoctoral de CONICET y es Profesor Asociado Interino de las de Filosofía y Letras (UNCuyo). Su actividad científica está mayormente orientada al estudio de la dinámica glaciar en los Andes Argentinos a través de la integración de técnicas geomáticas, todo ello traducido en más de 10 publicaciones científicas en revistas de relevancia internacional. Además, también está interesado en el desarrollo y aplicación de herramientas digitales en la enseñanza de la Geografía a través de la construcción de la primera Mesa Topográfica Digital de una Universidad Pública de la República Argentina y en el desarrollo de modelos de Realidad Aumentada de diversos escenarios naturales y humanizados.