

# Deslizamiento de ladera y tsunami asociado en el lago Argentino, canal Upsala, provincia de Santa Cruz, Patagonia Argentina

Diego A. Winocur<sup>(1)</sup> Gabriel Goyanes<sup>(2)</sup> y Gonçalo Vieira<sup>(3)</sup>

(1) Instituto de Estudios Andinos "Don Pablo Groeber" (UBA-CONICET), CABA, Argentina

(2) Instituto Antártico Argentino – CONICET, Buenos Aires, Argentina, gabrielgoyanes@yahoo.com

(3) Instituto de Geografía e Ordenamento do Território, Universidade de Lisboa, Lisboa, Portugal

\* email: winocur@gl.fcen.uba.ar

**Resumen.** Se describe un proceso de remoción en masa ocurrido sobre la ladera occidental del brazo Upsala en el lago Argentino en Febrero de 2013. Se trata de un deslizamiento de ladera que posee su zona de arranque en un depósito morénico lateral e involucra parte del afloramiento rocoso, generado por el retroceso del glaciar Upsala. Dicho movimiento involucro un volumen de material movilizado de aproximadamente 4.000.000 m<sup>3</sup> que corresponde a un bloque de aproximadamente 800 m de largo por 200 m de altura. Este movimiento abrupto se dirigió pendiente abajo recorriendo una centena de metros hasta insertarse de manera abrupta en el lago Argentino. Este hecho tuvo como consecuencia inmediata la generación de olas de gran tamaño (tsunami) que se propagaron a lo largo del canal Upsala por más de 15 km destruyendo a su paso un muelle turístico en la Bahía Onelli, el transporte de grandes témpanos de hielo depositados en las laderas opuestas del valle y la destrucción de parte del bosque nativo de Nothofagaceas. Afortunadamente no se reportaron víctimas, sin embargo, poseen un riesgo potencial inminente debido a que la zona es muy transitada por una gran cantidad de embarcaciones turísticas que transitan el lago Argentino y que amarraban sus embarcaciones en el muelle destruido.

**Palabras Claves:** Deslizamiento, Tsunami, Upsala, Lago Argentino, riesgo geológico.

## 1 Introducción

La zona de estudio se encuentra ubicada en el brazo norte del lago Argentino, denominado canal Upsala (49°58'S, 73°16'W) en la provincia de Santa Cruz y forma parte del Parque Nacional Los Glaciares (Figura 1.A). Numerosos estudios han sido realizados en los aspectos glaciológicos del glaciar Upsala y mas ampliamente del Campo de Hielo Patagónico sur (Skvarca 2002, Strelin et al., 2014 entre otros). Sin embargo no hay estudios específicos relacionados a los procesos de remoción en masa asociados al retiro extraordinario de los glaciares en este sector y su evaluación con respecto al riesgo geológico que ellos implican (Goyanes et al., 2015).

El canal Upsala es un valle glaciario inundado con una profundidad media de aprox. 500 m, y un perfil transversal asimétrico, que pasa de cotas cercanas a los 750 m en la parte occidental a 250 m en la parte oriental. Este mismo valle se encuentra englazado en su tramo superior y el

retroceso del mismo posee tasas extraordinarias debido a condiciones particulares en el mecanismo de avance del mismo (Strelin et al., 2014, Malagnino y Strelin, 1992). Estas tasas de retroceso varían entre 260 metros por año (registrado por Malagnino 2004 entre los años 1997 a 2004) a 666 m x año registrado por los mismos autores entre 1981 y 1993. Este es un ejemplo mundial excepcional en su tasa de retroceso por calving generado principalmente porque su lengua no esta en contacto con la base del valle, sino que flota en su lago proglaciario.

Este retroceso significativo trae aparejado la relajación abrupta de las laderas generando grandes grietas en las mismas que son rellenadas por el agua caída en verano y la nieve caída en invierno que por expansión térmica y procesos de congelifración generan el ensanchamiento de las mismas. Esto genera la inestabilidad de las laderas, las cuales colapsan fácilmente ante un evento repentino o súbito como un *shock* sísmico, aunque en si mismo no represente grandes magnitudes.

## 2 Descripción del evento

Durante los días 10 y 11 de febrero del 2013 se produjo un deslizamiento de un bloque de till y sustrato rocoso de aproximadamente 800 m de largo por 200 m de altura involucrando un volumen aproximado de 4.000.000 m<sup>3</sup> (Figuras 1.B y 1.C). Este bloque removido descendió directamente al canal Upsala, desplazando un volumen similar de agua y generando una ola de grandes dimensiones (tsunami). La misma se propagó inicialmente 4 km. hacia la ladera opuesta, depositando en la península Herminita témpanos de dimensiones métricas (Figura 2.B). Recorrió 15 km. a lo largo del brazo Upsala hasta alcanzar la Bahía Onelli, llegando a la costa con una altura aproximada de dos metros y transportando troncos provenientes de la zona de arranque. Como consecuencia se produjo el lavado de la playa areno-gravosa, cárcavas y barrancas típicas de una costa erosiva y quedaron expuestas e inestables las raíces de los arboles (Figura 2.C). Además, la modificación del perfil de costa generó que el muelle, adonde arriban semanalmente las embarcaciones turísticas, quedara inconexo de la tierra firme produciendo su total destrucción. A su vez la ola penetró decenas de metros por el terreno boscoso, hasta alcanzar un refugio y materiales de construcción que se utilizarían para ampliar un refugio, los cuales se

incorporaron a la ola y magnificaron su efecto erosivo (Figura 2. D).

Si bien el disparador del evento aún se desconoce, el mismo podría ser producto de una combinación de factores, tales como abundantes precipitaciones e infiltración de agua desde la laguna proglaciaria y río Agassiz, los cuales recolectan el agua de deshielo del glaciar homónimo, y desembocan en el brazo Upsala a la altura del deslizamiento descripto, en conjunto a un aumento en la actividad sísmica del área. A su vez el reciente retiro glaciario genera la relajación de las laderas por una disminución de la presión, la cual se expande a través de grietas que son favorecidas por el clivaje metamórfico y fracturas de las rocas del sustrato.

### 3 Riesgo geológico

El parque Nacional Los Glaciares recibe más de 550.000 visitas anuales siendo los meses de verano los más concurridos, alcanzando hasta 100.000 vistas. Entre las actividades que pueden realizarse dentro del área protegida, se incluye la navegación por los Brazos Norte, Upsala y Spegazzini del Lago Argentino, con desembarco en Bahía Onelli, además de senderos de trekking, escalada y caminata sobre hielo. La zona de estudio del trabajo, y específicamente el área afectada por el deslizamiento y tsunami ocurrido en febrero de 2013, se encuentran enmarcadas en la ladera oeste del brazo Upsala, el cual es visitado a través de embarcaciones que se acercan a los frentes glaciarios. Los procesos de remoción en masa, promovidos por la inestabilidad de las laderas de los valles glaciarios, constituyen un riesgo geológico con implicancias directas tanto en las actividades turísticas que fomenta el Parque Nacional como en las áreas protegidas.

A la luz de lo ocurrido durante el mes de febrero de 2013, es de vital importancia el estudio de procesos de remoción en masa en las inmediaciones al brazo Norte del lago Argentino, y en particular el reconocimiento y monitoreo de laderas inestables en el brazo Upsala, las cuales han quedado recientemente desconexas de la lengua glaciar principal. En esta instancia, y a partir de la observación, análisis y comparación de imágenes satelitales tomadas en fechas previas al 2013 se pudieron reconocer algunas fracturas de relajación sobre la ladera oeste, las cuales parecerían afectar también a la roca subyacente. Al compararlas con las imágenes posteriores al deslizamiento, se observa por un lado que la zona de arranque del deslizamiento se relaciona directamente con las grietas reconocidas, y que estas grietas están controladas por fracturas, diaclasas y clivaje propios de la roca subyacente a la capa edáfica y el till glaciario. Por otro lado, se observa que las grietas localizadas en la parte alta de la ladera todavía estarían presentes, de manera que la misma continua inestable y vulnerable a la ocurrencia de nuevos deslizamientos (Figuras 1.B y 1.C).

Por este motivo es que en una reciente campaña, llevada a cabo en el mes de febrero del corriente año, se realizó un relevamiento con el Drone “Suzanne Daveau” del IGOT-ULisboa, equipado con una cámara digital y un GPS, con la finalidad de obtener un mosaico de fotografías aéreas y un modelo digital de elevaciones (DEM) de alta resolución del área. La información deducida a partir de estos relevamientos muestra la presencia de fracturas paralelas a la ladera de 350 m de largo por 6-10 m de ancho y algunos metros de profundidad, que afectan también al sustrato rocoso. Las mismas cubren un área de aproximadamente 1000 x 700 m sobre la cual se observa gran cantidad de árboles caídos, que ayudan en la identificación de la localización de estructuras incipientes dentro del espeso bosque.

#### 3.1 Propuesta de plan de monitoreo

A partir de la información obtenida hasta la fecha se desprende la importancia de llevar a cabo un monitoreo de las laderas inestables, alguna de las cuales ya han sido identificadas. Este seguimiento permite por un lado prever la posible ocurrencia de nuevos deslizamientos, y por otro identificar la formación y crecimiento de nuevas grietas, y evaluar la estabilidad de las laderas en la zona. Dado que estas estructuras condicionan fuertemente la ocurrencia de deslizamientos, se han realizado como primera medida la identificación y caracterización de las grietas ya existentes, mediante la utilización de imágenes antes mencionadas. Como plan a futuro inmediato se pretende medir y controlar la actividad de las mismas, dadas por su crecimiento en longitud, profundidad o espesor, mediante un monitoreo topográfico periódico y relevamiento de campo, a partir de puntos de referencia, y la instalación de cámaras con tomas periódicas o en continuo.

Por otro lado, se continuará con la utilización de sensoramiento remoto a través de imágenes multiespectrales VHR (Geoeye, Ikonos y Quickbird) para la identificación de nuevas grietas y lineamientos del sustrato rocoso, a partir del análisis de la vegetación (NDVI), aplicación de filtros y análisis orientados con falsos positivos, los cuales ya han sido indicados como métodos útiles en la identificación y monitoreo de grietas en deslizamientos (Stumpf et al., 2012). Además se implementará el análisis mediante imágenes SAR (*Synthetic Aperture Radar*) obtenidas por diversos sensores, para registrar desplazamientos lentos de la superficie incluso con resolución centimétrica, utilizando la técnica PS (*Persistent Scatterers*) la cual se basa en la comparación de unos 15 a 20 interferogramas correspondientes a una serie de tiempo, donde se reconocen los píxeles caracterizados por una fase interferométrica estable a lo largo del tiempo (Oliveira et al., 2014). Además se continuará trabajando con el dron, generando relevamientos multi temporales con imágenes RGB de alta resolución y utilizando los métodos SfM

(*Structure from Motion*) y MVS (*Multi view stereopsis*) para convertir el mosaico de imágenes en superficies 3D y compararlas temporalmente en conjunto con los modelos de elevación digital (DEM) asociados. Esto último permite obtener las direcciones de flujo en la dinámica del movimiento de las laderas mediante la utilización de algoritmos que comparan las imágenes y permiten medir tasas de desplazamiento (Lucieer et al., 2014).

Por otra parte se tendrán en cuenta los datos pluviométricos y nivométricos disponibles obtenidos en estaciones cercanas para identificar el posible disparador y el incremento en la apertura de las grietas a causa del incremento en la disponibilidad de agua en el medio.

El conjunto de estos análisis permitirá conocer el estado de actividad de las laderas, establecer tasas de movimiento y factores influyentes en el mismo, datos fundamentales para elaborar un plan de alerta y evaluar la mitigación del lugar. Además permite una aproximación al impacto que tendría un nuevo deslizamiento en el área. Si bien el mismo depende de la dimensión del evento, cuyo volumen no puede predecirse, si puede ser utilizado el hecho de 2013 como un precedente para la estimación y zonación del riesgo geológico. Por otra parte la información recabada permitirá generar una posible predicción de sucesos a partir de la extrapolación de los mismos a lo largo de los valles glaciarios recientemente libres de hielo.

### 3.2 Mitigación

Considerando el riesgo geológico potencial del brazo Upsala ante la ocurrencia de nuevos deslizamientos, es menester la aplicación de medidas que mitiguen el impacto de estos procesos de remoción en masa sobre las personas (locales y turistas) e infraestructura cercanas al área. En primera instancia se debe dar conocimiento de los potenciales riesgos de deslizamientos, así también sus características principales y en que consiste el monitoreo de laderas inestables a Parques Nacionales, empresas de turismo y pobladores locales en general.

Luego habrá que trabajar en conjunto con estos organismos para que puedan participar del monitoreo de manera conjunta con los especialistas y de esta manera realizar un mapa de riesgo asociado a procesos de remoción en masa. Como medidas no estructurales e inmediatas sería el desarrollo de cartelería informativa, además de charlas de divulgación sobre este tipo de fenómenos y establecer un perímetro de “seguridad” de acercamiento a los sectores turísticos y realizar una ruta de navegación lo más segura posible y lo más alejada de las laderas inestables. Por otra parte se deberá proponer un sector de “resguardo seguro” o punto de encuentro de embarcaciones en caso de desencadenarse un movimiento súbito de ladera. A su vez, se propone establecer un sistema de alarma que junto con el monitoreo de la ladera y de los datos climáticos evaluados “en tiempo”, dé aviso a las embarcaciones y

turistas que estén por la región, ante un eventual riesgo de deslizamiento para acudir a zonas seguras o bien interrumpir las excursiones.

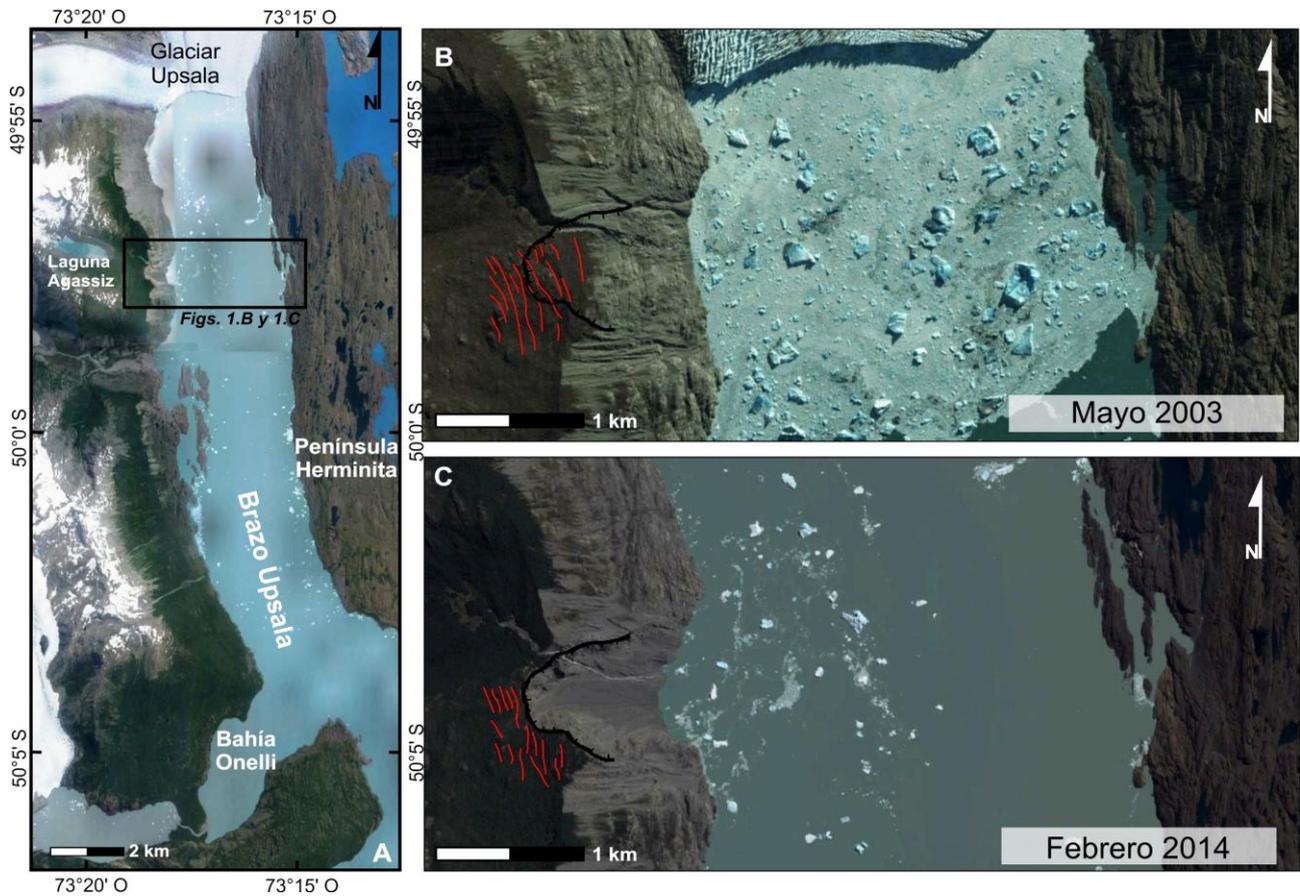
Además debe existir un plan de difusión, concientización, conocimiento y capacitación a los guardaparques, como a los guías turísticos y turistas que ingresan al área del Parque Nacional los Glaciares.

## 4 Discusión y conclusiones

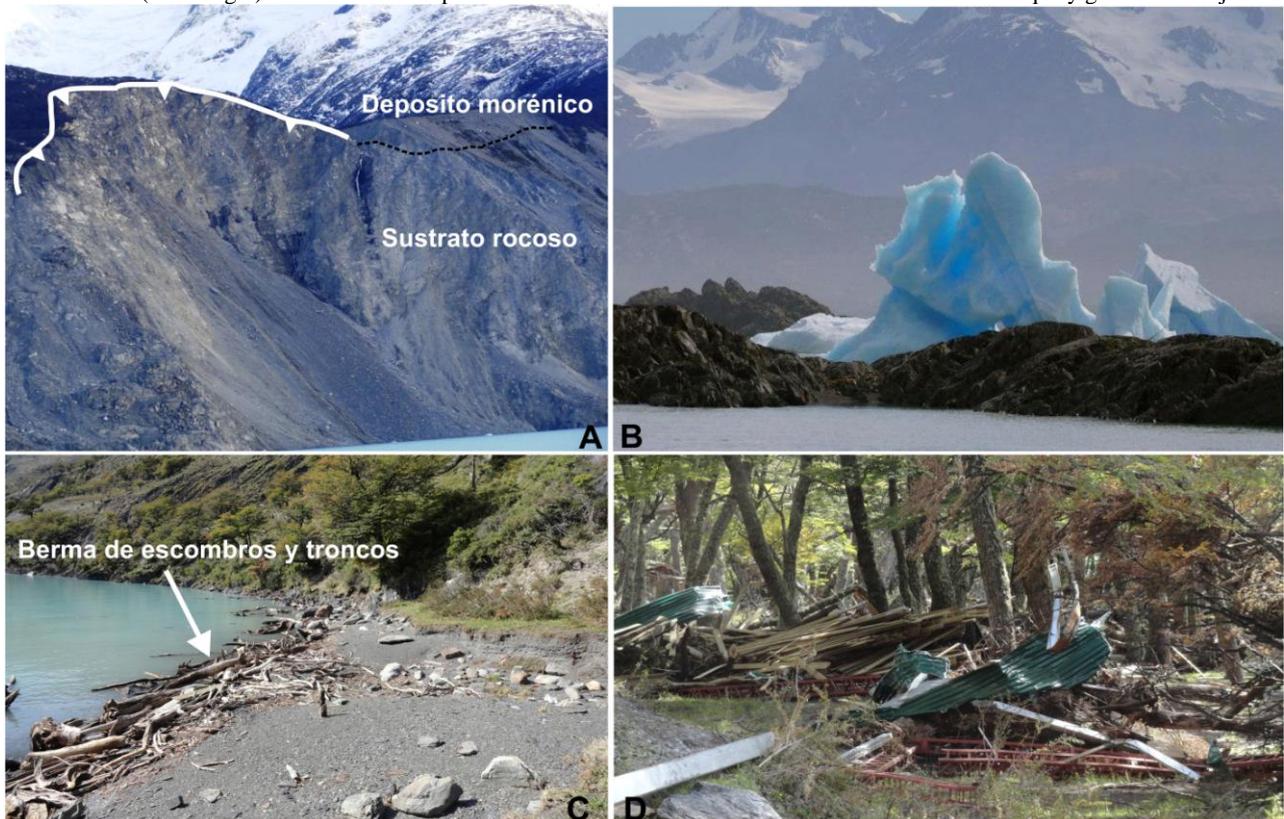
Considerando que el PN Los Glaciares es visitado por cientos de miles de personas anualmente, y particularmente las excursiones en embarcaciones a Bahía Onelli y glaciario Upsala superan los 200.000 turistas anuales se considera que establecer los factores promotores y disparadores de deslizamientos, es fundamental para el entendimiento y evaluación de los procesos de remoción en masa en la zona. Por otro lado y a partir de los hechos ocurridos recientemente y las observaciones realizadas en base a imágenes satelitales, fotografías aéreas y los datos relevados mediante un drone, es imprescindible y necesario el monitoreo inmediato de las laderas occidentales del brazo Upsala para la prevención y mitigación de potenciales nuevos deslizamientos en la zona.

## Referencias

- Goyanes, G., Vieira, G., Winocur, D., y Caselli, A., 2015. Riesgo geológico asociado a deslizamientos en la ladera oeste del canal Upsala, Cordillera de los Andes, Patagonia Argentina. V Congreso Ibérico de la International Permafrost Association Programa de sesiones y Cuaderno de resúmenes: pág. 49. Valladolid.
- Lucieer, A., de Jong, S.M., and Turner, D. (2014). Mapping landslide displacements using Structure from Motion (SfM) and image correlation of multi-temporal UAV photography. *Progress in Physical Geography* 38(1): 97-116.
- Malagnino, E.C., Strelin, J.A., 1992. Variations of Upsala Glacier in southern Patagonia since the late Holocene to the present. In: Naruse, R., Aniya, M. (Eds.), *Glaciological Researches in Patagonia, 1990*. Japanese Society of Snow and Ice, pp. 61e85.
- Oliveira, S., Zêzere, J., Catalão, J. y Nico, G., 2014. The contribution of PSInSAR interferometry to landslide hazard in weak rock-dominated areas. *Landslides*. DOI 10.1007/s10346-014-0522-9.
- Strelin, J., Kaplan, M., Vandergoes, M., Denton, G. y Schaefer, J., 2004. Holocene glacier history of the Lago Argentino basin, Southern Patagonian Icefield. *Quaternary Science Reviews*, 101, 124-145.
- Stumpf, A., Malet, J., Kerle, N., 2012. Mapping landslide surface fissures with matched filtering and object-oriented image analysis. *Proceedings of GEOBIA 2012*. Fourth international conference on Geographic Object-Based Image Analysis, Rio de Janeiro.
- Skvarca, P., De Angelis, H., Naruse, R., Warren, C.R. y Aniya, M., 2002. Calving rates in freshwater: new data from southern Patagonia. *Annals of Glaciology*, 34, 379-384.



**Figura 1.** A. Ubicación de la zona de estudio en el Parque Nacional Los Glaciares y ubicación del deslizamiento. B. Ladera occidental del brazo Upsala previo al deslizamiento de febrero del 2013, donde se indican las grietas de relajación (líneas rojas) y la futura muesca (línea negra). C. Misma ladera posteriormente al deslizamiento. Se observa la zona de arranque y grietas de relajación.



**Figura 2.** A. Detalle de la zona de arranque y muesca del deslizamiento producido en 2013. B. Témpano depositado en la ladera opuesta al deslizamiento, a 4 km de distancia. C. Costa de la Bahía Onelli modificada tras el paso de la ola gigante. Se observa el perfil de costa erosivo y la abundancia de troncos transportados desde la zona de arranque. D. Acumulación de escombros en las inmediaciones a la costa de la Bahía Onelli.