

# Tomografía sísmica en glaciares de escombros en las nacientes del arroyo Los Patos Norte. Calingasta, San Juan, Argentina

Ana P. Forte<sup>1</sup>, Arturo E., Güell<sup>2</sup>, Cristian D. Villarroel<sup>1</sup>

1. Departamento de Geología. INGENIO. Universidad Nacional de San Juan.
2. Departamento de Geofísica. Universidad Nacional de San Juan.

E-mail: [anapau.forte@gmail.com](mailto:anapau.forte@gmail.com)

Palabras Clave: Tomografía sísmica, Glaciares de escombros, Los Patos Norte, Cordillera Frontal, San Juan

## Resumen

La cordillera de los Andes en la provincia de San Juan, Argentina presenta un amplio desarrollo del ambiente periglacial, donde se han desarrollado gran cantidad de glaciares de escombros, importantes reservas hídricas permanentes. La presente contribución resume la utilidad del método de tomografía sísmica para la estimación de espesores de las capas que componen los glaciares de escombros. Se estudiaron dos glaciares: El Pelado y Los Patos Norte; ambos ubicados en las nacientes del arroyo Los Patos Norte (Cuenca del río San Juan), departamento de Calingasta. Provincia de San Juan. Los glaciares de escombros se constituyen por detritos con hielo intersticial y una capa superficial o activa, cuyos espesores estimados en ambos cuerpos han dado resultados muy diferentes: para el glaciar El Pelado el promedio de espesor es de 14 m. y 8 m. para el glaciar Los Patos Norte. Permitiendo caracterizar ambos cuerpos como: glaciar de escombros inactivo y activo, respectivamente.

## Introducción

La Subcuenca del arroyo Los Patos Norte, tiene una superficie de 15.841 Km<sup>2</sup> y la topografía en la zona de estudio es pronunciada, varía entre 3550 y 4300. Limita al noroeste de la divisoria de agua de la Cuenca del río Limarí, Republica de Chile.

El arroyo Los Patos Norte nace en el cordón de Los Azules de orientación este-oeste, y drena de norte a sur hasta su confluencia en el río La Embarrada, que desemboca en el río Frio, un importante afluente del río Blanco. A su vez, este último, alimenta al río Los Patos, que es uno de los dos grandes ríos que forman el río San Juan. Las coordenadas geográficas de referencia son: longitud, entre 70°14'24'' y 70°17'7''; y latitud entre 31°2'27'' y 31°4'. Este trabajo, es un aporte al "Proyecto del Inventario de glaciares de la cuenca del río San Juan" convenio Gobierno Provincia de San Juan y Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, UNSJ, en el marco de la recientemente sancionada Ley Nacional 26639

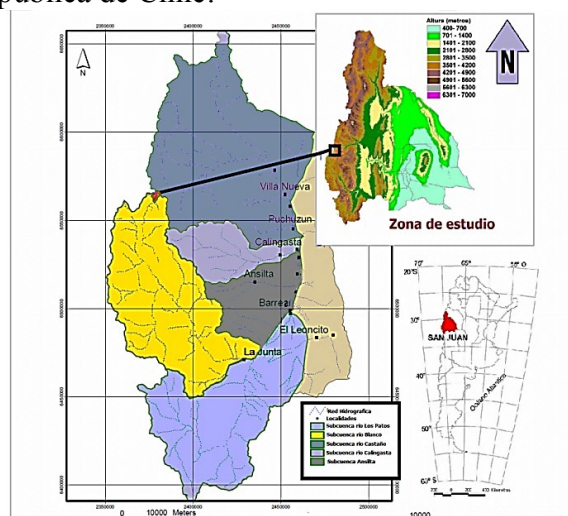


Figura 1: Arroyo los Patos Norte, departamento Calingasta, Provincia de San Juan, Argentina.

“Presupuesto Mínimo para la Preservación de Glaciares y Ambiente Periglacial” en la República Argentina.

El método de tomografía sísmica se aplicó en dos glaciares de escombros: Los Patos Norte (coordenadas geográficas 31° 03' 2,78" Sur y 70°14' 52,45" Oeste) y El Pelado (Coordenadas: 31° 02' 43,47" Sur y 70°15 '51,50" Oeste), sobre los que se realizaron, además, levantamientos topográficos, descripciones litológicas y geomorfológicas.

### **Metodología de trabajo**

En principios se seleccionaron dos glaciares de escombros: Los Patos Norte y El Pelado, a partir de análisis digitales de DEMs e imágenes satelitales, de diferentes plataformas. Luego en el campo se realizaron descripciones geomorfológicas: localización y caracterización de estructuras, levantamientos topográficos y geológicos de superficie, especialmente a lo largo de las líneas o tendidos sísmicos. En gabinete se complementó el levantamiento con el uso de modelos digitales de elevación.

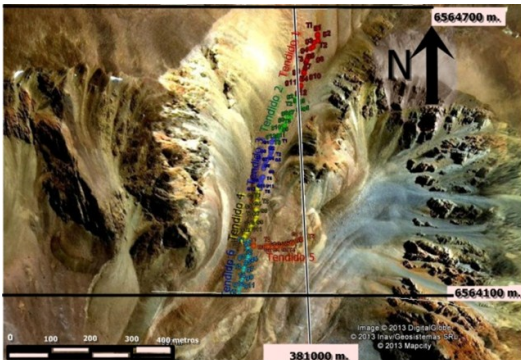
Para el método de Tomografía Sísmica, se realizaron varios tendidos sísmicos en dirección longitudinal y transversal a los glaciares. El equipo de medición empleado es el sismógrafo EG-S 1225 GEOMETRICS con registro digital de 12 canales. Se trabajó con tendidos de 120 m de longitud cada uno y doce sensores de señal (geófonos). Se usó una separación de 10 m entre geófonos, estimándose una profundidad de investigación de 40 m. En cada tendido se definieron cinco posiciones de Tiro, donde se generaron las ondas sísmicas “P” de compresión que penetraron el terreno, los impactos fueron repetidos para superponer energía (stacking) en la fuente sísmica y aumentar la relación señal/ruido, gracias al sistema de geófonos receptivos se generaron los sismogramas correspondientes a cada tiro. Los registros obtenidos en cada Tendido han sido procesados e interpretados, inspeccionado canal por canal, evaluando la calidad y la coherencia de la señal. A partir de estos datos se construyen las dromocronas (curvas camino-tiempo), de donde se obtuvieron los valores de velocidades sísmicas para las distintas capas del subsuelo y poder calcular las profundidades de estos cambios de velocidades a lo largo del perfil. Estas velocidades fueron correlacionadas con la topografía del terreno y con las distintas composiciones y/o propiedades mecánicas de los materiales que componen el subsuelo.

### **Resultados y Discusiones**

La zona de estudio se caracteriza por ser una zona de ambiente periglacial, donde abundan los *Glaciares de Escombros*: Mesoformas sedimentarias constituidas por detritos congelados, con hielo intersticial y lenticular, que se mueven lentamente, pendiente abajo con una velocidad entre 1 y 150 cm/año, (Trombott y Ahumada, 2005). Están constituidos por una cobertura detrítica, que actúa como capa activa y un núcleo congelado o permafrost esporádico.

Se estudiaron dos glaciares de escombros: Los Patos Norte (G702479O310505S) y El Pelado (G702641O310457S). Ambos criogénicos o primarios (Wahrhaftig y Cox 1959, Haeberli, 1985, Barsch 1978, 1996), lo cual implica que se originaron en un ambiente periglacial, adaptados a condiciones climáticas áridas. Ambas crioformas están emplazados en antiguos circos glaciares. Como la mayoría de los litoglaciares criogénicos se generan a partir de la acumulación en la zona de arranque por nieve y derrubios, principalmente gelifractos y depósitos morrénicos. La distribución interna de detritos y de hielo es característica de cada glaciar y por las grandes diferencias, aun no se ha desarrollado un modelo que caracterice en forma completa tasas y formas de movimiento. (Haeberli 1990, Giardimo *et al* 1987, Harris 2004). El detrito suele hacer de sostén primario, mientras que el hielo se dispone en forma

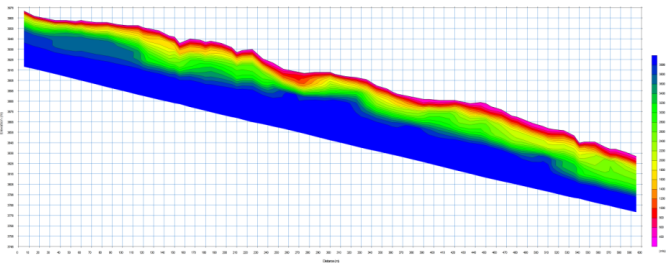
intersticial, aunque en un mismo glaciar de escombros podrían hallarse facies con detrito sostén, (donde el hielo se dispone en forma intersticial) y otras facies de lentes de hielo masivo, que pueden representar épocas de balance de masa positivo y quedan evidenciadas por fuertes anomalías positivas de la velocidad de penetración de ondas P. (Milana y Güell 2008). Aunque al respecto hay hipótesis que sugieren que el hielo percola, se congela y se segrega formando lentes masivos (Wayne 1981, Giardino et. al. 1987 y Haerberli 1990). Estos glaciares pueden contener hasta un 60% de hielo intersticial (Barsch 1978).



**Figura 2:** Seis tendidos sísmicos en el glaciar de escombros Los Patos Norte. El Tendido siete está ubicado más al sur este y no entra en esta imagen. Coordenadas cartesianas UTM.

El glaciar los Patos Norte, (Fig. 2) es un sistema de cuenca compuesta, multiraíz y es considerado, según la clasificación propuesta por GLIM, como lingüiforme ( $\text{largo} > \text{ancho}$ ). La altura máxima del glaciar es 4.250 msnm y 3.755 msnm la altura mínima. Tiene una superficie de 0,86 km<sup>2</sup>. La tomografía sísmica realizada en el glaciar Los Patos Norte se realizó a partir de siete tendidos en la superficie del glaciar de escombros. (Fig 2.) La interpretación de los tendidos sísmicos se realizó construyendo las dromocronas correspondientes y un ajuste de los datos (tiempo versus distancia), aplicando la técnica de la tomografía sísmica, para un modelo de n capas con velocidades crecientes con la profundidad. En la capa activa, la velocidad de propagación de ondas P es de 350

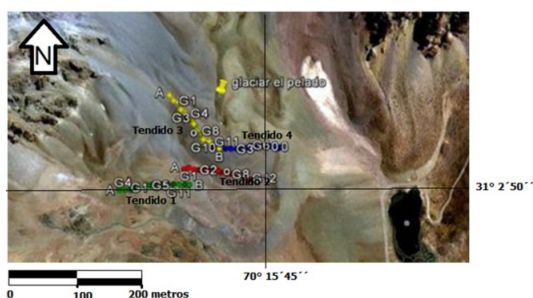
m/s promedio, siendo las dromocronas rectas mayor pendiente en la capa superior. Para el substrato inferior se obtuvo un rango de 1.100 a 4.000 m/s valores de velocidad de propagación, que es la ventana del permafrost. El modelo de velocidad de ondas sísmicas muestra que la capa activa tiene un espesor de 8 metros promedio (Fig. 3), por lo que se considera al glaciar Los Patos Norte un glaciar activo, por su funcionalidad, además de los estudios de geomorfología de superficie: pliegues y costillas arqueados en la



**Figura 3:** Perfil Sísmico Longitudinal. Modelo de velocidades sísmicas de ondas P, realizado a partir de domocronas de los tendidos longitudinales 1, 2, 3, 4 y 6 en el glaciar de escombros Los Patos Norte.

dirección de flujo, que muestra signos de movimiento en su superficie. Además posee frente, talud o narices con pendiente mayor a 30°.

El Glaciar de escombros El Pelado posee una superficie de 0,25 km<sup>2</sup>, las altitudes máxima y mínima, son: 4.080 y 3.830 msnm. Sobre el se realizaron 4 perfiles sísmicos. El glaciar de escombros ha sido caracterizado como inactivo, ya que el espesor de la capa activa ha sido de mucho mayor tamaño, con 14 m. promedio, siendo este espesor muy variable a lo largo de la traza del perfil (Fig. 5), indicando que los macro-procesos criogénicos, intrínsecos al glaciar, están detenidos y el hielo solo ha sido detectado detectable por una anomalía geofísica en profundidad. La pendiente del frente de glaciares denotara ángulos menores a 30°. La reducción del hielo interno, además esta expresada en superficie por estructuras de colapsos: depresiones y termokarst, de hasta 7



**Figura 4:** Glaciar de escombros criogénico, inactivo. Y la traza de los cuatro tendidos sísmicos que se realizaron.

En ambos glaciares la zona de transición entre la capa activa y el permafrost ha sido transicional y continua, produciéndose un aumento gradual de la velocidad de penetración de ondas P con la profundidad.

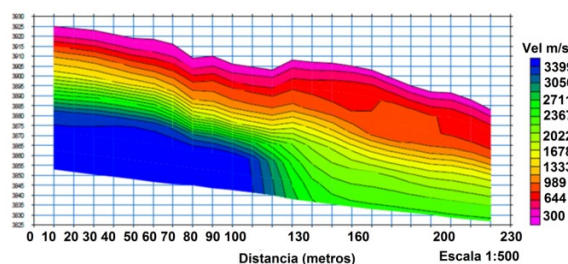
### Conclusiones

El método de tomografía sísmica es muy importante para la identificación de sustratos con hielo intersticial, a partir de zonas de anomalías positivas en la velocidad de penetración de las ondas P. Además con muy buenos valores de estimaciones se puede realizarse un detallado cálculo del espesor de la capa activa.

### Bibliografía

- Barsch, D., 1978. Active rock glaciers as indicators for discontinuous alpine permafrost. An example from the Swiss Alps. Third International Conference on Permafrost, 1: 349-353.
- Frank R., Mauz F., Vogt S., Jodha S., Khalsa S. y Raup B. 2005. Illustrated GLIMS Glacier Classification Manual. Glacier Classification Guidance for the GLIMS Glacier Inventory. GLIMS Regional Center 'Antarctic Peninsula'
- Giardino, R., Shroder, J.F. Jr y Vitck, J.D. 1987. Rock Glaciers, Allen and Unwin, 335 p, London
- Haerberli, W. 1990. Pilot Analysis of permafrost cores from the active Rock Glacier Murtel I, PizCorvatsch, Eastern Swiss Alps, a workshop report. Hidrologie and glaziologie ETH 9, 38 p, Zurich.
- Harris, C. 2004. The Nature and Dynamic of Mountain Permafrost: Paper from the PACE21 Special Issue, Permafrost and periglacial processes 3: 189-391.
- Milana J. P. y Güell A. 2008. Diferencias mecánicas e hídricas del permafrost en glaciares de rocas glaciogénicas y criogénicas, obtenidas de datos sísmicos en El Tapado, Chile. RAGA 63 (3) 310 – 325
- Trombotto D., Ahumada A. L., 2005. Los Fenómenos Periglaciares. Identificación, determinación y aplicación. Opera Lilloana, N° 45. Instituto Miguel Lillo. 131 P. Tucuman. Argentina.
- Wahrhaftig C. y Cox A. 1959. Rock glaciers: II Models and Mechanisms. Progress in physical Geography 16: 127-186
- Wayne, W., 1981. La evolución de glaciares de escombros y morenas en la cuenca del Río Blanco, Mendoza. VII Congreso Geológico Argentino, San Luis. Actas IV, 153-166

metros de diámetro, indicando un fuerte desequilibrio termodinámico entre la crioforma y el medio en el que está emplazado. Bajo esta capa, los materiales no consolidados que lo conforman (gelifrautos, depósitos aluvionales y morrénicos, principalmente), están saturados de hielo intersticial, ya que se han detectado anomalías (positivas) en las velocidades de las ondas sísmicas.



**Figura 5:** Modelo de velocidades sísmicas de ondas P, realizado a partir de las curvas dromocronas obtenidas para los Tendido 3 y 4. Glaciar El Pelado.