



MONITOREO TÉRMICO Y MEDICIÓN DEL FLUJO SUPERFICIAL DEL GLACIAR DE ESCOMBROS VARAS, SIERRA DE ZENTA, CORDILLERA ORIENTAL (NOROESTE ARGENTINO)

Mateo A. Martini^{1,3}, Jorge A. Strelin^{1,2} y Ricardo A. Astini¹

¹ CICTERRA, CONICET-Universidad Nacional de Córdoba; ² Instituto Antártico Argentino; ³ mmartini@efn.uncor.edu

Los glaciares de escombros o glaciares rocosos (IPA, *International Permafrost Association*) son geoformas lobuladas o lenguadas constituidas principalmente por detritos y hielo que se desplazan por gravedad pendiente abajo. En la literatura también se los conoce informalmente como glaciares de roca. Generalmente la velocidad superficial de los glaciares de escombros varía entre pocos centímetros a pocos metros por año (Burger *et al.* 1999, Trombotto *et al.* 1999).

La Cordillera Oriental en el Noroeste Argentino posee numerosas sierras que superan los 5000 m snm, por lo que gran parte del paisaje se encuentra afectado por un clima frío y seco. Por encima de la cota de 3500 m snm las precipitaciones son escasas (<500 mm) registrándose principalmente en los meses de verano (diciembre a marzo) y las temperaturas bajas, siendo la cota de ~4916 m snm la altura estimada de la isoterma de 0 °C (Martini *et al.* 2013). Bajo estas condiciones climáticas se desarrollan numerosos glaciares de escombros, donde los glaciares de escombros activos se encuentran por encima de 4500 m snm (Martini *et al.* 2013). Recientemente, han sido inventariados 635 glaciares de escombros de los cuales 174 (27,5%) fueron clasificados (en base a criterios morfológicos) como activos, 301 (47,5%) como inactivos y 160 (25%) como fósiles (Martini *et al.* 2013).

El glaciar de escombros Varas (23° 12' 8" LS; 65° 3' 45" LO) se ubica en la sierra de Zenta, dentro de la Cordillera Oriental argentina (Figura 1A). En planta posee un ancho máximo de 230 m y un largo máximo de 690 m. Su área en planta es 104.900 m², su espesor medio ~16 m y su frente se sitúa a 4500 m snm. Presenta claros signos de actividad como: irregularidades en su superficie en forma de crestas y surcos longitudinales, un talud frontal con una pendiente media de 35° que se diferencia del resto del cuerpo del glaciar de escombros por presentar sedimentos de granulometría fina (tamaño arena y menores), y un área de aporte muy empinada sin vegetación donde es común observar la caída de bloques por gravedad. En contacto hacia el sureste se encuentra otro glaciar de escombros que en base a criterios morfológicos ha sido clasificado como inactivo ya que se encuentra vegetado por líquenes y yaretas, no presenta crestas y surcos en superficie, y su talud frontal posee un ángulo de inclinación promedio de 31°. Unos 50 m por encima del glaciar de escombros activo Varas a ~4700 m snm, se encuentra un incipiente lóbulo de prótalus de reducidas dimensiones (~3707 m²).

Con el objetivo de realizar un monitoreo térmico del glaciar de escombros Varas se instalaron en abril de 2010, dos termómetros digitales marca Ondotori (modelo TR-52; resolución 0,1 °C; precisión ± 0,5 °C) sobre su superficie a cota 4566 m snm (Figura 1B). Un termómetro se instaló a 1,5 m del suelo para medir la temperatura del aire mientras que el otro fue colocado a 5 cm de profundidad con el fin de obtener temperaturas del suelo superficial, ambos fueron configurados con un intervalo de registro de 1 hora.

Desde abril de 2012 se realiza un monitoreo sobre el glaciar de escombros Varas con el fin de cuantificar su flujo superficial, tanto vertical como horizontal. El método empleado consiste en marcar puntos sobre grandes bloques del glaciar de escombros y tomar su posición geográfica (coordenadas y altitud) remidiéndolas cada año mediante el uso de GPS diferencial. El equipo que se utilizó para este trabajo incluye dos antenas de GPS Trimble R4 doble frecuencia (L1/L2) y una controladora (*Recon*). Las dos antenas son configuradas para tomar datos en simultáneo. Una de ellas es utilizada como estación base y queda fija en el terreno, mientras que la otra es utilizada como estación móvil para medir las coordenadas de los bloques marcados del glaciar de escombros. Las mediciones se llevan a cabo mediante el método *Fast Static* que permite, una vez realizada la corrección diferencial, obtener datos con errores máximos (en promedio) de 3 mm en la horizontal y 3,5 mm en la vertical. En total se están monitoreando 30 puntos de los cuales 24 corresponden al tope del glaciar de escombros activo Varas, 4 al tope del glaciar de escombros inactivo y 2 se ubican en el lóbulo de prótalus que se desarrolla inmediatamente arriba del glaciar de escombros activo (Figura 1B).

Los resultados del monitoreo térmico arrojaron que la temperatura media anual del aire para el año 2011 fue 2,6 °C; mientras que la de suelo fue de 4,7 °C. Para el año 2012 se registraron temperaturas más cálidas ya que la temperatura media anual del aire fue de 3,3 °C mientras que la de suelo alcanzó los 6 °C. A partir de análisis de la temperatura de suelo se contabilizaron 148 ciclos de congelamiento y descongelamiento durante el año 2011, y 143 ciclos en el 2012. También se examinó el tiempo que la superficie se mantiene cubierta de nieve (amplitud térmica ≤1 °C con valores entre +1,5 y -1,5 °C del registro de temperatura de suelo), detectándose períodos muy cortos. El intervalo de tiempo más largo donde la nieve permaneció sobre el glaciar de escombros duró un poco más de 3 días (88 horas) durante el mes de enero de 2012.

En cuanto al monitoreo del movimiento superficial del glaciar de escombros Varas hasta al presente sólo se cuenta con un año de mediciones (período comprendido entre abril de 2012 y abril de 2013). Para el caso del glaciar de escombros inactivo en ninguno de los 4 bloques monitoreados (bloques 27 al 30, Figura 1B) se pudo detectar movimiento vertical y sólo en el bloque 27 se midió un pequeño movimiento horizontal ($2,3 \pm 0,5$ cm/año) que se encuentra en el rango del error que se puede cometer cuando se instala el equipo de medición sobre el bloque. Los dos bloques analizados en el lóbulo de prótalus incipiente presentan alta velocidad de movimiento de entre 1,3-1,5 m/año. Dentro del glaciar de escombros activo Varas los bloques que registraron mayores desplazamientos son el 19 (1,2 m/año), 18 (1,0 m/año) y 20 (0,4 m/año). Los menores desplazamientos se verificaron en los bloques 25 (2,7 cm/año), 21 (3,8 cm/año) y 17 (4,1 cm/año). En el resto de los bloques la velocidad varió entre 14 y 26 cm/año.

Las velocidades de flujo obtenidas permitieron establecer un modelo evolutivo para el glaciar de escombros Varas y geoformas relacionadas, y corroborar la clasificación de actividad realizada previamente sobre ellas por Martini *et al.* (2013) en base a criterios morfológicos. Los registros térmicos indican que el glaciar de escombros activo Varas se encuentra ~400 m por debajo de la altura de isoterma de 0 °C estimada. Este valor difiere sustancialmente del encontrado en otras regiones donde se relaciona la altura de la isoterma de -1 o -2 °C como la cota inferior que alcanzan los glaciares de escombros activos (*e.g.* Haeberli y Burn 2002, Barsch 1996). Es posible que algún efecto local como por ejemplo el denominado efecto chimenea (*chimney effect*, Delaloye y Lambiel 2005) pueda desarrollar anomalías térmicas que generen un sobreenfriamiento en el interior de los glaciares de escombros con fábrica abierta o que sectores que reciban relativamente baja radiación solar puedan generar un contexto favorable para la preservación de hielo (permafrost) en el suelo (Schrott 1996, Azócar y Brenning 2010) y de esta manera, explicar la presencia de glaciares de escombros activos en lugares donde la temperatura media anual del aire es positiva.

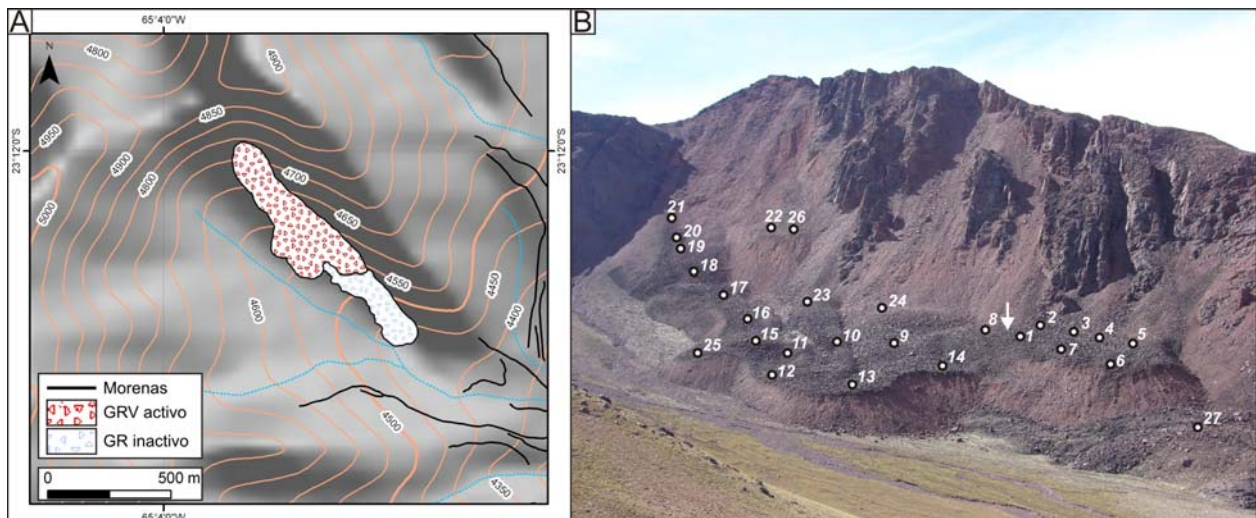


Figura 1. A) Mapa del glaciar de escombros Varas (GEV) activo y el glaciar de escombros (GE) inactivo. B) Vista hacia el norte del glaciar de escombros activo Varas con la ubicación de los bloques monitoreados y de la estación de temperatura (flecha blanca). En el borde inferior derecho de la fotografía se alcanza a ver el glaciar de escombros inactivo (bloque 27). Hay otros tres bloques que no se observan en la fotografía (bloques 28, 29 y 30) que también han sido monitoreados en el glaciar de escombros inactivo. Los bloques 22 y 26 corresponden al lóbulo de prótalus incipiente, mientras que los restantes se encuentran sobre el glaciar de escombros activo Varas.

- Azócar, G. F. y Brenning, A. 2010. Hydrological and geomorphological significance of rock glaciers in the dry Andes, Chile (27°-33° S). *Permafrost and Periglacial Processes* 21: 42-53.
- Barsch, D. 1996. *Rockglaciers*, Springer, 331 p. Berlin.
- Burger, K.C., Degenhardt, J. y Giardino, J. 1999. Engineering geomorphology of rock glaciers. *Geomorphology* 31: 93-132.
- Delaloye, R. y Lambiel, C. 2005. Evidence of winter ascending air circulation throughout talus slopes and rock glaciers situated in the lower belt of alpine discontinuous permafrost (Swiss Alps). *Norw. J. of Geography* 59:194-203.
- Haeberli, W. y Burn, C. R. 2002. Natural hazards in forests: glacier and permafrost effects as related to climate change. *En: Environmental Change and Geomorphic Hazards in Forests*, Sidle RC (ed.). CABI Publishing: Wallingford, New York; 167-202.
- Martini, M. A., Strelin, J. A. y Astini, R. A. 2013. Inventario y caracterización morfoclimática de los glaciares de roca en la Cordillera Oriental argentina. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas* 30 (3): 569-581.
- Schrott, L. 1996. Some geomorphological-hydrological aspects of rock glaciers in the Andes (San Juan, Argentina). *Zeitschrift für Geomorphologie NF* 104: 161-173.
- Trombotto, D., Buk, E. y Hernández, 1999. J. Rock glaciers in the Southern Central Andes (appr. 33° S.L.), Mendoza, Argentina: a review. *Bamberger Geographische Schriften* 19: 145-173.