

HIGH-RESOLUTION GEOMORPHOLOGICAL MAPPING OF ROCK GLACIERS: BALLICAS ROCK GLACIER, CHILEAN CENTRAL ANDES

MAPEO GEOMORFOLÓGICO DE ALTA RESOLUCIÓN DE GLACIARES ROCOSOS: GLACIAR ROCOSO BALLICAS, ANDES CENTRALES CHILENOS

Helena Valenzuela-Astudillo,^{1,4} Cristian Peralta,¹ Eneko Beriain Urbe,^{1,2} Felipe Ugalde Peralta,¹ Cedomir Marangunic Damjanovic,¹ Gino Casassa Rogazinski,³ Fernanda Manríquez Jaramillo,^{1,4} Javiera Carrasco-Galvez,^{1,4} Martina Toledo Ramírez,^{1,4} Ashley Apey Freire.¹

RESUMEN: Utilizando datos de alta resolución obtenidos mediante vehículos aéreos no tripulados (UAV), se llevó a cabo un análisis detallado de la morfología del glaciar rocoso Ballica en los Andes Centrales de Chile. Los resultados revelan que el glaciar rocoso, previamente considerado como una única crioforma, en realidad está compuesto por tres entidades distintas. Se identificaron y caracterizaron diversas estructuras geomorfológicas, tales como taludes frontales y laterales, crestas y surcos. El análisis de las concentraciones de rangos de pendientes sugiere una variabilidad en la actividad y estabilidad de las diferentes partes del glaciar. Estos hallazgos resaltan la importancia de utilizar tecnologías de teledetección de alta resolución para una caracterización precisa de los glaciares rocosos y contribuyen a una mejor comprensión de su evolución en el contexto del cambio climático.

Palabras clave: glaciar rocoso, geomorfología, UAV, mapeo, Andes centrales.

35

Recibido Noviembre 2024/Aceptado Diciembre 2024.

1. Geoestudios, Chile.
2. GEOnomadic, Chile.
3. Universidad de Magallanes, Chile.
4. Criostáticas, Chile.

Contacto: Helena Valenzuela-Astudillo - E-mail: helena.valenzuela@ug.uchile.cl

ABSTRACT: Using high-resolution data obtained by unmanned aerial vehicles (UAVs), a detailed analysis of the morphology of the Ballica rock glacier in the Central Andes of Chile was carried out. The results reveal that the rock glacier, previously considered as a single cryoform, is actually composed of three distinct entities. Various geomorphological structures, such as frontal and lateral slopes, ridges and grooves, were identified and characterized. The analysis of slope range concentrations suggests a variability in the activity and stability of the different parts of the glacier. These findings highlight the importance of using high-resolution remote sensing technologies for an accurate characterization of rock glaciers and contributing to a better understanding of their evolution in the context of climate change.

Keywords: rock glacier, geomorphology, UAV, mapping, Central Andes.

INTRODUCCIÓN

Los glaciares rocosos son un componente relevante de la criósfera andina. A lo largo de los Andes chilenos y argentinos, su distribución plantea desafíos y debates permanentes en variadas temáticas, desde si representan un aporte hidrológico a las cuencas; cuál es su rol en el transporte de sedimentos o cómo se comportan frente al cambio climático.

Gracias al avance en la tecnología de vehículos aéros no tripulados (UAV), la implementación del levantamiento topográfico mediante estos aparatos ha beneficiado el estudio de los glaciares rocosos. Esta técnica ha permitido obtener datos detallados sobre la morfología y la dinámica de estos cuerpos de hielo. Numerosas investigaciones han analizado cambios morfométricos, cinemática y patrones de flujo en glaciares rocosos a nivel mundial. En América del Sur, Halla et al. (2021) y Vivero et al. (2021) han investigado estos procesos en Argentina y Chile, respectivamente. En Europa, Kaufmann et al. (2018) y Bearzot et al. (2022) han realizado estudios similares en los Alpes austriacos e italianos.

Por su parte, Śledź et al. (2021) ofrecen una revisión exhaustiva de las diversas aplicaciones de los UAV en geomorfología glacial y periglacial desde el año 2010, donde destacan realización de inventarios, mapas geomorfológicos, cuantificación de velocidades y combinación de métodos para lograr análisis en escalas temporales y espaciales más extensas. De acuerdo con lo anterior, el uso de UAV es un aporte valioso para la comprensión de la dinámica y evolución de los glaciares rocosos con un rol clave en el enfoque geomorfológico.

A partir de la interpretación geomorfológica, es posible analizar el desarrollo y estado actual de las estructuras que componen un glaciar rocoso, tales como márgenes compuestos por taludes frontales y laterales; su morfología superficial, caracterizada por crestas y surcos, y en algunos casos, lagunas supraglaciares (Ferrando, 2017), entre otros (Figura 1). Además, es posible obtener información acerca de las características de la cobertura superficial, las áreas de aporte de detritos y analizar el estado de la morfología de lóbulos o lengüas; ya sean cóncavos, indicando deflación, o convexos, infiriendo condiciones favorables en su desarrollo co-

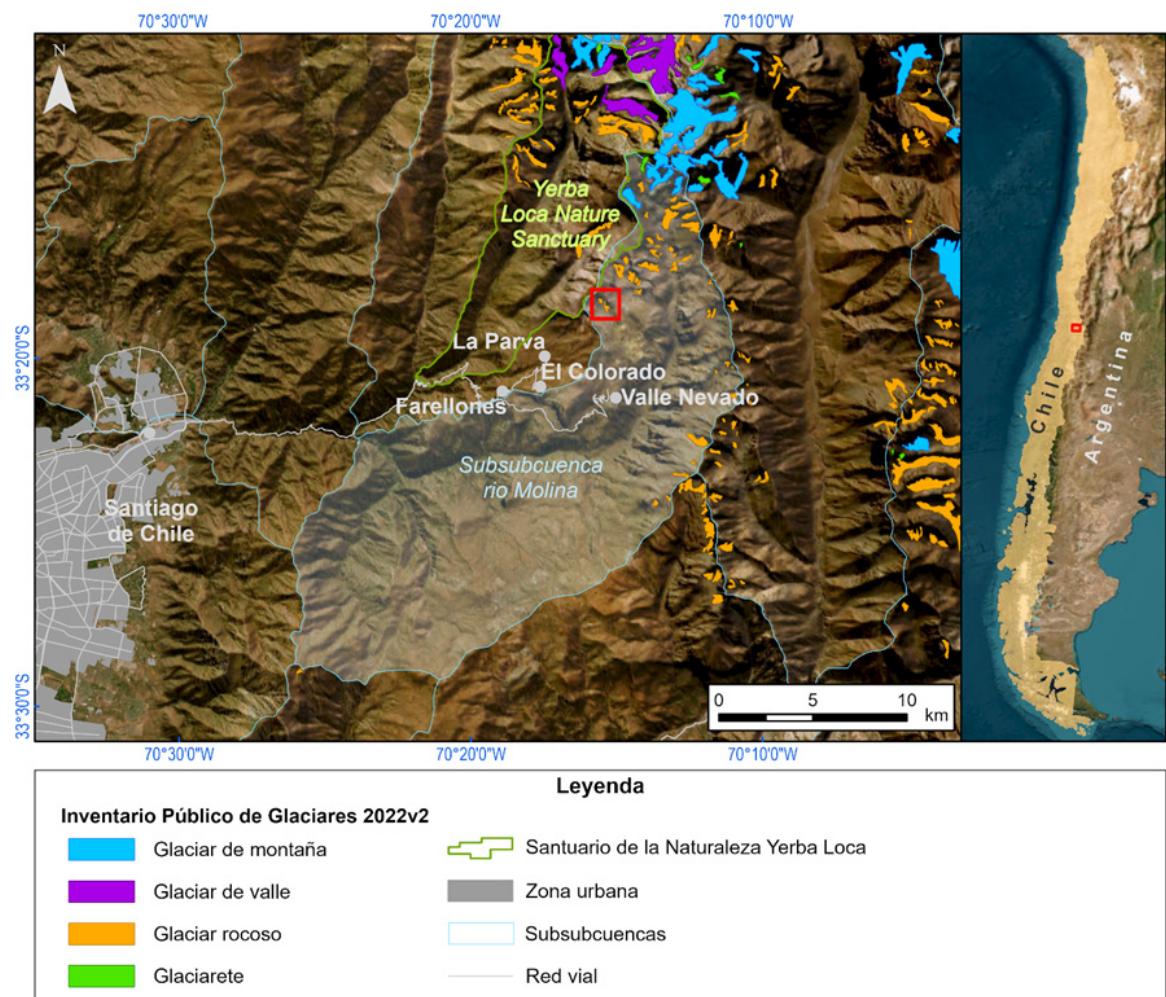


Figura 1: Área de estudio: Glaciar de roca Ballica (CL105720001). Fuente: Elaboración propia (2024).

mo la presencia de hielo en su interior (Jones, et al. 2018; Gardeweg & Delcorto, 2015; Whalley, 2021a; Janke, J. R., & Bolch, T. 2021).

El presente trabajo se enfoca en un análisis geomorfológico de alta resolución del glaciar rocoso Ballica, identificado por la Dirección General de Aguas (DGA) en su Inventario Público de Glaciares 2022 (IPG2022_v2) con el código CL105720001 (DGA, 2022). Este se localiza en la zona alta de la cuenca del río Maipo, específicamente en la subcuenca Río Molina, cerca del límite con el Santuario de la Naturaleza Yerba Loca, a

27 km de la capital de Santiago de Chile. En las cercanías de este glaciar rocoso se encuentran múltiples centros de ski junto con la ruta de ascenso a cumbres como el cerro Pintor de 4.180 m s.n.m y cerro El Plomo de 5.424 m s.n.m.

De acuerdo con el IPG2022_v2, el glaciar Ballica corresponde a un solo cuerpo, inventariado a partir de una imagen Geo Eye-1 (GE1) del año 2019, con una resolución de 0,46 m. En este inventario se indica una altitud máxima de 3740 m s.n.m. y una altitud mínima de 3.466 m s.n.m., con una orientación sur, abarcando una superficie de 7,5 ha.

Tabla 1: Detalle del levantamiento fotogramétrico con UAV.

Características	Parámetros
Modelo de drone	DJI Mavic 2 Pro
Software de planificación de vuelo	Pix4D Capture Pro
Altura de Vuelo	130 m
Tipo de Referenciación	Indirecto
Puntos de Control Terrestre (GCP)	6
Sistema GNSS	Receptor GNSS Emlid RS2 con precisión nominal con estación base
Método de determinación de coordenadas	RTK para GCP; PP con herramientas magnéticas para estación base.
Resolución del ortomosaico	0,05 m
Superficie cubierta	18,64 hectáreas
Error nominal	0.05-0.10 metros

Fuente: Elaboración propia.

Con respecto al contexto geológico de la zona de estudio, este glaciar rocoso se ubica en las formaciones Cerro Las Tórtolas y Farellones, siendo su principal característica la presencia de lavas, brechas, domos y rocas piroclásticas andesítico-basálticas a dacíticas (Sernageomin , 2002).

MÉTODO

Caracterización del caso de estudio

El estudio del glaciar Ballica se basó en una combinación de análisis de gabinete y visitas a terreno. El mapeo en gabinete se llevó a cabo utilizando insumos de alta resolución: un ortomosaico de 0,05 m de resolución espacial obtenido mediante UAV en la visita a terreno realizada en diciembre de 2023. La proyección y el datum utilizado son UTM 19S y WGS84 respectivamente.

Las visitas a terreno se llevaron a cabo en los meses de diciembre de 2023 y enero de

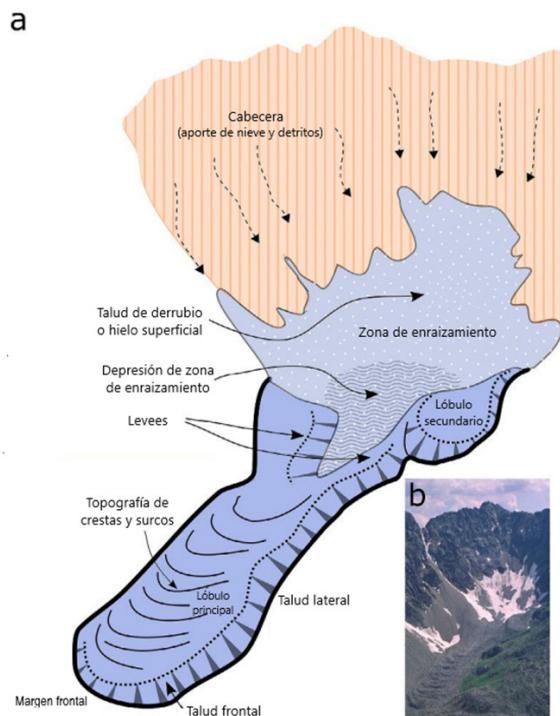


Figura 2: (a) Principales componentes morfológicos de un glaciar de roca típico. (b) fotografía de campo.
Fuente: Modificado en base a Brardinoni et al. (2019).

Tabla 2: Insumos utilizados en el análisis geomorfológico del glaciar de roca Ballicas.

Geoprocreso	Parámetros	Aplicación
Hillshade	Azimuth : 315 / 270 Altitud : 45	Captar diferencias topográficas
Slope	Método: Tradicional/Multidireccional Medida de salida: Grado Método: Planar	Diferenciar cambios de inclinación en el terreno, definir rangos de pendiente en taludes frontales y laterales, e identificar los surcos y crestas
Kernel Density	Tamaño: centímetros cuadrados	Visualizar la concentración espacial de los rangos de pendientes
Flow direction	Tipo de dirección de flujo: D8 método de grilla (Jenson and Domingue (1988))	Identificar las zonas que contribuyen con detritos al glaciar rocoso, según el sentido del flujo de cada píxel, así como analizar la dinámica de este flujo dentro y fuera del glaciar
Contour	Intervalo: 0,5 m /1 m	Visualizar la continuidad de las altitudes y las características del relieve.

Fuente: Elaboración propia.

2024. En la primera campaña de terreno se realizó el levantamiento fotogramétrico UAV., utilizando un dron modelo DJI Mavic 2 Pro. En la Tabla 1 se resumen los detalles del levantamiento fotogramétrico con UAV.

En base al ortomosaico obtenido, se generó un modelo digital de terreno (MDT) de 0,06 m de resolución. Posteriormente, se generaron insumos a partir del MDT en el software ArcGIS Pro v3.3 para obtener: mapas de sombreado de relieve, mapas de pendiente, mapa de dirección de flujo, mapa de kernel density y curvas de nivel (Tabla 2).

La información obtenida fue contrastada con las observaciones de campo realizadas durante la segunda visita al glaciar, lo que permitió una verificación *in situ* de los resultados del mapeo remoto en base al levantamiento UAV. Estos productos proporcionan una representación precisa de la morfología del glaciar, esencial para su análisis y seguimiento.

Posteriormente, se actualizaron los contornos del glaciar rocoso en base a los datos presentados en el Inventario Público de Glaciares 2022 (IPG2022_v2), corroborando las estructuras geomorfológicas mapeadas en gabinete usando como base los criterios de mapeo geomorfológicos en glaciares rocosos (Tabla 3).

El mapeo de los taludes frontales y laterales se basó en el slope, que ha sido clasificado según los valores de pendiente obtenidos en la bibliografía consultada (Tabla 3). Según estos trabajos, el rango de pendientes más amplio para los taludes es de entre 28° - 54° (Kofler et al., 2021). Dentro del rango mencionado, se aplican los rangos definidos según las pendientes de 30°, 33°, 35°, 37°, 41° y 45°, los cuales están definidos según Capps, 1910; Barsch, 1996; Ikeda and Matsuoka, 2002; Gardeweg & Delcorto, 2015 y Knight, 2019 respectivamente. Posteriormente, se aplicó la herramienta kernel density para

Tabla 3: Criterios de mapeo geomorfológico para la identificación de características superficiales de glaciares rocosos.

Geoforma o Estructura	Descripción	Referencia
Glaciar rocoso	Masa de fragmentos o bloques de rocas y material fino, con forma lobula, que yace en una pendiente y contiene hielo intersticial y/o hielo macizo. Posee en su superficie una cobertura completa o, en el caso de presentar lagunas supraglaciares, casi completa de detritos. Sus características visibles están asociadas a la expresión geomorfológica de su dinámica: un marcadot talud que se desarrolla en los márgenes frontal y laterales; sus características superficiales en forma de ondulaciones llamadas crestas y surcos, que se generan debido al flujo del glaciar presente o pasado.	Marangunic, (2023); DGA (2022); Cogley et al, (2011)
Talud frontal y lateral	Un talud es distinguible en la zona terminal de los glaciares rocosos, donde el material detrítico se dispone en una inclinación con un cambio de pendiente que varía entre 28° y 54° (Kofler et al 2021). En los Himalayas, Knight 2019 destaca dos glaciares rocosos donde la pendiente frontal varía entre >30 a 45° indicando actividad y contenido de material congelado. Según Ikeda and Matsuoka (2002) "El ángulo frontal varía de 35° a 44° (promedio de 41°) en los glaciares rocosos aparentemente activos, de 26° a 42° (promedio de 37°) en los glaciares rocosos aparentemente inactivos y de 26° a 40° (promedio de 33°) en los glaciares rocosos aparentemente relictos. Otros autores como Capps (1910), Barsch (1996), Gardeweg & Delcorte (2015) indican que los taludes poseen una pendiente >35°, lo cual es un ángulo mayor al de reposo de los materiales no cohesionados por congelamiento. En este sentido, Whalley, B. (2021) indica que la cohesión del material depende de la presencia de sedimentos finos, humedad, congelamiento a causa de la presencia de hielo. En cuanto al material, este suele mostrar un color más claro de los clastos. En el caso que el talud frontal se encuentra con un acantilado, se genera un talud extendido, el cual, posee una porción mayoritaria del material no consolidado afectado por acción de la gravedad. Los márgenes laterales de un glaciar rocoso suelen estar compuestos por taludes laterales, que son la continuación distingible del frente, por lo que su borde también suele ser afilado y el perfil se desarrolla como un depósito de escombros exagerado, debido a su mayor pendiente en relación al detrito circundante.	Capps (1910); Barsch, (1996); Ikeda & Matsuoka, (2002); Giardino & Regmi, (2014); Knight et al., (2019); Kofler (2021); Whalley, (2021)
Crestas y surcos	Se identifican en la superficie de un glaciar patrón "arrugado" (Capps 1910), siendo expresiones visuales de las deformaciones internas del hielo, alineadas a la dirección de flujo. Son más comunes en la parte inferior de los lóbulos. Segun Wahrhaftig y Cox (1959), Giardino et al., 1987 y Pandey, 2019, los glaciares rocosos poseen una morfología de microrelieve con crestas paralelas y surcos en forma de V, lo que sugiere un flujo lento y viscoso, donde estas características pueden ser longitudinales (paralelas al flujo) o transversales (perpendiculares y hacia abajo del valle). Las crestas son elevaciones topográficas y los surcos depresiones curvilíneas. En cuanto a su formación, Frehner et al., (2015) concluye que el plegamiento activo o doblamiento impulsado por la gravedad es el proceso dominante y otros factores pueden influir en este proceso sólo en segundo orden (por ejemplo, fricción grano a grano, flujo de agua, variaciones de temperatura).	Capps (1910); Wahrhaftig y Cox (1959); Giardino et al., (1987); Frehner et al., (2015); Pandey, (2019)

Fuente: Elaboración propia.

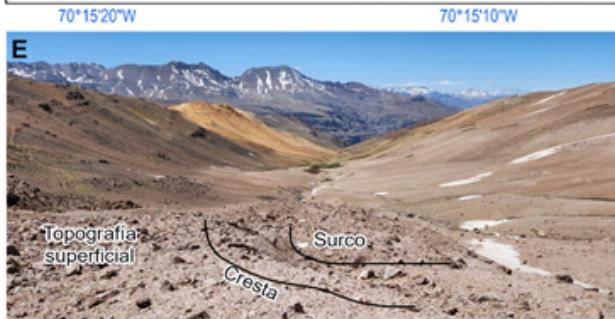
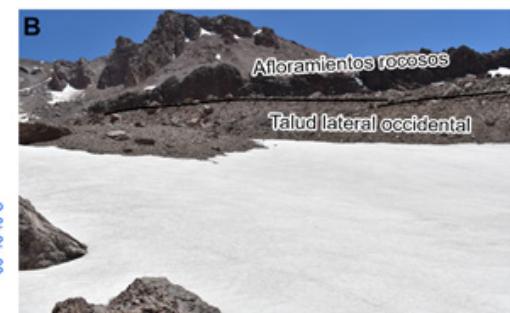
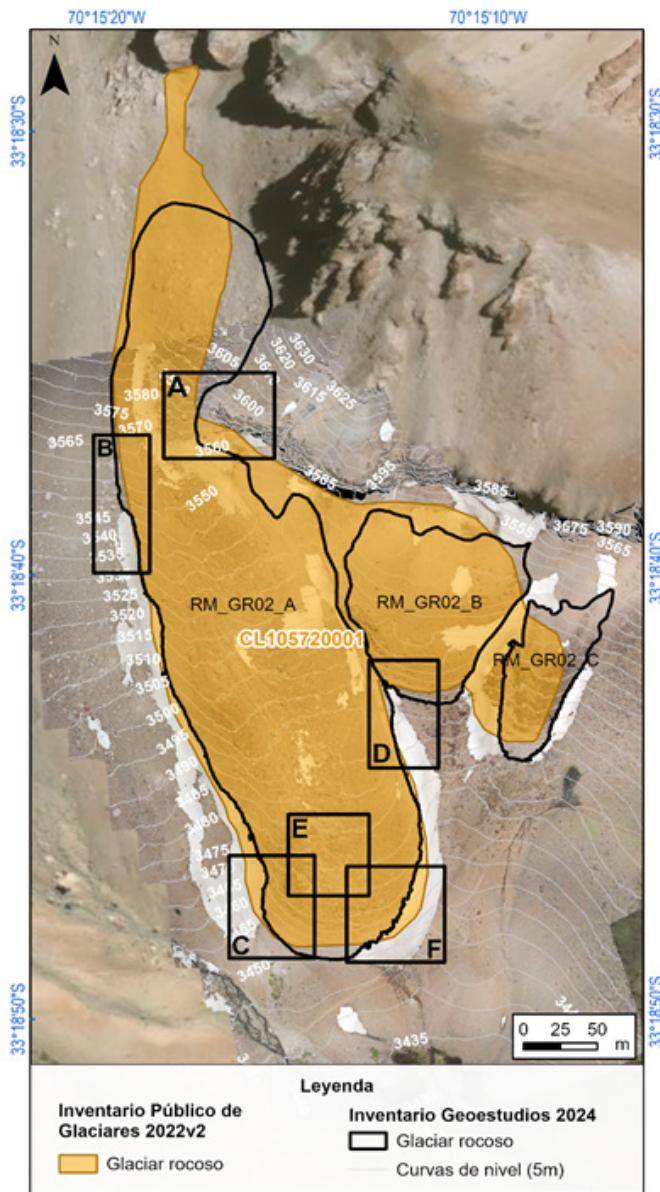


Figura 3: Comparación de contornos IPG 2022_v2 y Geoestudios 2024. Estructuras geomorfológicas identificadas en terreno. Fuente: Elaboración propia.

analizar la distribución y concentración espacial de las pendientes, identificando variaciones locales.

Lo anterior, con el fin de determinar las características específicas de los márgenes frontal y laterales del glaciar Ballicas.

El proceso de mapeo de las crestas y surcos se centró, en el caso de las primeras, en la identificación de los lineamientos que marcan la topografía elevada continua; y en de los segundos, en la línea de los puntos más bajos de la depresión topográfica. En esta etapa se realizó el mapeo en base a las herramientas slope, direction flow y curvas de nivel.

Por último, se realizó el mapeo geomorfológico de los glaciares rocosos atendiendo todas las características antes mencionadas incluyendo la diferenciación de parches de nieve y taludes de detritos que rodean el glaciar. Así como también, el análisis de este mapeo en base a perfiles de elevación de alta resolución.

RESULTADOS

Actualización de contorno

El mapeo geomorfológico reveló que la crioforma inicialmente identificada como CL105720001 según el IPG2022_v2, corresponde en realidad a un complejo de tres crioformas independientes RM_GR02A o glaciar Ballicas, RM_GR02B y RM_GR02C. Estos cuerpos se encuentran alineados en sentido oeste-este, emplazados bajo una misma serie de afloramientos rocosos. El cuerpo principal, RM_GR02A (correspondiente al glaciar Ballicas este trabajo), abarca una superficie de 5,0 hectáreas, con una orientación predominante al sur y una elevación media de 3.519 m

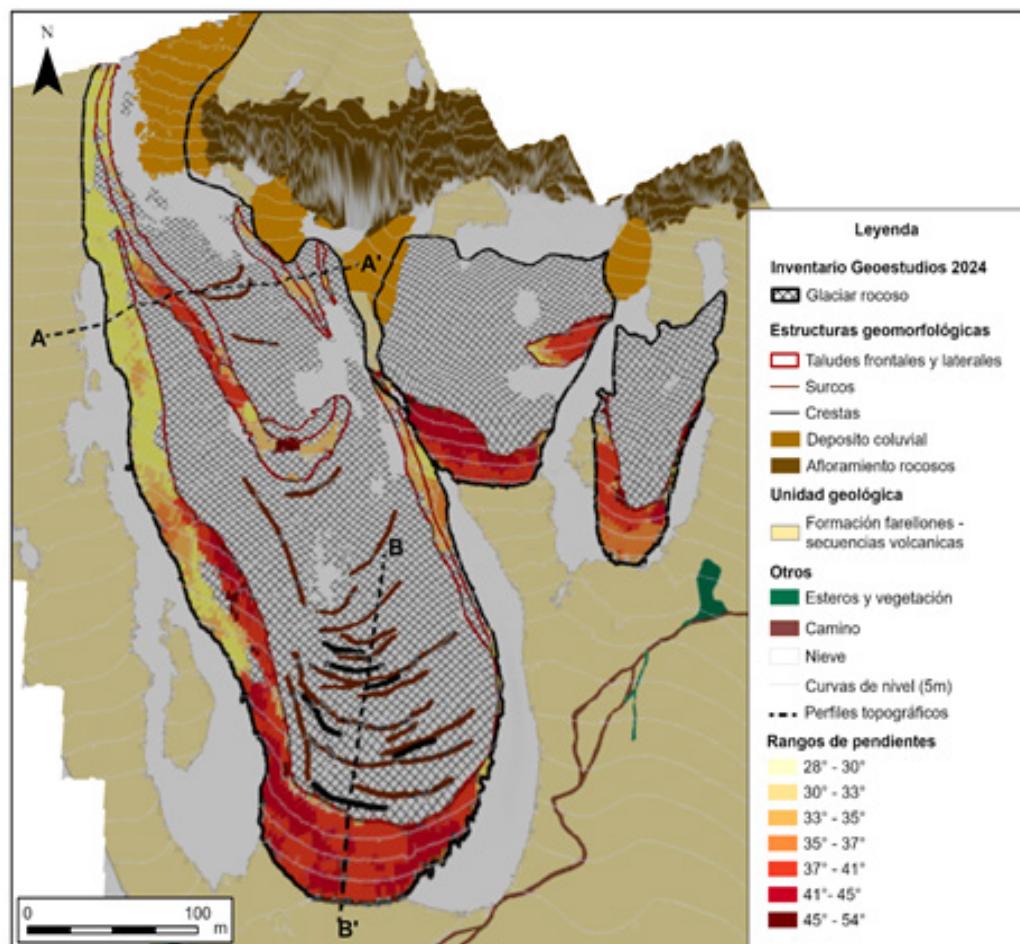
s.n.m. con un rango altitudinal desde los 3.457 a 3.615 m s.n.m.

Estructuras Geomorfológicas

En la porción superior del conjunto de las tres crioformas identificadas, entre los 3,600 y 3,640 metros de altitud, se encuentra constreñido por farellones rocosos y canaletas que se abren hacia el norte. Estos sectores de alta pendiente son propensos a la acumulación de nieve y a la formación de avalanchas, siendo considerado como una zona de aporte de detritos y nieve hacia el complejo de geoformas.

En el caso de Ballicas, en primer lugar se identifica un talud frontal prominente, en el cual se observan pendientes de entre 37° y 45°. Según indicadores geomorfológicos (Gardeweg & Delcorto, 2015., y Janke, J. R., & Bolch, T., 2021), estos materiales poseen una pendiente superior al ángulo de reposo, de lo que se infiere una mayor cohesión entre los detritos que lo componen (Whalley, B. 2021), lo cual se considera característico de un glaciar rocoso activo. Tanto en el talud lateral occidental superior como en el talud lateral oriental, se observan rangos de pendientes similares, indicando la presencia de características asociadas a glaciares rocosos inactivos y relictos. En ambas zonas de la parte alta del glaciar rocoso, predominan pendientes de 28° a 30°, con sectores localizados que alcanzan los 30° a 35°.

En segundo lugar, el glaciar Ballicas presenta, en su zona superior y sobre su superficie, evidencias de taludes laterales, siendo el talud occidental el que posee concentraciones de pendientes entre los rangos 35° y 41°. Asimismo la zona frontal, con excepción de la presencia localizada



Perfiles topográficos

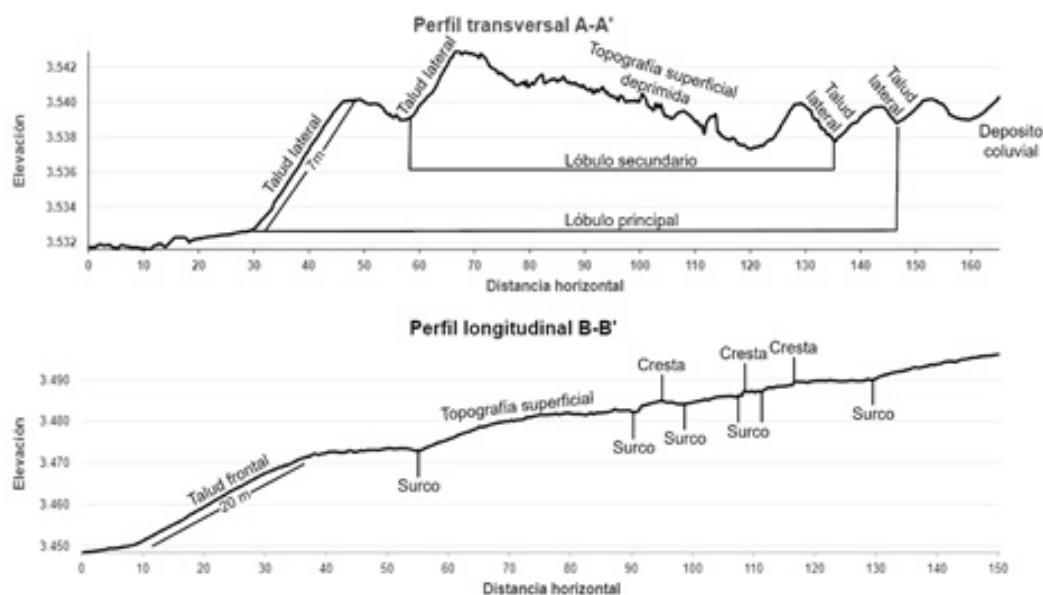


Figura 4: Cartografía geomorfológica y perfiles topográficos del glaciar rocoso Ballica.
Fuente: Elaboración propia.

de pendientes entre 45° a 54°, junto con el talud lateral oriental, presenta pendientes entre 30° y 33°. Esta zona, es considerada como lóbulo secundario superpuesto al principal siendo un pulso más reciente, entre 3.505 y 3.565 m s.n.m., muestra evidencia de alta erosión en sus taludes. Estos taludes permiten inferir la extensión de su avance y su baja actividad en el presente (Ver perfiles topográficos).

En su superficie, tanto el glaciar Ballicas como RM_GR02B y RM_GR02C, presentan una cobertura completa de detritos, sin afloramientos de hielo visibles. Estos detritos están formados principalmente por bloques angulosos de rocas volcánicas de la Formación Farellones, con tamaños que varían desde centímetros hasta metros. Además, solamente en el glaciar Ballicas, se identifican crestas y surcos transversales a la dirección del flujo de la geoforma, característico de la dinámica de glaciares rocosos. Presenta además, su estructura deprimida dentro de sus márgenes, evidenciando deflación en el centro del cuerpo, siendo el hundimiento en la zona contenida por los márgenes, tanto laterales como frontales.

DISCUSIÓN

Para realizar un estudio más exhaustivo, es recomendable emplear insumos con resoluciones centimétricas y georreferenciación precisa como las utilizadas en este trabajo. Esto permitría una representación más fiel del terreno, particularmente cuando el mapeo se realiza en gabinete.

Dependiendo de los objetivos de la investigación y los recursos disponibles, se recomienda no asumir a priori el estado

de taludes o lóbulo de glaciar rocoso, e interpretar directamente la presencia de hielo asignando característica de activo, inactivo o relicto basándose exclusivamente en insumos de resolución limitada.

En el caso de las estructuras geomorfológicas, estas requieren análisis, mapeo y una actualización constante de sus parámetros así como de sus metodologías de análisis. En este caso, la geomorfología altamente deprimida en el lóbulo secundario y de casi la totalidad de taludes laterales del glaciar Ballicas, plantea interrogantes sobre la cantidad de hielo presente en su interior. Para abordar esta cuestión, se sugiere complementar este estudio geomorfológico con metodologías geofísicas y geológicas adicionales, como tomografía de resistividad eléctrica (ERT), tomografía de refracción sísmica o incluso sondajes para determinar el estado del contenido de hielo. Su estudio complementario podría ofrecer indicadores tempranos de la pérdida de hielo en otros glaciares rocosos de la zona.

Los productos UAV con resolución centimétrica son fundamentales para la caracterización geomorfológica de los glaciares rocosos, ya que permiten realizar un análisis detallado, el cual, en este caso, ha revelado una mayor complejidad en la zona de estudio, evidenciando que lo que inicialmente se consideraba por la DGA un único glaciar rocoso, es en realidad un conjunto de tres criofomas independientes.

En este sentido, si bien las tres criofomas se encuentran alineadas en la misma serie de afloramientos rocosos, sus características individuales indican que han experimentado diferentes etapas de desarrollo y actividad. Es probable que la crioforma principal, Ballicas, haya sido más antigua y/o activa

en el pasado, dada su mayor superficie y extensión en el valle.

Por otro lado, las estructuras geomorfológicas correspondientes a los taludes frontales y laterales en el glaciar Ballica, así como dos pulsos de avance, identificados como lóbulos bien definidos, revelan en su estado actual, una clara degradación de la geoforma.

CONCLUSIONES

Este análisis fue posible por el estudio de las concentraciones de rangos de pendientes, metodología que permite una mejor comprensión de la dinámica de estas crioformas y facilita el análisis individual de las estructuras geomorfológicas en detalle. Esta información puede ser utilizada como input para modelar la respuesta de estos cuerpos y sus taludes.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Barsch, D. (1996). Rockglaciers: Indicators for the present and former geoecology in high mountain environments, (1st ed.). Springer Series in Physical Environment. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-80093-1>
- Bearzot, F., Garzonio, R., Di Mauro, B., Colombo, R., Cremonese, E., Crosta, G., Delaloye, R., Hauck, C., Di Cella, U., Pogliotti, P., Frattini, P., Rossini, M. (2022). Kinematics of an Alpine rock glacier from multi-temporal UAV surveys and GNSS data, *Geomorphology*, Volume 402, 2022, 108116, ISSN 0169-555X. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2022.108116>.
- Brardinoni, F., Scotti, R., Sailer, R., & Mair, V. (2019). Evaluating sources of uncertainty and variability in rock glacier inventories. *Earth Surface Processes and Landforms*. doi:10.1002/esp.4674
- Capps, S. R., Jr. (1910). Rock glaciers in Alaska. *Journal of Geology*, 18, 359–375. <https://www.jstor.org/stable/30079347?seq=1>
- Cogley, J.G., R. Hock, L.A. Rasmussen, A.A. Arendt, A. Bauder, R.J. Braithwaite, P. Jansson, G. Kaser, M. Möller, L. Nicholson & M. Zemp. (2011). Glossary of Glacier Mass Balance and Related Terms, IHP-VII Technical Documents in Hydrology No. 86, IACS Contribution No. 2, UNESCO-IHP, Paris. https://wgms.ch/downloads/Cogley_et.al_2011.pdf
- Dirección General de Aguas DGA. (2022). METODOLOGÍA DEL INVENTARIO PÚBLICO DE GLACIARES, SDT N°447, 2022. Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas.
- Frehner, M., Ling, A. H. M., & Gärtner-Roer, I. (2014). Furrow-and-ridge morphology on rockglaciers explained by gravity-driven buckle folding: A case study from the Murtèl Rockglacier (Switzerland). *Permafrost and Periglacial Processes*, 26(1), 57–66. <https://doi.org/10.1002/ppp.1831>
- Giardino, R., Regmi, N., & Vitek, J. (2014). Rock glacier. En Encyclopedia of ice, snow, and glaciers, 943–948. https://doi.org/10.1007/978-90-481-2642-2_453
- Halla, C., Blöthe, J. H., Tapia Baldis, C., Trombotto Liaudat, D., Hilbich, C., Hauck, C., & Schrott, L.: Ice content and interannual water storage changes of an active rock glacier in the dry Andes of Argentina. *The Cryosphere*, 15, 1187–1213. <https://doi.org/10.5194/tc-15-1187-2021>
- Ikeda, A., & Matsuoka, N. (2002). Degradation of talus-derived rock glaciers in the Upper Engadin, Swiss Alps. *Permafrost and Periglacial Processes*, 13(2), 145–161. <https://doi.org/10.1002/ppp.413>
- Janke, J. R., & Bolch, T. (2021). Rock glaciers. En Reference module in Earth systems and environmental sciences (2nd ed., Vol. 4). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818234-5.00187-5>
- Jones, D. B., Harrison, S., & Anderson, K. (2018). Mountain rock glaciers contain globally significant water stores. *Scientific Reports*, 8, 2834. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-21244-w>
- Kaufmann, V., Seier, G., Sulzer, W., Wecht, M., Liu, Q., Lauk, G., and Maurer, M (2018). ROCK GLACIER MONITORING USING AERIAL PHOTOGRAPHS: CONVENTIONAL VS. UAV-BASED MAPPING – A COMPARATIVE STUDY, Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci., XLII-1, 239–246, <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-1-239-2018>.
- Knight, J., Harrison, S., & Jones, D. B. (2019). Rock glaciers and the geomorphological evolution of deglacierizing mountains. *Geomorphology*, 324, 14–24. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2018.09.020>
- Kofler, C., Mair, V., Gruber, S., Todisco, M. C., Nettleton, I., Steger, S., ... & Comiti, F. (2021). When do rock glacier fronts fail? Insights from two case studies in South Tyrol (Italian Alps). *Earth Surface Processes and Landforms*, 46(7), 1311–1327.
- Marangunic, C. (2023). Glaciares cubiertos, de rocas, transicionales, inactivos y relictos. [Presentación en XVI Congreso Geológico de Chile].

- Pandey, P. (2019). Inventory of rock glaciers in Himachal Himalaya, India using high-resolution Google Earth imagery. *Geomorphology*, 340, 103-115. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2019.05.001>
- Servicio Nacional de Geología y Minería. (2002). Mapa Geológico de Chile [en línea]. Santiago. Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica nº075.
- Śledź, S., Ewertowski, M. W., & Piekarczyk, J. (2021). Applications of unmanned aerial vehicle (UAV) surveys and Structure from Motion photogrammetry in glacial and periglacial geomorphology. *Geomorphology*, 378. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2021.107620>
- Vivero, S., & Lambiel, C. (2024). Annual surface elevation changes of rock glaciers and their geomorphological significance: Examples from the Swiss Alps. *Geomorphology*, 467. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2024.109487>.
- Vivero, S., Bodin, X., Fariñas-Barahona, D., MacDonell, S., Schaffer, N., Robson B. A., & Lambiel C. (2021). Combination of Aerial, Satellite, and UAV Photogrammetry for Quantifying Rock Glacier Kinematics in the Dry Andes of Chile (30° S) Since the 1950s. *Frontiers in Remote Sensing*, 2. <https://doi.org/10.3389/frsen.2021.784015>
- Wahrhaftig, C., & Cox, A. (1959). Rock glaciers in the Alaska Range. *Geological Society of America Bulletin*, 70, 383–436. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1959\)70\[383:RGITAR\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1959)70[383:RGITAR]2.0.CO;2)
- Whalley, W. B. (2021). The glacier–rock glacier mountain landsystem: An example from North Iceland. *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography*, 103(4), 346–367. <https://doi.org/10.1080/04353676.2021.1986304>