

Procesos gravitacionales en la alta cordillera del valle del Elqui y sus efectos sobre la ruta CH 41 del Paso Internacional Agua Negra

Alejandro Alfaro, Cristina Brantt, Natalia Garrido & Jorge Parra

Departamento de Geología Aplicada y Recursos Geológicos, Servicio Nacional de Geología y Minería, Chile, alejandro.alfaro@sernageomin.cl

ABSTRACT: La Laguna River basin, in the Elqui Valley mountain range, is very susceptible to being affected by gravitational process and generating potential effects on public infrastructure and road connection between the Coquimbo region in Chile and the province of San Juan in Argentina. In Chilean territory, the route 41 Ch has a length of 71 km approx. from customs to the international border, covering a topographic unevenness from 2.075 m a.s.l. up to 4.761 m a.s.l. This crossing along the Semiarid Andes Range implies that the route is exposed to many problems that depend on the geological-geomorphological environment through which it crosses. This article focuses on describing and classifying the different conditions and types of mass movements, as well as their influence that affect this international route along the cross-section of the Andean Cordillera. The first section of route, close to the initial 30 km, is characterized by a mostly fluvial-alluvial environment dominated by terraces and V-shaped valleys. In this segment, the route projects at the foot of steep slopes, on thick fluvial terraces and crossing several active streams. An intermediate transition section is limited mostly to the La Laguna Reservoir area and the fluvial plain upstream along 17 km approx. In this zone a narrow valley with some wide sectors remains, however the first indications of paraglacial processes and large volumes of glacial, fluvio-glacial and landslide deposits begin to appear on the bottom of the valley and the top of slopes. Finally, the last 24 km, starts close to 3.500 m a.s.l., a high mountain dry periglacial domain begins with the presence of glacial and periglacial geomorphologies. In this section, the route is located on the glaciofluvial plain and around slopes of a wide U-shaped valley. Gravitational process like rockfalls and landslides predominate, as well as problems associated with the degradation of the cryosphere (permafrost, glacial and nonglacial deposits and outcrops of rock).

KEYWORDS: remociones en masa, aluviones, peligros geológicos, valle del Elqui.

1 INTRODUCCIÓN

Debido a una creciente expansión urbana, las necesidades de conexión interurbana e internacional, así como las condiciones climáticas en constante evolución, el estudio de los peligros geológicos cobra relevancia no sólo para los científicos sino también para la ciudadanía en general.

Dentro de ese constante dinamismo socio-natural, el presente trabajo se enfoca en el análisis de los procesos de remoción en masa en ambientes de alta montaña, a fin de comprender la relación de estos con el desarrollo e impacto sobre la infraestructura vial, particularmente la ruta 41 Ch, que conecta la provincia de San Juan en Argentina, con la región de Coquimbo en Chile.

El tramo de infraestructura vial considerada se emplaza en la provincia del Elqui, y abarca el segmento entre la oficina de Aduana Chilena (Complejo Fronterizo Agua Negra), ubicada en el sector Juntas del Toro de la comuna de Vicuña, hasta el límite fronterizo con Argentina (Paso Internacional Agua Negra) (Figura 1).

El área de estudio corresponde al área de influencia de la cuenca del río La Laguna, que abarca parte de la cordillera de Los Andes en la zona central de Chile, en el segmento superior del valle del río Elqui. Este sector se caracteriza por un entorno geomorfológico del tipo cordillera andina con retención crionival, con rocas principalmente volcánicas e intrusivas y rasgos estructurales regionales de deformación cortical, particularmente la presencia de fallas y pliegues de orientación general N-S.

Así, entre los factores que influyen en la generación de los procesos de remoción en masa del sector, destacan las

características exógenas como el modelado fluvial y glacial, la degradación de la criósfera y los agentes climáticos. En cuanto a los procesos endógenos, la mayor influencia está controlada por la geología asociada al tipo de litología y la disposición estratigráfica y estructural de estas unidades, además de la geotécnica en cuanto a las propiedades mecánicas del macizo, especialmente cuando este se encuentra alterado y/o fracturado.

El presente estudio corresponde a una síntesis de los avances desarrollados en el trabajo de Sernageomin cuyo enfoque se centra en el análisis geomorfológico y susceptibilidad de remociones en masa en el área de influencia de la ruta 41 Ch. Para este estudio se han adaptado las clasificaciones de unidades y rasgos geomorfológicos definidos por Trombotto (2014), así como una agrupación y simplificación de los tipos de remociones en masa de acuerdo con la clasificación de Hungr *et al.* (2014).

1.1 Marco geológico

La geología del área, descrita a escala regional por Mpodozis y Cornejo (1988) y actualizada por Velásquez *et al.* (2021) y Murillo *et al.* (2017) comprende rocas intrusivas, volcánicas, sedimentarias y metamórficas entre el Ordovícico y el Mioceno Superior (Figura 2).

Específicamente en el área del río La Laguna, las unidades geológicas más antiguas se depositaron hacia el Pérmico Medio y hasta el Triásico Medio, las que corresponden a abundantes rocas piroclásticas y volcánicas agrupadas en las formaciones Laguna Chica (Pelc), El Tapado (Pet(a)) y Guanaco Sonso (Trgs), limitadas entre sí por discordancias estratigráficas de carácter regional.

Estratos de areniscas y limolitas intercalados en la Formación El Tapado (Pet(b)) evidencian una depositación clástica en ambiente lacustre, sincrónica con el desarrollo de este amplio volcanismo.

Entre las unidades intrusivas destacan los Granitos del Pérmico Medio-Triásico Inferior (PeTrg), El Complejo Plutónico Los piqueños (Trmp), los Sienogranitos Colorado (Trssc) y los Gabros de La Laguna (Trsgl).

MAPA DE UBICACIÓN

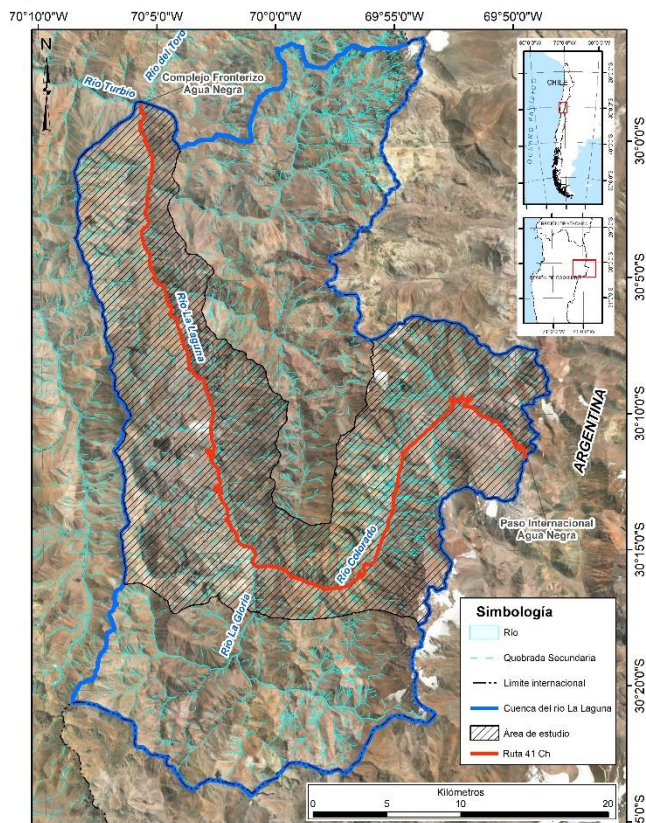
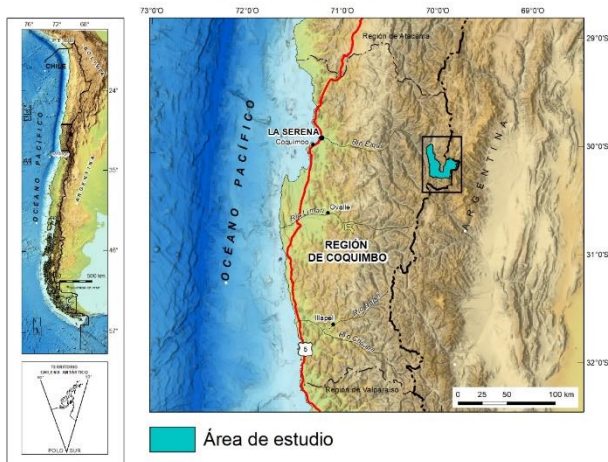


Figura 1. Ubicación del área de estudio en la cordillera del valle del Elqui, específicamente en la cuenca del río La Laguna, región de Coquimbo.

Posteriormente, y en mayor medida a comienzos del Mioceno, un intenso período de volcanismo habría acumulado, en discordancia angular sobre las rocas volcánicas pérmicas y las secuencias volcando sedimentarios de los Estratos La Paloma (EOlp), grandes volúmenes de ignimbritas, brechas piroclásticas, aglomerados y lavas, agrupadas bajo el nombre de Formación Doña Ana (OMda). Luego, a partir del Mioceno Medio se depositaron, en discordancia, las formaciones Cerro de las Tórtolas (Mct) y Tambo (Mt) las que corresponden a los últimos productos volcánicos antes de la horizontalización de la placa oceánica y consecuente migración del eje volcánico hacia el este, a la región pampeana en Argentina.

Los afloramientos de las formaciones Tambo (Mt) y Doña Ana (OMda), que se ubican hacia el límite fronterizo con Argentina, corresponden a las principales rocas hospedantes de la mineralización de Au y Ag del prospecto Alturas, ubicado en el extremo meridional, en territorio chileno, de la franja metalogénica de Au-Ag-Cu El Indio-Pascua (Velásquez *et al.*, 2021). Finalmente, cubriendo las rocas anteriormente mencionadas, se observan depósitos fluviales en los cauces y aluviales, coluvial y de remoción en masa, asociados a las laderas y algunos tramos en el fondo del valle, además de sedimentos de origen glacial y periglacial dado el contexto de alta montaña y un ambiente sujeto a varios episodios con presencia de masas de hielo.

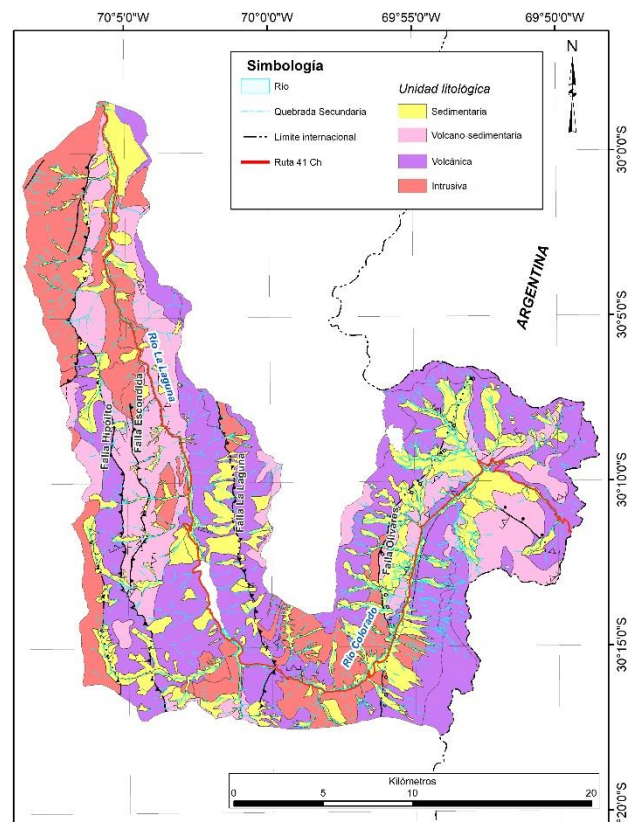


Figura 2. Geología del área de estudio, escala 1:100.000. Modificado y simplificado de Velásquez *et al.* (2021) y Murillo *et al.* (2017).

En cuanto a la geología estructural, los rasgos mayores se definen por un conjunto de fallas de orientación cercana a NS, las

cuales, según los trabajos de Mpodozis y Cornejo (1988) corresponden a fallas inversas, que ponen en contacto rocas de basamento con secuencias volcánicas miocenas, lo cual acortaría la edad de la deformación a este período de tiempo. En el valle del río La Laguna, destacan tres estructuras de primer orden que tienen aparente influencia en la morfología y disposición del valle. Estas estructuras, de oeste a este, corresponden al sistema de fallas Escondida e Hipólito, Falla La Laguna y Falla Olivares (Figura 2). Los dos primeros sistemas se observan en las sierras y laderas que delimitan la dirección del río en el tramo donde este se orienta mayormente al noroeste-sureste. Por otro lado, la Falla Olivares mantiene un control estructural en la parte alta del valle, cuya orientación es aproximadamente noreste-suroeste, generando además un pliegue anticlinal (Figura 2).

1.2 Marco geomorfológico y climático

El área de estudio comprende el segmento la cuenca del río La Laguna, que a su vez constituye las nacientes de la cuenca hidrográfica del río Elqui en la región de Coquimbo. El tramo superior de esta cuenca se asocia a la subcuenca del río Colorado cuyas aguas provienen desde el Glaciar El Tapado (cerro homónimo a 5.536 m s.n.m.) el cual corresponde al cuerpo de hielo más significativo de la región. Desde la perspectiva climática, se reconoce un dominio periglacial seco de alta montaña con cumbres que sobrepasan los 6.000 m s.n.m. Además, se reconoce la presencia de geomorfologías glaciales y periglaciales que se manifiestan en distintas formas y sistemas (UGP UC, 2010).

De acuerdo con Alfaro *et al.* (2018b), la geomorfología regional asociada a la cuenca alta del río Elqui se enmarca principalmente en la macrounidad de la cordillera de Los Andes, interceptada por los valles Transversales. Sus límites se encuentran relativamente bien demarcados manteniendo especial coherencia con los sistemas de fallas regionales en dirección N-S.

Según Sarricolea *et al.* (2016), a escala regional, el clima de la cuenca alta del río Elqui corresponde a tundra y tundra de lluvia invernal, sin embargo, a través de los valles el clima sería de tipo semiárido de lluvia invernal. Además, de acuerdo con Brenning (2005), la isoterma 0°C de temperatura media anual oscila entre los 4.000 y 4.100 m s.n.m., lo cual mantendría una relación directa con la presencia de glaciares rocosos activos (~4.000 m s.n.m.) e inactivos (~3.800 m s.n.m.); esta última cota, según algunos autores, indicaría en forma relativa el límite inferior de permafrost discontinuo de montaña (UGP UC, 2010; Brenning, 2005; Azócar & Brenning, 2010). Específicamente en el área de estudio, se han identificado glaciares rocosos a cotas desde los ~3.720 m s.n.m. y actividad criogénica incipiente a partir de los 3.650 m s.n.m. (Alfaro *et al.*, 2018a).

En este ambiente de montaña, los sistemas de circulación atmosférica, y la orografía, son claves para comprender la ocurrencia de procesos gravitacionales, sobre todo aquellos derivados de la variable climática. Dentro de los principales sistemas de circulación presentes en esta región geográfica, destacan el Monzón de Verano de Sudamérica (SASM), los vientos del oeste (Westerlies) y el fenómeno de El Niño-Oscilación del Sur (ENSO). Todos ellos contribuyen al aporte de humedad tanto desde el oeste como desde el este y noreste del continente. En este sector de los Andes Centrales no se observan glaciares en la actualidad, debido a la aridez extrema, aun cuando las mayores altitudes se encuentran por sobre el límite de la isoterma 0°C (Ammann *et al.*, 2001; Zech *et al.*, 2008). Esto se debe principalmente a que la

humedad proveniente del SASM, como la transportada en el sector austral por los Westerlies no alcanzan dichas latitudes.

En cuanto a las condiciones más recientes del contexto glacial y climático del área, Robson *et al.* (2022) realiza un análisis de los cambios y balance de masa del sistema del Glaciar El Tapado, para el periodo 1956-2020, obteniendo un balance neto en torno a cero entre 1956 y 1978 y pérdida continua entre 1978 y 2020. Estos resultados se explicarían por el aumento en la temperatura del aire y disminución en la precipitación y humedad desde la década de 1980. Adicionalmente, los autores concluyen que las pérdidas de hielo observadas en el Glaciar El Tapado se ajustan al promedio regional de los Andes semiáridos entre 2000 y 2018.

2 RESULTADOS

2.1 Segmentación de ambientes a lo largo de la ruta 41 Ch

En el área de estudio la ruta 41 Ch, con una extensión actualmente operativa cercana a los 71 km, se dispone, en su mayor parte, a lo largo del fondo del valle, sobre planicies fluviales, terrazas fluviales y glacio-fluviales, así como en algunos tramos en las laderas detríticas y/o rocosas, esto último en la parte final hacia el límite con Argentina. En esta sección, la ruta asciende con un desnivel que va desde los 2.075 m s.n.m. hasta los 4.761 m s.n.m.

Esta ruta de conexión internacional presenta un primer tramo asfaltado hasta la cortina del embalse La Laguna y de allí en adelante se mantiene en una condición de calzada de ripio. Asimismo, en este último tramo se han realizado desvíos y cortes producto de deslizamientos de suelo y roca, reduciendo su largo total que originalmente alcanzaba los 84 km.

A lo largo de esta trayectoria, se observa una variedad de ambientes geomorfológicos (Figura 3) que se asocian a procesos superficiales que dominan el paisaje y por tanto influyen en el tipo de inestabilidades de ladera que afectan la ruta.

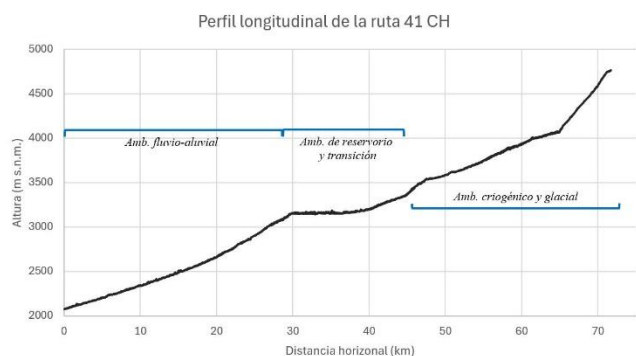


Figura 3. Perfil longitudinal de la ruta 41 Ch, en su sección operativa, a lo largo del valle del río La Laguna y Colorado. Se observa un largo total cercano a 71 km con un desnivel entre 2.075 y 4.761 m s.n.m.

En un primer tramo, entre el Complejo Fronterizo Agua Negra y el embalse La Laguna, aprox. 30 km, se reconoce el desarrollo de un valle con marcada incisión fluvial y aportes laterales de características aluviales en quebradas de alta pendiente (Figura 4). Este tramo se caracteriza por una ascensión constante en un valle estrecho con ladeas rocosas, de alta pendiente en ambas vertientes.

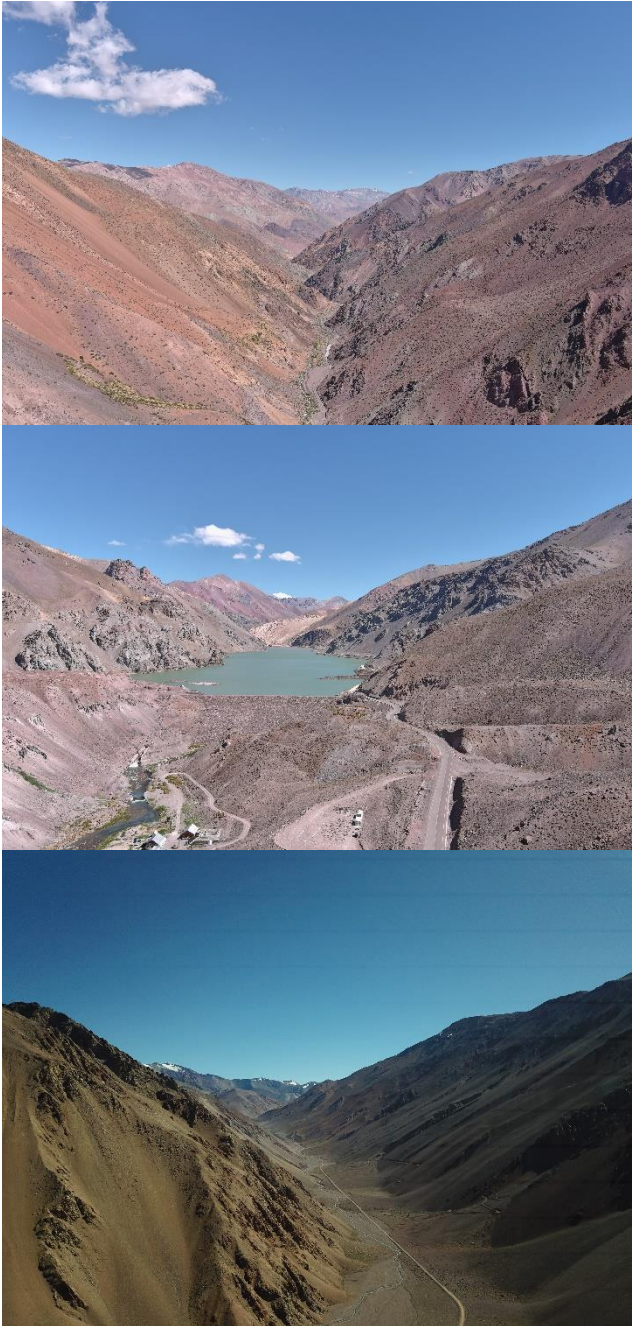


Figura 4. Fotografías características de los tres tramos diferenciados por ambiente geomorfológico. Arriba (aprox. km 22): ambiente fluvio-aluvial, vista aguas abajo del embalse La Laguna donde se destaca la marcada incisión del río. Centro (aprox. km 30): ambiente de reservorio y transición, vista aguas arriba en el sector del embalse La Laguna donde destaca la amplitud del valle y grandes volúmenes de material sedimentario. Abajo (aprox. km 48): ambiente criogénico y glacial, vista aguas arriba desde el sector Llano de Las Liebres donde destaca la forma en U del valle por efecto glacial.

Una segunda sección recorre 17 km de marcado contraste morfológico entre el embalse La Laguna (~3.200 m s.n.m.) y el

sector del Llano Las Liebres (~3.500 m s.n.m). Aquí la característica principal es la disminución de la pendiente en el trazado de la ruta, producto de la condición de reservorio del embalse (Figura 4). Asimismo, el valle principal se amplía transversalmente, destacando la presencia de importantes volúmenes de sedimento asociados a antiguas remociones en masa y primeros indicios de una transición hacia un ambiente de influencia glacial.

Finalmente, los últimos 24 km (Figura 4), aguas arriba del sector Llano Las Liebres, se caracterizan por un contexto de marcada influencia glacial, donde se preserva un valle en forma de U con morfologías y depósitos típicos de ambiente glacial (morrenas, hombreras, planicies glaciofluviales, entre otros). Asimismo, en este tramo los rasgos criogénicos (suelos estructurados, lóbulos y superficies de geliflujión, glaciares rocosos, superficies de crioplanación, gelifractos, entre otros) destacan en las laderas contiguas a la ruta, así como en las partes altas de la topografía.

2.2 Procesos gravitacionales

En el área de estudio se reconocen diversos procesos gravitacionales asociados a remociones en masa, principalmente de tipo deslizamientos, caídas y flujos (Figura 5).

El catastro de remociones en masa levantado para el área de estudio considera 336 eventos de los cuales 204 son flujos, 118 son deslizamientos y 14 son caídas.

Si bien los flujos son los más abundantes y con mayor distribución, los deslizamientos son los de mayores dimensiones y material involucrado. Por su parte las caídas presentan una recurrencia mucho más significativa por cuanto se podrían considerar incluso muchos más eventos de los registrados en este trabajo, asociados principalmente a coluvios o conos de talud y asociadas a la intervención en taludes antrópicos.

Al realizar una segmentación de los distintos procesos gravitacionales (sin descartar la influencia del agua como agente de transporte), se han separados distintas unidades geomorfológicas asociadas a procesos particulares como aluvial, fluvial, remociones en masa y áreas en ambiente glacio-criogénico (Figura 5).

Luego, analizando la distribución altitudinal de estas agrupaciones de procesos (Figura 6) se observa que la influencia fluvial se acota al tramo inferior aguas debajo del embalse La Laguna, y sobre este reservorio la influencia es mayormente glacio-fluvial y aluvial.

Por su parte, los procesos de características coluviales (conos de talud) que podrían a su vez asociarse con caídas de rocas y deslizamientos superficiales, las remociones en masa y los procesos aluviales (que incluyen abanicos y canales y sendas de quebradas laterales) se concentran mayormente en torno a los 3.000-4.000 m s.n.m. aun cuando las evidencias de estos alcanzan incluso los 5.000 m s.n.m.

Finalmente se destaca aquellas áreas afectadas por procesos glacio-criogénicos (glaciar-periglacial/criogénico), las cuales se distribuyen a mayores altitudes, concentrándose las mayores superficies entre los 4.000-5.000 m s.n.m. y alcanzando cotas cercanas a los 6.000 m s.n.m.

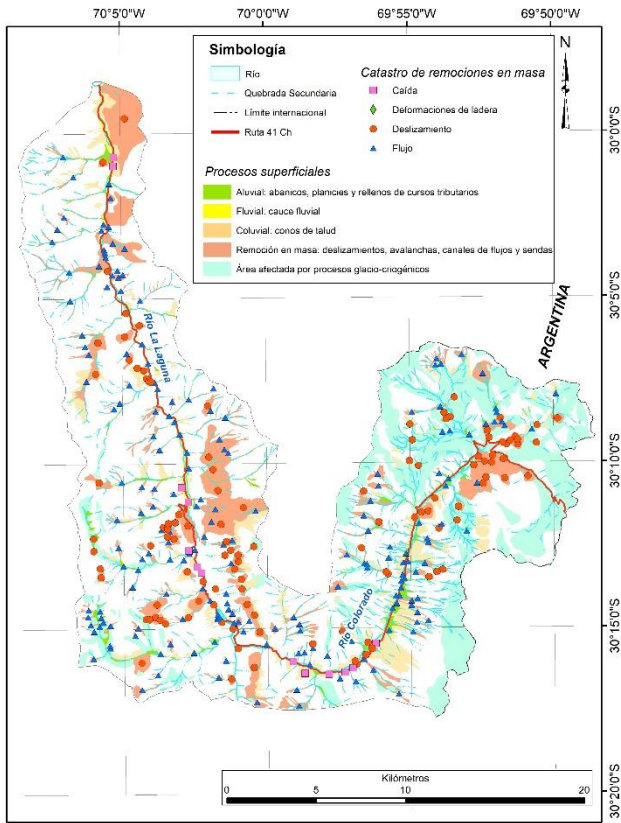


Figura 5. Distribución de procesos gravitacionales asociados a unidades geomorfológicas mapeadas a una escala 1:50.000. Se incluye, además, el catastro de remociones en masa como elementos puntuales, algunos de los cuales corresponden a eventos específicos registrados en eventos de precipitaciones o sismos.

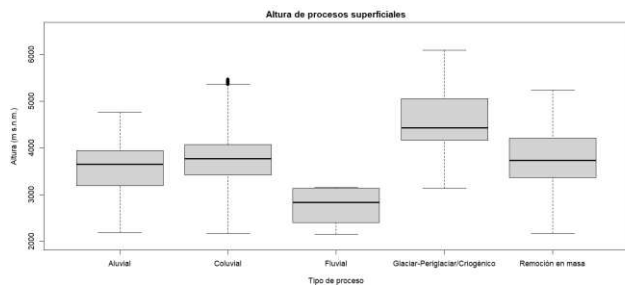


Figura 6. Boxplot de distribución altitudinal de agrupaciones de procesos sobre la base de unidades geomorfológicas mapeadas escala 1:50.000.

2.2.1 Control geológico-geotécnico e impactos en la ruta internacional 41-Ch

Desde el punto de vista geológico (litológico y estructural), se observa una gran variación en cuanto al tipo de litologías (volcánicas extrusivas, volcánicas efusivas, volcans sedimentarias, sedimentarias e intrusivas) cuyas características son muy diversas a lo largo de la ruta, siendo compleja una caracterización homogénea para cada tipo. Asimismo, la intensa deformación estructural (fallas geológicas y pliegues) han generado

basculamientos e inclinación de los estratos, debilidades y fracturamiento del macizo, además de aportar un control para el desarrollo de zonas de alteración hidrotermal con la consecuente disminución en la resistencia de la roca. Estas características han influido en el desarrollo de la mayoría los deslizamientos y avalanchas de roca reconocidos en el área de estudio, sobre todo aquellos en torno al sector del embalse la Laguna y aguas arriba del sector Llano de Las Liebres (Figura 7).

En cuanto a los flujos canalizados, estos en general son de características detríticas y de lodo cuya génesis se da por efecto de la escorrentía y erosión superficial en condiciones de precipitaciones intensas (Figura 8). Este tipo de procesos tiene su fuente en laderas con abundantes sedimentos tanto de las remociones más antiguas como de los coluvios y coberturas de regolito. Las zonas de alteración hidrotermal también son zonas de debilidad que aportan material a los flujos.



Figura 7. Procesos gravitacionales de laderas asociados a deslizamiento de roca en zonas con fallas geológicas y alteración hidrotermal (arriba) y caídas de rocas recurrentes en sectores del tramo inferior (pavimentado) donde existen medidas de mitigación en coluvios (conos de talud).

Por otro lado, en el tramo superior de la ruta, donde predomina el ambiente glacio-criogénico, el aspecto de mayor relevancia dice relación con la degradación de las condiciones que favorecen este entorno. Así, el aumento de las temperaturas (ascensión de las

líneas de equilibrio glaciar, lluvias con elevada isoterma 0°C y variaciones abruptas como olas de calor) y la falta de aporte nival son factores que generan inestabilidades en los ciclos de congelamiento-descongelamiento y en el desarrollo completo de la criósfera. Como consecuencia de esto, se han registrado deslizamientos mayores que han afectado la ruta 41 Ch en el tramo cercano al Paso Agua Negra impidiendo el normal tránsito y debiendo cerrar dos segmentos (Figura 9).



Figura 8. Flujos de detritos que afectan recurrentemente la ruta 41 Ch. Se observa variabilidad en los detritos y extensión de los abanicos, además de la fuente de sedimentos que aporta material desde las laderas.

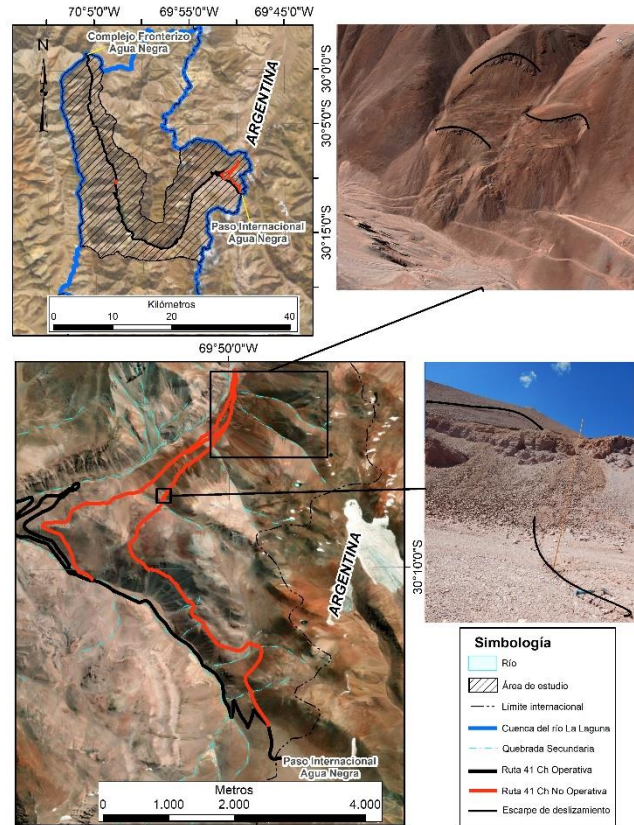


Figura 9. Ejemplo de impactos en la ruta 41 Ch (sobre 4.000 m s.n.m.), en el tramo superior donde el ambiente dominante es criogénico glaciar. Se destacan cortes y desvíos de la ruta debido al desarrollo de deslizamientos en los últimos kilómetros casi al llegar al límite fronterizo.

3 CONCLUSIONES

El presente trabajo corresponde a una síntesis de los avances desarrollados por Sernageomin en el estudio del sector del Paso Agua Negra (Alfaro *et al.*, *en preparación*) y cuyo enfoque se centra en el análisis geomorfológico y de susceptibilidad de remociones en masa en el área de influencia de la ruta 41 Ch.

El área de estudio está inserta en la cuenca del río La Laguna y se caracteriza por una variabilidad geomorfológica a lo largo de trazado de la ruta, atravesando desde un ambiente mayormente fluvio-aluvial hacia un tramo intermedio de transición para finalmente recorrer un entorno marcado por la influencia glaciar y criogénica.

La ruta 41 Ch se caracteriza por una longitud que actualmente se encuentra operativa en solo 71 km de los 84 km diseñados originalmente. Esto se debe a que en el segmento final (cercano al Paso Internacional Agua Negra) se ha suspendido el tránsito debido a la ocurrencia de deslizamientos de suelo y roca en la ladera por donde se dispone la ruta.

En los primeros 17 km, correspondientes al tramo entre el Complejo fronterizo y el embalse La Laguna, destaca el ambiente fluvio-aluvial donde los problemas de mayor recurrencia se asocian con un trayecto de ruta que se emplaza al pie de un valle con laderas escarpadas desde donde se generan abundantes caídas

de rocas y flujos canalizados de limitada extensión como aportes laterales en quebradas de alta pendiente. Entre los kilómetros 17 y 30, entre el embalse La Laguna y el sector del Llano Las Liebres, la pendiente de la ruta disminuye notoriamente debido a la presencia del embalse y consecuente desarrollo de un sistema de reservorio que modifica el perfil longitudinal del valle. En este tramo los principales problemas se asocian con caídas de rocas y flujos canalizados, ambos procesos tienen su fuente en laderas rocosas de alta pendiente y con importantes gados de alteración, además de depósitos de antiguas remociones en masa situadas en las partes altas del relieve.

En los últimos 24 km de la ruta se puede reconocer una clara influencia en el modelado glacial del valle, con una prominente amplitud en forma de U, además de morfologías y depósitos típicos como morrenas, hombreras, planicies glaciofluviales, entre otros. Adicionalmente, un ambiente criogénico se evidencia por múltiples rasgos, alguno de ellos con influencia directa sobre la ruta como son el desarrollo de laderas detríticas, lóbulos y superficies de geliflujión, además de flujos de detritos y lodo con abanicos extensos y muy bien definidos. Complementariamente, destaca la presencia de importantes deslizamientos de suelo y roca, algunos de ellos con registro histórico y movimientos recientes.

A partir del catastro de remociones en masa (336 eventos registrados) se puede concluir que los flujos de detritos y lodo son los de mayor distribución en el área y sus numerosos registros recientes dan cuenta de continuos cortes de la ruta debido a episodios de precipitación intensa. No obstante, los deslizamientos y avalanchas de roca son los procesos gravitacionales de mayores dimensiones (área y volumen), caracterizados en su gran mayoría por ser antiguos y distribuirse ampliamente en las partes altas del relieve. Finalmente, las caídas de roca son procesos con una elevada recurrencia y constante impacto sobre la ruta en este ambiente de montaña y, si bien, el catastro refleja un menor número debido a que se muestran solo los eventos con alguna certeza en su ocurrencia, también se podrían incluir dentro de esta categoría los conos de talud (proceso coluvial) cuya distribución se da en prácticamente todo el trayecto de la ruta.

4 AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo ha sido financiado principalmente por la Subdirección Nacional de Geología, del Servicio Nacional de Geología y Minería de Chile, como parte de los proyectos institucionales. Adicionalmente, se cuenta con el financiamiento de la Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo (ANID) a través de la Beca de Magister para Funcionarios Públicos. Los autores de este trabajo agradecen a las y los funcionarios del Complejo Fronterizo Agua Negra, en particular al Sr. Mauricio Compán, por su ayuda constante y apoyo durante las campañas de terreno.

5 REFERENCIAS

- Alfaro A.; Brantt C., Parra J. (*en preparación*). Geomorfología y Amenaza de Remociones en Masa del sector Paso Internacional Agua Negra. Escala 1:50.000, Región de Coquimbo. Servicio Nacional de Geología y Minería.
- Alfaro, A.; Brantt, C.; Merino R.N. 2018a. Interacción de procesos geológicos y desarrollo de geoformas como evidencias de un ambiente paraglaciar en la cordillera de Los Andes, valle del río Colorado,

- cuenca alta del Elqui. Actas XV Congreso geológico chileno, Concepción, pp. 663-665.
- Alfaro, A.; Pantoja, G.; Brantt, H. 2018b. Peligro de remoción en masa en la región de Coquimbo-Sector Norte. Servicio Nacional de Geología y Minería, Informe Registrado IR-18-68, 40 p., 3 anexos. Santiago.
- Ammann C.; Jenny, B.; Kammer, K.; Messerli, B. 2001. Late Quaternary Glacier response to humidity changes in the arid Andes of Chile (18-29°S). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 172, 313-326.
- Brenning, A. 2005. Climatic and geomorphological controls of rock glaciers in the Andes of Central Chile: Combining statistical modeling and field mapping. Tesis de doctorado, Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fakultät II, Humboldt-Universität, Berlin, Alemania 153 p.
- Hungry, O., Leroueil, S. y Picarelli, L. The Varnes classification of landslide types, an update. *Landslides* 11, 167-194 (2014). <https://doi.org/10.1007/s10346-013-0436-y>
- Murillo, I., Velásquez, R., Creixell, C. 2017. Geología de las áreas Guanta-Los Cuartitos y Paso de Vacas Heladas, Regiones de Atacama y Coquimbo. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica Nos. 192-193: 96 p., 1 mapa escala 1:100.000, 1 CD con anexos. Santiago.
- Mpodozis C. y Cornejo P. 1988. Hoja Pisco Elqui, IV Region de Coquimbo, Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile N° 68, 160 p.
- Robson, B. A.; MacDonell, S.; Ayala, A.; Bolch, T.; Nielsen, P.; Vivero, S. 2022. Glacier and rock glacier changes since the 1950s in the La Laguna catchment, Chile. *The Cryosphere*, 16, 647-665. <https://doi.org/10.5194/tc-16-647-2022>.
- Sarricolea, P., Herrera, M., Meseguer, O. 2017. Climatic regionalisation of continental Chile. *Journal of Maps*. 13:2, pp. 66-73.
- Trombotto, D. 2014. Guía Terminológica de la Geocriología Sudamericana. American Geocryology. 1a ed. Lujan de Cuyo.
- UGP UC, Unidad de Gestión de Proyectos del Instituto de Geografía de la Pontificia Universidad Católica de Chile. 2010. Dinámica de glaciares rocosos, Dirección General de Aguas, Unidad de Glaciología y Nieves, Ministerio de Obras Públicas, Santiago.
- Velásquez, R.; Coloma, F.; Murillo, I.; Merino, R.N.; Ortiz, M. 2021. Geología de las áreas Pisco Elqui y Paso del Agua Negra, región de Coquimbo. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica 211-212: 201 p., 1 mapa escala 1:100.000.
- Zech, R., May, J., Kull, C., Ilgner, J., Kubik, P. and Veit, H. 2008. Timing of the late Quaternary glaciation in the Andes from 15° to 40° S. *Journal of the Quaternary Science*, 23(6-7): 635-647.

INTERNATIONAL SOCIETY FOR SOIL MECHANICS AND GEOTECHNICAL ENGINEERING



This paper was downloaded from the Online Library of the International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE). The library is available here:

<https://www.issmge.org/publications/online-library>

This is an open-access database that archives thousands of papers published under the Auspices of the ISSMGE and maintained by the Innovation and Development Committee of ISSMGE.

The paper was published in the proceedings of the 17th Pan-American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (XVII PCSMGE) and was edited by Gonzalo Montalva, Daniel Pollak, Claudio Roman and Luis Valenzuela. The conference was held from November 12th to November 16th 2024 in Chile.