DESARROLLO DE SISTEMAS GEOCRIOGÉNICOS EN LA ZONA DEL PASO AGUA NEGRA Y SU IMPORTANCIA EN GEOLOGÍA APLICADA

Flavia A. Croce y Juan P. Milana

CONICET e InGeo, Universidad Nacional de San Juan. Av. I. de la Roza y Meglioli, 5400 Rivadavia, San Juan. flacroce@infovia.com.ar

Keywords Geocriología, Glaciar de rocas, Geofísica.

INTRODUCCION

Los glaciares de rocas en la región central de los Andes secos se distribuyen irregularmente, dependiendo de varios factores como radiación solar, topografía, altitud, precipitaciones, disponibilidad de detritos, etc. El límite inferior hasta ahora conocido de permafrost esporádico es aproximadamente 3200 m s.n.m. (Corte, 1980) para la Prov. de Mendoza. En la Prov. de San Juan este límite varía entre 3600 m s.n.m en el sur, hasta cerca de los 4000 m s.n.m en el norte, debido al incremento de la temperatura y radiación global a causa de la menor nubosidad.

El ámbito geocriogénico donde se desarrolla este trabajo corresponde a la zona del Paso de Agua Negra, localizada en el departamento de Iglesia, San Juan. Dicha zona se caracteriza por su gran densidad de formas geocriogénicas tales como glaciares de rocas activos e inactivos, de valle, de circo y de talud, y suelos congelados con evidencias de movimiento. En esta región, los glaciares de rocas se encuentran en muchos casos en la parte mas alta de la cuenca, por lo que el aporte detrítico a los mismos (tipos de valle y circo) es principalmente por derrumbes, deslizamientos y flujos cohesivos y no cohesivos que terminan sobre la superficie del glaciar de rocas. A diferencia de los glaciares de rocas en regiones mas australes, el till glaciar que está presente en posiciones mas bajas de los valles, es rara vez constituyente de estos cuerpos. Las excepciones en esta área son los glaciares de roca al pie del glaciar de Agua Negra y en la cabecera del Arroyo San Lorenzo.

Una evaluación criogénica, es decir conocer las profundidades del suelo que se congela y descongela estacionalmente, es el primer paso a seguir para desarrollar actividades en zonas frías, como construcción de caminos, de diques de embalse, de viviendas, etc.

La construcción en general en regiones de permafrost es bastante frecuente y conocida, aunque se dificulta por la posible fusión del mismo durante o después de la construcción. Es por eso que para iniciar un proyecto de obra, hay varios factores a tener en cuenta en relación a la presencia de sistemas geocriogénicos. En general es recomendable una inspección exhaustiva del terreno luego del análisis de fotos aéreas, dado que existen varias geoformas criogénicas visibles en aerofotos y no en campo, y viceversa. Adicionalmente, es recomendable un estudio sobre la composición y profundidad del permafrost, y composición y comportamiento estacional de la capa activa de dichos glaciares de rocas.

LOS SISTEMAS GEOCRIOGENICOS DE AGUA NEGRA

El fácil acceso a la zona del Paso de Agua Negra, convierte a la misma en un excelente laboratorio natural para el estudio de estos cuerpos complejos básicamente constituidos por detrito y hielo, y que presentan singular importancia para el desarrollo de obras civiles de alta montaña tales como caminos, túneles, diques, o movimientos de tierra en general, tan comunes en las labores mineras hoy frecuentes en la alta montaña de San Juan. Una inspección de la morfología externa de estos cuerpos, sumada a la información obtenida del desarrollo en profundidad de la capa activa y permafrost en algunos de estos cuerpos,

permiten hacer generalizaciones que pueden tener cierta importancia aplicada a la hora de efectuar obras civiles.

Se han podido reconocer tres formas básicas de cuerpos geocriogénicos, uno de los cuales podría no estar asociado a permafrost. El primero de ellos lo componen los glaciares de rocas. Aquí se reconocen tres variedades morfológicas: de valle (glaciar El paso), de circo (glaciar Dos Lenguas) y de talud, independientemente de su origen geocriogénico o glacigénico. El segundo lo constituyen los glaciares de rocas inactivos, y el tercero, corresponde al suelo permanentemente congelado que puede ser inmóvil o móvil dependiendo de la pendiente en la cual se halla.

No se utilizó la división de los glaciares de rocas en "ice-core type" y "ice-cemented type", ya que se consideró que no hay datos que soporten la utilización de estos términos. Esa clasificación se basa en que el glaciar de rocas sea producto de la transformación gradual de un glacial descubierto en glaciar de rocas (ice-core type), o sea producto de la acumulación de caída de detritos y nieve en un circo (ice-cemente type). En la zona de estudio esto es casi imposible de discernir ya que la mayoría de los glaciares tradicionales ha desaparecido y la información geofísica sugiere que glaciares de rocas como El Paso, clasificables como "ice-cemented type" podrían ser en realidad "ice-core type" debido a las altas velocidades de las ondas P en el permafrost (Croce y Milana, 2002), atribuibles a un núcleo de hielo.

DESCRIPCION GENERAL DE LOS SISTEMAS GEOCRIOGENICOS DE AGUA NEGRA

El permafrost de montaña de los Andes ocupa un área aproximada de 30.000 km^2 (Gorbunov, 1978) y son los glaciares de rocas los que representan a este tipo de permafrost de las zonas montañosas geocriogénicas con una temperatura media anual inferior a 0º C (Buk, 1983).

A continuación se describirá en detalle cada uno de los tipos de glaciares de rocas activos:

1A) **Glaciar de rocas de valle**: Al igual que los glaciares tradicionales, estos glaciares de rocas ocupan la zona axial de un valle, que en general es pequeño, debido a las dimensiones reducidas de estos cuerpos. La mayoría de los glaciares de rocas glacigénicos (aquellos cuyo origen se halla ligado a la presencia actual o pasada de un glaciar tradicional) son de este tipo, sugiriendo que son la última expresión del retroceso glacial en regiones áridas e hiperáridas (Milana et. al, 1999). En la zona de Agua Negra, el mejor ejemplo lo constituye el glaciar de rocas El Paso (Fig. 1). Dicho glaciar se ubica en las coordenadas 30º13´ S, 69º48´ W, sobre la quebrada de Sarmiento, de dirección noreste-suroeste. Su relación longitud-ancho es de 3,6; con un largo de 1700 m y un ancho promedio de 470 m. Su área es 0,69 Km^2 y la base del mismo se encuentra a 4600 m s.n.m, alcanzando su cota máxima a los 4950 m s.n.m. Las mediciones de distancia e inclinación realizadas del frente del glaciar, indican una inclinación media de 37º, alcanzando una altura máxima de 40 m (verticales), disminuyendo a 10-15 m hacia los costados del mismo. El frente del glaciar es la zona de mayor acumulación, ya que presenta los mayores espesores. Esto se debe a la acción de flujos gravitatorios, producto de movimientos internos del glaciar tratando de restablecer el equilibrio.

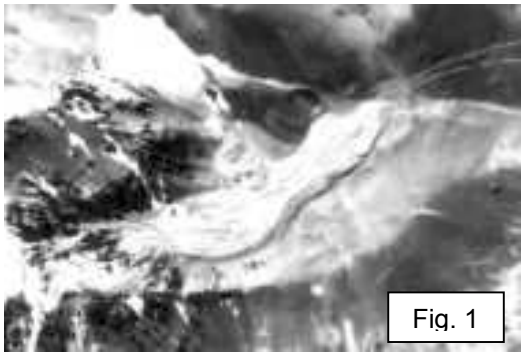

Fig. 1

1B) **Glaciar de rocas de circo**: A diferencia del anterior, estos cuerpos se suelen situar en concavidades menores dentro de la red de drenaje, las que pueden ser cabeceras de valle, pero generalmente son pequeños circos presentes a los costados del valle principal. La presencia y el avance de estos glaciares de rocas frecuentemente obstruye el drenaje fluvial del valle, a veces llegando a endicar completamente el drenaje (como el glaciar de rocas San Lorenzo Sur) el que en general prosigue en forma subterránea dada la gran porosidad de estos cuerpos. Un ejemplo estudiado de este tipo de glaciares es el Dos Lenguas (Fig. 2). Dicho glaciar, como su nombre lo indica, está formado por dos lóbulos, de dirección este-oeste y cae sobre la margen izquierda del Arroyo de Agua Negra. Su relación longitud-ancho es 3,15; su largo de 1450 m, y su ancho promedio de 460 m. La superficie ocupada por dicho glaciar es de 0,58 Km^2, su base está en los 4250 m s.n.m, siendo su altura máxima de 4650 m s.n.m. La altura de su frente es mayor que la del glaciar El Paso y más empinado, con una inclinación aproximada de 40º. En dicho frente, también se observan marcas de flujos gravitacionales. Asimismo sobre la quebrada de San Lorenzo pueden distinguirse importantes masas de glaciares de rocas de circo. Se distinguen cuatro cuerpos de este tipo, evidentes en las fotografías aéreas y satelitales del área. Dos de ellos se disponen en dirección norte-sur y se desprenden de la ladera Sur del Cerro San Lorenzo (Fig. 3) y los otros descienden del margen contrario de esta quebrada.

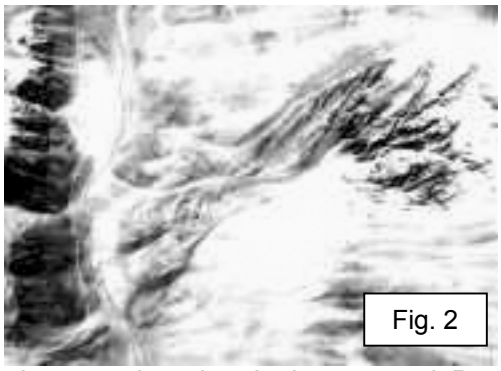
Fig. 2

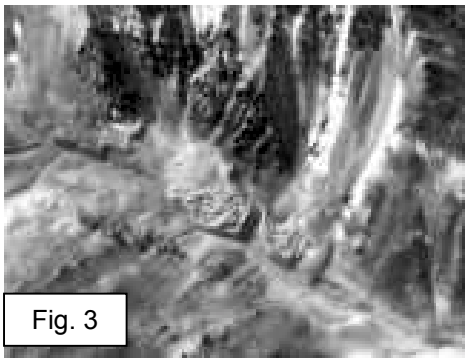
Fig. 3

1C) **Glaciar de rocas de talud**: dichos glaciares probablemente se forman por la acumulación continua de suelo en movimiento al pie del talud del borde de un valle. Se los ha detectado en la mayoría de las márgenes de valles glacio-fluviales, en general por encima de los 4000 m s.n.m. La presencia de áreas donde evidentemente hay mas reptación, combinada con flujos típicos de sistemas coluviales de montaña, hacen que por coalescencia se generen frentes continuos de este tipo de talud a lo largo de los bordes del valle, pero que muestran promontorios donde el aporte de material es mayor, y entrantes donde el aporte es menor (Fig. 4).

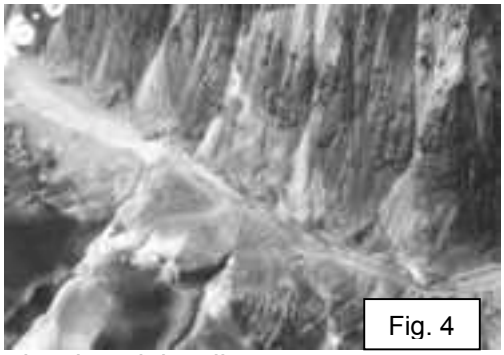
Fig. 4

Estas geoformas son parecidas a las morenas laterales dejadas por el retroceso de algún glaciar mayor, pero las características indicadas las hacen inconfundibles, principalmente al estudiárselas a partir de aerofotografías. La pendiente del frente de los glaciares de rocas de talud es menor que en los glaciares de rocas activos, dado que aparentemente el apilamiento de material en estos cuerpos es mas lento. Por la altura y la apariencia plástica de estos depósitos (presencia de arcos lobulados paralelos al frente) se infiere la presencia de permafrost aunque aún no se han efectuado investigaciones de campo que permitan corroborar esta presunción.

2) **Glaciares de rocas inactivos**: Estos cuerpos muestran las morfologías anteriormente descriptas pero su talud frontal, que da una idea del nivel de actividad, se encuentra en general bastante degradado (Corte, 1980). Muchas veces se los encuentra en altitudes menores a la de los glaciares de rocas activos, observándose a partir de los 4200 m s.n.m. También se diferencian de los activos por no sobresalir tridimensionalmente sobre el relieve general, que en otras palabras se describe como "desinflados", debido a la desaparición del núcleo de hielo que componía el permafrost. Sin embargo, también podemos ver este tipo de cuerpos a alturas similares a las de los glaciares activos, en donde la existencia de permafrost está asegurada. En tales casos, es probable que exista aún un núcleo congelado pero debido al escaso aporte, el mismo se halla muy degradado, inhibiendo al sistema que fluya plásticamente como los glaciares activos. Por ello, se estima que no siempre que el glaciar de rocas parezca inactivo, se puede concluir que no exista un núcleo de hielo o material rocoso cemetado por hielo intersticial.

3) **Suelos congelados**: En los diferentes reconocimientos efectuados en el área se han observado dos tipos principales de suelos congelados. Los suelos fijos o inmóviles caracterizan los fondos de los valles en donde la pendiente es escasa. La característica más evidente de estos suelos, ligados a congelamiento y descongelamiento estacional, es la existencia de polígonos de retracción térmica con segregación de los materiales clásticos gruesos hacia los bordes del polígono, tal como se halla descripto para otros suelos congelados (Corte, 1990). La existencia de estos suelos sugiere que debe existir una capa de permafrost en profundidad dadas las condiciones térmicas reinantes. El otro tipo son los suelos móviles, cuya característica principal es la generación de una estructura en surcos paralelos y equidistantes alineados en la dirección de la máxima pendiente. Estas estructuras se producen por una combinación de reptación y agrietamiento por contracción térmica (frost - creep), generando líneas de flujo que luego suelen ser utilizadas por el agua de fusión del permafrost. La existencia de estos tipos de suelos alerta sobre la presencia del conjunto capa activa-permafrost.

GENERALIDADES DEL PERMAFROST Y LA CAPA DE DESCONGELAMIENTO ESTACIONAL EN LA ZONA DE AGUA NEGRA

Los Andes Centrales de Argentina (San Juan y Mendoza), quizá sean el área de glaciares de rocas más grande del mundo. En el norte de Mendoza, Corte y Espizúa (1976) relevaron aerofotográficamente más de 12.000 km^2, fotointerpretando 340 km^2 de glaciares de rocas (2,8 %) y 304 km^2 de glaciares de hielo descubierto. Hacia el norte, debido al incremento de la aridez, los glaciares de rocas son más frecuentes, llegando a ocupar un 3,6 % de la superficie de esta cuenca, lo que sugiere una mayor difusión del permafrost en esta área.

La capa activa o de descongelamiento estacional, puede ser estudiada utilizando el método sísmico de refracción. En la zona de estudio, Croce y Milana (2002) determinaron un decrecimiento del espesor de esta capa a mayores alturas. En el glaciar El Paso, por ejemplo, cerca de los 4740 m s.n.m hay una capa de 3,5 m de espesor aproximadamente, mientras que sobre los 4760 m s.n.m. disminuye a 2,15 m. El seguimiento estacional del espesor de la cobertura detrítica en dicho glaciar sugiere que la misma no se comporta como una capa activa típica sobre el permafrost, dado que el congelamiento invernal no es completo sino que sería variable dependiendo de la recarga hídrica, lo que deja una capa superficial enfriada pero no congelada. En verano la capa activa es de 2,15 m, disminuyendo a 1,42 m en invierno ya que parte se congela, comportándose como permafrost. En otoño, se observa una disminución considerable de la capa activa, por lo tanto es en esta época en donde existe el mayor escurrimiento de agua en el glaciar. Con respecto al glaciar de rocas Dos Lenguas también se observa una variación estacional de la capa activa, siendo en verano de 2,49 m; y en invierno de 1,6 m.

Los autores citados estudiaron el espesor del permafrost en los glaciares de rocas El Paso y Dos Lenguas utilizando métodos geoeléctricos. En el glaciar El Paso, se detectó que

el espesor del permafrost aumenta progresivamente con la altura, desde 5,7m a los 4740 m s.n.m., hasta el máximo medido de 18,5 m a casi 4800 m s.n.m. El estudio preliminar geoeléctrico del Glaciar Dos Lenguas, sugiere también la presencia de permafrost, y una capa húmeda en profundidad, que indica algo de fusión y drenaje en la base del permafrost. El permafrost en este glaciar se encuentra a menores alturas lo que probablemente es resultado de una orientación más protegida a la radiación solar, que limita la sublimación de nieve estacional y facilita la recarga de hielo en el permafrost.

IMPORTANCIA APLICADA DEL ESTUDIO DE LOS GLACIARES DE ROCAS Y DE LOS SUELOS CONGELADOS

Como se indicó anteriormente, una evaluación de las condiciones criogénicas del suelo constituye la primera acción a seguir, para desarrollar actividades que involucren la alteración del equilibrio del sustrato, tales como construcciones, fundaciones, etc. La inspección del terreno, luego de un análisis de fotos aéreas, provee la primera información sobre las condiciones de hielo subterráneo en el permafrost, sobre los tipos de materiales en la capa activa, y sobre las condiciones hidrológicas del suelo (Corte, 1990).

El permafrost debe ser protegido al máximo en zonas de construcciones. Si el permafrost se enfría, o la capa activa sufre un incremento de temperatura, se puede producir una reducción o un levantamiento del terreno poniendo en peligro las construcciones. Muchas veces es el mismo permafrost el que le da soporte estructural al suelo, y al ocasionarse la fusión parcial del mismo, el suelo puede tornarse muy plástico y hasta fluidizarse (Corte, 1990).

Debe tenerse en cuenta que los pavimentos de caminos de regiones criogénicas deben diseñarse para soportar condiciones adversas como los efectos del levantamiento por congelamiento estacional, los efectos de las pérdidas de capacidad portante durante y después del descongelamiento, etc. (Linell et al, 1973).

La construcción de túneles en el permafrost no sólo tiene su aplicación para caminos, o explotación minera, sino también para el almacenamiento de comida o otros elementos que necesitan asegurarse frío permanente (Brown, 1970).

La construcción de diques en zonas de permafrost, es factible ya que a veces se puede proyectar la construcción con materiales relativamente porosos que se tornan luego impermeables cuando el núcleo permite ser congelado. Dichos diques no solamente pueden ser construidos para almacenar agua (Fulwider, 1973), o para prevenir aluviones (George, 1973), sino también para acumular los residuos de la actividad minera, como los diques de colas.

CONCLUSION

A través de observaciones de campo y del estudio del espesor de la capa activa y su evolución estacional, y de las profundidades del permafrost a través de mediciones geofísicas (Croce y Milana, 2002), se obtuvo un conocimiento básico sobre la morfología de los glaciares de rocas en la región de los Andes Centrales. Como sabemos dichos estudios son importantes para la realización de obras civiles. Los datos aquí vertidos solo sirven de guías generales, ya que cada obra civil demanda una serie de estudios diseñados específicamente para el tipo de proyecto que se quiere llevar a cabo.

Se diferenciaron tres grupos de sistemas geocriogénicos. Los glaciares de rocas activos, los glaciares de rocas inactivos y los suelos congelados. Dentro de los glaciares de rocas activos se distinguieron tres tipos: glaciares de rocas de valle los cuales ocupan la zona axial de un valle, un ejemplo en la zona de Agua Negra es el glaciar de rocas El Paso; glaciares de rocas de circo los cuales se disponen en pequeños circos dentro de la red de drenaje, como por ejemplo el glaciar de rocas Dos Lenguas y por último los glaciares de rocas de talud formados por acumulación de suelo en continuo movimiento al pie del talud del borde de un valle.

Las velocidades de onda “P” en el permafrost de los glaciares de rocas de valle y de circo en la zona de Agua Negra (Croce y Milana, 2002), permitió estimar un contenido de

hielo de 55,7 %, los cuales corresponderían a glaciares de rocas primarios (Barsch, 1978) que llegan a contener de un 50% a 60% de hielo insterticial, y que se originan como resultado de acumulación de nieve y detrito bajo la forma de avalanchas. Sin embargo, la existencia de zonas de muy alta velocidad de las ondas P, sugieren que parte del permafrost podría ser hielo masivo, indicando que al contrario, estos glaciares podrían ser el último relicto de grandes glaciares tradicionales modificados. De esta forma, aún no se puede establecer el origen real de estos glaciares de rocas. Los futuros estudios geofísicos de los glaciares de rocas activos, los inactivos y los suelos congelados, permitirán conocer mejor la génesis de los sistemas criogénicos locales, y completar la información básica de estos sistemas tan importantes para el desarrollo de proyectos civiles y mineros.

AGRADECIMIENTOS

Debemos agradecer la colaboración de Paco Ortiz y Germán en las tareas de campaña.

REFERENCIAS

Barsch, D., 1978. Active Rock Glaciers as indicators for discontinuous Alpine permafrost. An examle from the Swiss Alps. III Int. Conference on Permafrost. v 1, 348-353 p.

Brown, R.J.E., 1970. Permafrost in Canada, its influence on Northern development, University of Toronto Press, 234 p.

Buk, E., 1983. Glaciares de escombros y su significación hidrológica. IANIGLA-CONICET, Argentina. 22-35 p.

Corte, A. E., 1980. Glaciers and glaciolithic systems of the Central Andes. World Glacier Inventory. IAHS-AISH Publ. nro.126: 11-24 p.

Corte, A. E., 1990. GEOCRIOLOGIA. El frío en la Tierra. Ediciones Culturales de Mendoza. 444 p.

Corte, A.E. y Espizúa, L., 1976. Inventario de cuerpos de hielo de la cuenca del río Mendoza. Memoria Anual nro. 3, IANIGLA-CONICET, 3-34 p.

Croce, F. y Milana J.P., 2002. Estudio de la capa activa, el permafrost y la hidrología del glaciar de escombros El Paso, Agua Negra, San Juan. XV Congreso Geológico Argentino, Calafate, en prensa.

Fulwider, C.W., 1973. Termal regime of an Arctic earth fill dam. 2nd International Permafrost Conf. Yakutsk. American Contrib., 622-628 p.

George, W., 1973. Análisis of proposed Little Chena, River Earth filled nonretention dam, Fairbanks Alaska. 2nd Internat. Permafrost Conf. Yakutsk. American Contrib., 636-648 p.

Gorbunov, A.P., 1978. Permafrost investagation in high-mountain regions. Artic and Apline Research, v. 10, nro. 2: 283-294 p.

Linell, K.A. and Johnston, G.H., 1973. Engineering design and construction in permafrost regions. 2nd International Permafrost Conf. Yakutsk., American Contrib., 553-575 p.

Milana, J.P., Maturano, A. y Croce, F., 1999. Un modelo de glaciación árida basado en datos geofísicos y geomorfológicos de los Andes de Cuyo: Retroceso, metamorfosis y glaciares estratificados. XIV Congreso Geológico Argentino, Salta, Actas 1, p. 63.