

INVENTARIO DE PROCESOS DE REMOCIÓN EN MASA DE UN SECTOR DEL DEPARTAMENTO IGLESIA, SAN JUAN

María Yanina ESPER ANGILLIERI

CONICET- Gabinete de Neotectónica y Geomorfología, INGENIO, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de San Juan, San Juan. E-mail: yaninaesper@gmail.com

RESUMEN

Este trabajo presenta un inventario de procesos de remoción en masa, en las cuencas principales que afectan a las localidades de Colangüil, Malimán, Angualasto y Buena Esperanza, ubicadas en el departamento Iglesia, provincia de San Juan, a partir de la interpretación y análisis digital de fotografías aéreas e imágenes satelitales de diversa resolución. Se analiza en entorno de sistemas de información geográfica (SIG) la ocurrencia de los procesos de remoción en masa en relación a varios factores o variables condicionantes (litología, elevación, pendiente, orientación e insolación). En la zona de estudio se reconocieron tres ambientes morfoestructurales principales, la Precordillera Occidental al oeste, integrada mayormente por sedimentitas paleozoicas, la Cordillera Frontal al este, caracterizada por el volcanismo permo-triásico, ambas separadas por el valle de Iglesia que comprende principalmente los afloramientos paleógenos-neógenos. Los resultados indican que de las 760 geoformas identificadas como procesos de remoción en masa el 45,53 % corresponden a flujos y de ellos el 75,43 % son activos, siendo el principal factor desencadenante las fuertes precipitaciones de carácter torrencial.

Palabras clave: *Procesos de remoción en masa, inventario, SIG, departamento Iglesia, San Juan.*

ABSTRACT

Inventory of landslides processes in a region of the Iglesia Department, San Juan.

This study shows an inventory of landslides, starting from the interpretation and digital analysis of aerial photographs and satellite images of varied resolution, in the main basins which affect the localities of Malimán, Angualasto and Buena Esperanza, in the Iglesia Department, San Juan Province. The occurrence of landslides in relation to several determining factors or variables (lithology, elevation, slope, aspect, and insolation) is analyzed in GIS environment. Three main morphostructural environments have been recognized in the study area: the Western Precordillera to the west, principally made up of paleozoic sedimentites and the Cordillera Frontal to the east, which is characterized by Permo-Triassic volcanism. Both geological provinces are separated by the Iglesia Valley which comprises mainly the paleogene-neogene outcrops. The results indicate that out of the 760 geoforms identified as landslides, 45,53 % corresponds to flows, and from these 75,43 % are active, being the the main triggering agent, the heavy rains.

Keywords: *Landslides, inventory, GIS, Iglesia Department, San Juan Province.*

INTRODUCCIÓN

Los procesos de remoción en masa constituyen un peligro geológico (Ayala *et al.* 1987) de origen natural o inducido, que debe tenerse en cuenta en la planificación del territorio, sobre todo en áreas de montaña. Cruden (1991) define a procesos de remoción en masa como el movimiento descendente de un volumen de material constituido por roca, suelo o por ambos. La remoción en masa involucra procesos gravitacionales de movilización lenta o rápida (Cruden y Varnes 1996), pendiente

abajo, de bloques, suelo y/o materiales meteorizados inconsolidados.

Estos procesos no se distribuyen de forma aleatoria en la superficie del terreno, sino que siguen pautas o reglas. Esas reglas no se conocen en detalle, pero sí se sabe que están relacionadas con una serie de factores y condicionamientos geométricos, geológicos, geomorfológicos, hidrogeológicos, cobertura vegetal, etc. En América Latina, el número de víctimas y los daños materiales por evento ocurrido suelen ser elevados, ya que muchos asentamientos humanos se encuentran al pie

de escarpes montañosos o bien en zonas próximas. Si bien en los últimos años y a nivel mundial, la preocupación en cuanto a los daños ocasionados por estos procesos ha aumentado, en nuestro país aún no adquiere la importancia adecuada. Por ello es que existe una necesidad general de mejorar el conocimiento sobre éstos. En lo que respecta a los antecedentes en la materia de estudio, varios son los autores que realizaron trabajos referidos a procesos de remoción en masa, entre ellos Collantes (1999) quien caracterizó los procesos de remoción en masa que tienen

lugar en el valle de Tafi y remarcó la relación entre la variabilidad climática y la intensidad y extensión de los procesos de remoción en masa antiguos. Collantes *et al.* (2002) y Collantes (2003), estudiaron procesos de remoción en masa en las cumbres Calchaquíes. González Díaz (1998a, 1998b; 2003, 2004, 2005, 2009a, 2009b), González Díaz y Folguera (2005, 2006, 2009), González Díaz *et al.* (2000, 2001, 2003, 2005), Penna *et al.* (2008a, 2008b), han distinguido en diferentes zonas del territorio neuquino, numerosos e importantes procesos de remoción en masa. Fernandez y Lutz (2003), Fernandez (2005), investigaron sobre estos procesos en Tucumán. Espizúa y Bengochea (1991), Faucó *et al.* (2000, 2001), Moreiras (2003a, 2003b, 2004a, 2004b, 2005a, 2005b, 2006a, 2006b, 2009), Moreiras *et al.* (2008), estudiaron varios procesos de remoción en masa en el valle del río Mendoza, mientras que Perucca (1992) y Perucca y Esper (2008), efectuaron estudios relacionados a los mismos en la sierra de la Punilla de la provincia de San Juan.

CARACTERÍSTICAS DEL ÁREA DE ESTUDIO

Ubicación

El sector de estudio abarca una superficie de aproximadamente 2175,9 km² y se emplaza en el noroeste de la provincia de San Juan, dentro de la jurisdicción del departamento Iglesia, delimitado por la Cordillera Frontal al oeste (límite con la República de Chile); la provincia de La Rioja al norte y este (a través de la sierra de La Punilla-Volcán) y con los departamentos de Jáchal al sureste y Calingasta al sur (Fig. 1).

El sector, queda incluido entre los 29°39' 20" y 30°09'50" de latitud sur y 69°41' 22" y 68°47'22" de longitud oeste, a una altura mínima de 1.587 m n.m. y máxima de 5.639 m s.n.m.

Clima

El departamento Iglesia pertenece a la región semiárida del país. Posee clima continental, árido y mesotermal. La continen-

talidad del clima se manifiesta en la elevada radiación solar, escasa nubosidad, gran transparencia atmosférica e importante amplitud térmica anual.

De acuerdo a Minetti *et al.* (1986), las precipitaciones son mayores en el sector cordillerano. En efecto, en el extremo suroeste son superiores a los 300 mm/año, disminuyendo hacia el norte hasta unos 150 mm/año a la latitud de 29°S. En el sector este las precipitaciones son escasas, del orden de los 50 mm/año, aumentando en sentido este-oeste. Resulta posible establecer dos regímenes perfectamente definidos. En el sector cordillerano occidental las precipitaciones tienen carácter invernal (periodo abril-agosto) con registros máximos en mayo/junio que alcanzan valores medios del orden de los 75 mm/mes y se manifiestan en forma de nevadas o granizadas. El sector precordillerano oriental (de menor altitud), se caracteriza por un régimen pluviométrico netamente continental, con precipitación pluvial pobre que en el sector de los oasis iglesiasanos, oscilan entre los 10 a 15 mm/mes durante el período estival (noviembre-marzo) con una muy baja frecuencia media de días lluviosos o precipitaciones nubes (Minetti *et al.* 1986).

Geología

La zona de estudio queda incluida en dos provincias geológicas, la Precordillera Occidental (Rolleri y Baldis 1969) al este, la Cordillera Frontal (Groeber 1938) al oeste y ambas separadas por el valle de Iglesia. La Precordillera Occidental se caracteriza por el excepcional desarrollo de los depósitos del Paleozoico inferior a medio y el limitado aporte magmático.

La Cordillera Frontal, comprende principalmente depósitos neopaleozoicos de ambiente marino (Amos y Rolleri 1965), donde los elementos intrusivos y volcánicos (Grupo Choyoi) están interdigitados. En algunos sectores estas rocas se presentan parcialmente cubiertas por sedimentos y rocas efusivas del Paleógeno-Neógeno. El estilo tectónico es complejo, representado por pliegues y fallas inversas.

El valle de Iglesia, definido como subcuen-

ca río Blanco por Scalabrini Ortiz (1972) comprende principalmente las unidades paleógenas-neógenas que están plegadas y combinadas con estructuras de corrimiento de vergencia oriental, que junto con las sedimentitas cuaternarias, constituyen una cuenca del tipo *piggy-back* (Beer *et al.* 1990).

La estructura de la zona se caracteriza por una faja corrida y plegada de tipo piel gruesa en Cordillera Frontal y una faja corrida y plegada epidérmica o de tipo piel fina en el ámbito de Precordillera, estructuras generadas como consecuencia de la actuación del ciclo de compresión andino. La vergencia general es oriental, con retrocorrimientos importantes en los bordes occidentales de los principales cordones montañosos, con rumbo predominantemente norte sur. La estructura se torna sumamente compleja al presentarse plegamientos de 1°, 2° y 3° orden (Amos y Rolleri 1965).

METODOLOGÍA

Se han inventariado los procesos de remoción en masa ocurridos en el sector de estudio durante el periodo 1961-2008. El inventario se ha basado en la interpretación de fotografías aéreas a escala 1:15.000 (1961-1963), reconocimientos de campo e interpretación de imágenes satelitales (1985-2008).

La diferenciación entre las distintas geomorfías inventariadas como sus estados de actividad, puede ser discutible e imprecisa debido a que se logró, en la mayoría de los casos, mediante fotointerpretación aplicando criterios geomorfológicos.

Se utilizó la metodología propuesta por Crozier (1984) para diferenciar procesos activos e inactivos, tal como actividad y forma de la cicatriz, presencia o ausencia de vegetación, diferenciación del tipo de vegetación entre el depósito y su entorno, depresiones rellenas o no, grado de erosión del depósito, grado de integración y modificación de la red de drenaje, existencia de bloques con superficies de fractura fresca o meteorizada.

En el caso particular del grado de activi-

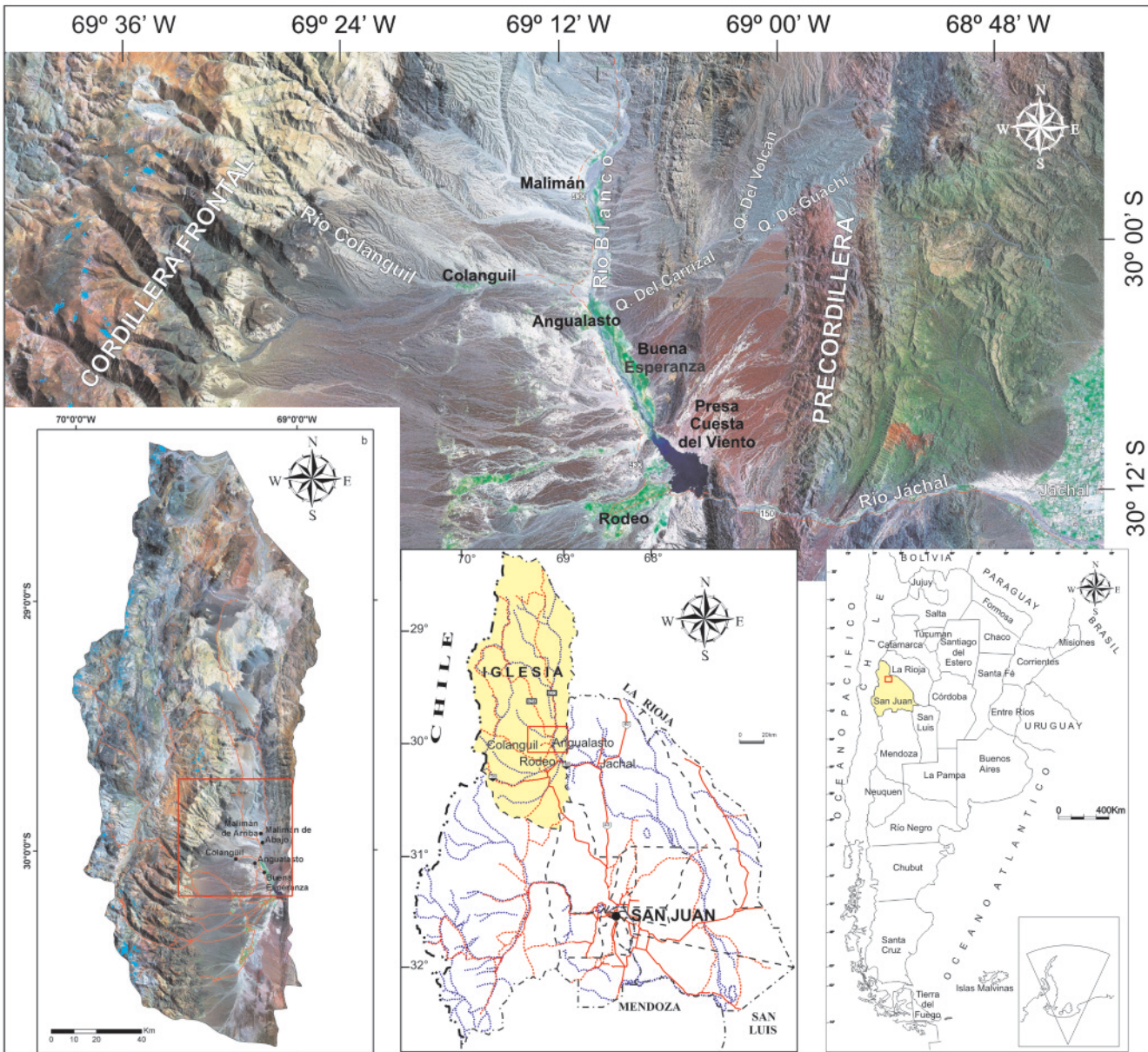


Figura 1: Ubicación del área de estudio.

dad de la reptación de permafrost (glaciares de escombros), se utilizó criterio morfológico de Wahrhafting y Cox (1959) y Martin y Whalley (1987). En general se puede decir que un glaciar de escombros activo posee una escarpa frontal pronunciada, con pendientes superiores a 35° y una morfología de flujo bien desarrollada con cordones o crestas longitudinales separadas por valles o surcos en forma de V, mientras que los inactivos poseen un escarpe frontal poco inclinado y pequeños lagos distribuidos en su superficie que sólo pueden ser explicados por el derreti-

miento del hielo, los primeros síntomas de inactividad vienen dados por la colonización vegetal del frente y por el desarrollo de un abanico de detritos al pie del talud frontal. Finalmente los glaciares de escombros fósiles poseen una topografía redondeada y varios metros de subsidencia como consecuencia del derretimiento del hielo. Han sido utilizadas imágenes satelitales Landsat (MDA Federal 2004), imágenes Spot 5 (CNES 2008) e imágenes QuickBird (Digital Globe 2002). Teniendo en cuenta el conjunto de facto-

res que condicionan la ocurrencia de los procesos de remoción en masa, se han seleccionado variables que se considera pueden condicionar en mayor medida el desarrollo de los procesos. El tratamiento de las variables de tipo espacial se ha llevado a cabo en el entorno SIG. Para el tratamiento del conjunto de la información se ha utilizado una resolución espacial de 15 x 15 m, esto significa que toda la información cartográfica se ha rasterizado por tanto, a un tamaño de píxel de 15 x 15 m. Se confeccionó un modelo digital de ele-

vaciones (MDE) a partir de información topográfica obtenida de la Misión Topográfica Radar Shuttle (USGS 2006), y a base de este se creó un modelo de pendientes, de orientaciones y de insolación. Para la información litológica han sido utilizadas Hojas Geológicas del Servicio Geológico Minero Argentino (SEGEMAR) 3169-I. Rodeo (Cardó *et al.* 1998) y 2969-III. Malimán (Cardó *et al.* 2001) a escala 1:250.000 y la Hoja Geológica 17b. Guadacol (Furque 1963), a escala 1: 200.000 de la Dirección Nacional de Geología y Minería.

En el cuadro 1 se presenta, a modo de resumen, cada variable, su definición, rango y unidades.

PROCESOS DE REMOCIÓN EN MASA

Clasificación

Para el presente trabajo se propone utilizar la clasificación de Corominas y García (1997), con el objeto de poder incluir los flujos lentos, como la solifluxión (*solifluction*) y reptación (*creep*), comunes en el área de estudio y que a criterio de la autora del presente trabajo, quedan incluidos dentro de la definición de un proceso de remoción en masa.

Por su parte los glaciares de escombros son clasificados por Outcalt y Benedict (1965) según su posición topográfica, como glaciares de escombros de fondo de valle (*valley-floor rock glaciers*), o de pared de valle (*valley-wall rock glaciers*). Por génesis son clasificados como de origen glaciogénico o como de origen criogénico. Los glaciogénicos (Outcalt y Benedict 1965, Barsch 1969, Corte 1976a) son aquellos en los que el glaciar de escombros es producto del soterramiento progresivo y subsiguiente deformación de un núcleo de hielo glaciar. Los de tipos criogénicos (Wahrhaftig y Cox 1959, Barsch 1969, Haeberli 1985), se forman localmente por la acumulación de nieve y detrito en forma de avalanchas en pequeños circos, aunque a veces son formados por grandes deslizamientos individuales. De esta forma se genera una acumulación de tipo estratificada en don-

CUADRO 1: Variables temáticas, su definición, rango y unidades.

Variable	Definición	Rango (mín-máx) [unidades]
Elevaciones (MDE)	Elevación respecto del nivel del mar	1585 a 5643 [m s.n.m.]
Pendientes (MDP)	Desnivel por distancia	0 a 49 [grados]
Orientaciones (MDO)	Orientación de las pendientes	-1 a 359 [grados]
Insolación (MDI)	Insolación media mensual	296850 a 540211 [WH/m ²]
Litología	Tipo de materiales aflorantes	Categorico

de se alternan capas más ricas en hielo o en detrito. Cuando las acumulaciones invernales no son significativas, el detrito suele hacer de sostén primario, mientras que el hielo se dispone en forma intersticial.

Tipos de procesos de remoción en masa identificados

Se identificaron un total de 760 geofor- mas vinculadas a procesos de remoción en masa, de diversas dimensiones (desde 0,001 km² a 8,211 km²), de ellas 24 (3,15 %) han sido identificadas como avalanchas de detritos, 212 (27,89 %) zonas de caída de roca (conos coluviales y talud), 6 (0,79 %) deslizamientos, 346 (45,53 %) *debris flows*, 158 (20,79 %) zonas con reptación de permafrost (glaciares de escombros) y 14 (1,84%) campos de solifluxión.

En relación a la superficie ocupada por los procesos de remoción en masa identificados, éstos cubren un área total de 93,63 km² correspondientes al 4,30 % del área total analizada (2175,88 km²). De los 93,63 km² ocupados por estos procesos, el 45,34 % corresponden a *debris flows* (42,45 km²), el 18,59 % a zonas con solifluxión (14,40 km²), el 12,71 % (11,90 km²) a zonas con reptación de permafrost (glaciares de escombros), el 11,40% a avalanchas de detritos (10,67 km²), el 9,96 % a zonas de caída de rocas (9,32 km²) y finalmente, ocupando una superficie total de 1,88 km² (2,01 %), los deslizamientos.

En términos de actividad, de las 760 geofor- mas mapeadas el 76,71 % (583) son activas, el 18,03 % (137) inactivas y el 5,13 % (39) son fósiles (Cuadro 2).

Los deslizamientos identificados en el área de estudio no muestran evidencia de actividad actual, ya que no se observa generación de nuevas grietas ni posibles cicatrices que puedan dar lugar a una reactivación de los mismos. En general se ha-

llan muy erosionados, vegetados, presentan superficies suaves y evidencias de la acción del viento y el agua. En su composición participan principalmente rocas ígneas (granodioritas, dacitas, gabros y dioritas) y volcánicas (tobas, andesitas, brechas, ignimbritas). En general estas geofor- mas no llegan a cubrir el km² y en sus cabeceras las pendientes no superan los 31°.

Las avalanchas de detritos tienen una alta frecuencia de ocurrencia en las sedimentitas neopaleozoicas de Cordillera Frontal. En su composición participan principalmente rocas sedimentarias (areniscas, pelitas y conglomerados) e ígneas (granitos, granodioritas).

Cabe destacar que tanto los deslizamientos como las avalanchas de detritos han sido identificados sólo en el ámbito cordillerano.

Producto de la abundancia de material detrítico resultante de la meteorización de las rocas aflorantes, es frecuente la caída de rocas (*rock fall*) en las pendientes verticales a subverticales compuestas por pequeños clastos y bloques de 2 m de diámetro. Se caracterizan porque sus sedimentos tienen disposición caótica, escasa clasificación, redondeamiento casi nulo y estratificación muy inclinada y mal definida.

Los *debris flows* constituyen uno de los procesos de remoción en masa más ampliamente distribuidos en la región, rellenando valles y quebradas y en la superficie de los abanicos aluviales. En general son depósitos de pocos metros de espesor, matriz sostén y mal seleccionados, predominan las partículas granulares (arenas, gravas, cantos y bloques).

Han sido mapeados un total de 158 zonas con reptación de permafrost (glaciares de escombros), que ocupan un área de 11,90 km². Se sitúan al pie de paredes escarpadas de circos y laderas abruptas

del valle y se alimentan en su zona de arranque por clastos generados por crioclastismo. El volumen de material transportado generalmente supera el millón de metros cúbicos, de los cuales el 40-50% suele ser clastos y el resto hielo intersticial y en lentejones (Barsch 1977, 1996, Arenson *et al.* 2002). Sólo el 25,32 % (40) corresponden a glaciares de escombros de fondo de valle (*valley floor rock glaciers*) y el resto (un total de 118) han sido clasificados como glaciares de escombros de ladera o glaciares de escombros de talud (*valley wall or talus rock glaciers*).

En términos de grado de actividad, de los 158 glaciares de escombros mapeados, el 60,1 % son considerados activos, el 28,5 % inactivos y el resto (11,4%) fósiles (Cuadro 3). En función de su génesis, sólo el 10% de los glaciares de escombros mapeados pueden ser atribuidos a un origen glaciogénico; el resto, un total de 142 son criogénicos.

Relación de los procesos de remoción en masa con los factores condicionantes

En relación a la altitud, las avalanchas de detritos son frecuentes entre los 3.000 m s.n.m. y los 4000 msnm, mientras que a altitudes menores y mayores su ocurrencia es prácticamente nula.

Los deslizamientos son más habituales entre los 3.000 m s.n.m. y los 4.000 m s.n.m. donde las laderas se ven cubiertas por delgadas capas de detritos más susceptibles a estos procesos. Los depósitos de *debris flows* son abundantes a bajas altitudes debido a que las pendientes se hacen más someras, los procesos pierden su energía de transporte y depositan su carga. Finalmente la reptación de permafrost (glaciares de escombros) y la soliflucción ocurren a elevadas altitudes por encima de los 4.000 m s.n.m., donde el ambiente periglacial encuentra su dominio.

Al examinar la distribución de los procesos de remoción en masa con la pendiente se observa que los mismos son más comunes en pendientes bajas a moderadas (6° a 30°). Esto puede ser resultado de que a elevadas pendientes (>30°), la

CUADRO 2: Grado de actividad de procesos de remoción en masa.

	Total	Activos	Inactivos	Fósiles
Avalancha de detritos	24	4 16,67 %	7 29,17 %	12 50 %
Caída	212	209 98,58 %	3 1,42 %	0 0 %
Deslizamiento	6	0 0 %	3 50 %	3 50 %
<i>Debris flows</i>	346	261 73,43 %	79 22,83 %	6 1,73 %
R de permafrost	158	95 60,13 %	45 28,48 %	18 11,39 %
Soliflucción	14	14 100 %	0 0 %	0 0 %
Total	760	583 76,71 %	137 18,03 %	39 5,13 %

CUADRO 3: Tipos de glaciares de escombros, su grado de actividad y ocurrencia.

Tipo	Fondo V	%	Talud	%	F+T	%
Activo	28	70,0	67	56,8	60,14	60,1
Inactivo	5	12,5	40	33,9	35,16	28,5
Fósil	7	17,5	11	9,3	13,33	11,4
Total	40	100	118	100	108,62	100

cobertura detrítica se hace prácticamente nula, las rocas aflorantes están expuestas a continua meteorización por lo que son más comunes procesos como caída de rocas.

En las zonas donde existe material detrítico disponible y factible a ser movilizado, son más frecuentes deslizamientos, avalanchas de detritos y la reptación de permafrost (glaciares de escombros), mientras que los *debris flows*, si bien suelen originarse en pendientes más abruptas, sus depósitos son comunes en pendientes bajas a muy bajas (0° a 15°).

La relación entre los procesos de remoción en masa y las orientaciones indican que los procesos identificados son más frecuentes en las laderas que miran al este (45° a 135°) y al sur (135° a 225°), lo cual podría deberse a que son zonas que sufren mayores oscilaciones en la humedad de la capa superficial detrítica, por estar más expuestas a ciclos humectación-dehidratación, debido a que estas laderas reciben menos radiación solar.

La insolación parece no ser un factor importante ni concluyente, aunque hay una leve diferencia a favor de las zonas con mayor insolación; esto es, menos húmedas, esto estaría en aparente contradicción con lo comentado para las orientaciones, aunque ambas variables no son equiparables. Sin embargo se considera que la provincia de San Juan recibe un promedio de 13 horas por día de radiación solar directa durante los meses de

enero y febrero, lo cual equivaldría a 835 horas de radiación solar (835.000 WH/m²), los valores obtenidos para la ocurrencia de los procesos de remoción en masa de 296.849 a 540.210 [WH/m²] o 297 a 540 horas, serían bajos en comparación.

Al discriminar por tipo de proceso vs. clase de unidad litológica se puede decir que las avalanchas de detritos son más frecuentes en las unidades pleistocenas, las zonas con caídas de rocas son más abundantes en el complejo volcánico-permotriásico, principalmente donde afloran cuerpos riolíticos afectados por diaclasas más espaciadas, dando lugar, en algunos sectores, a la generación de grandes bloques.

Las caídas son más frecuentes en las pelitas neopaleozoicas de Cordillera Frontal, las cuales están afectadas por una fuerte meteorización. Los *debris flows* lo son en los depósitos cuaternarios, donde existe gran disponibilidad de material menos competente. La reptación de permafrost (glaciares de escombros) y la soliflucción son más frecuentes en los aglomerados, tobas, ignimbritas, andesitas y riolitas permotriásico, esto se debe a que este grupo está asociado a zonas donde actúa un intenso crioclastismo que favorece la producción de gran cantidad de material detrítico susceptible a ser movilizado.

DISCUSIÓN

Barsch (1996) caracteriza a los glaciares

de escombros (*rock glaciers*) como expresiones geomorfológicas de reptación en permafrost de montaña. Haerberli (1996) y Giardino y Vick (1987) describen a un glaciar de escombros como un cuerpo de detritos congelados con hielo intersticial y lenticular que se mueve lentamente pendiente abajo, por deformación plástica y reptación del permafrost, formando lenguas o lóbulos, que presenta un frente escarpado y en su superficie se desarrollan surcos u hondonadas y crestas características, los que son, en general, perpendiculares a la dirección del flujo; representan un ejemplo extremo de reptación de permafrost que ocurre cuando detritos ricos en hielo son deformados pendiente abajo por la influencia de la gravedad.

Si bien no es común y puede prestarse a discusión considerar a los glaciares de escombros (*rock glaciers*) como procesos de remoción en masa, al comparar su definición con la de los procesos de remoción en masa de Cruden (1991) y Cruden y Varnes (1996), resulta lógico, a criterio de la autora del presente, considerar a un glaciar de escombros (*rock glacier*) como la geoforma resultante del proceso de remoción en masa reptación de la clasificación de Corominas y García (1997).

Además, resultaría de suma importancia incluirlos en los inventarios de procesos de remoción en masa, debido a que numerosas investigaciones han reconocido su valor hidrológico, ya que por su estructura interna constituyen reservorios naturales de agua (Corte 1976b, Barsch 1996, Brenning 2005a, b, Brenning y Azócar 2008, Azócar y Brenning 2010), principalmente en las regiones montañosas áridas y semiáridas, donde su importancia es significativamente mayor al contribuir a la escorrentía superficial de los ríos de montaña, especialmente durante los meses secos.

Finalmente, los glaciares escombros representan fuentes potenciales de otros procesos de remoción en masa (Kääb *et al.* 2007, Harris *et al.* 2009). A consecuencia de la pérdida del hielo cementante y erosión retrocedente existen grandes cantidades de material detrítico susceptibles

de ser movilizados y la ocurrencia de sismos, lluvias intensas y actividades antrópicas, podría resultar en la subsecuente generación de *debris flows* (Stoffel 2010).

CONCLUSIONES

La zona de estudio está efectivamente afectada por un gran número de procesos de remoción en masa, siendo los más abundantes y perjudiciales los *debris flows* de la Cordillera Frontal.

Es muy escasa la información histórica sobre la ocurrencia de dichos procesos en la región de estudio, debido a que las localidades estudiadas no son cabeceras departamentales, sólo se cuenta con algunas crónicas periodísticas sobre la ocurrencia de flujos que han afectado principalmente a los poblados de mayor importancia en el departamento, como Rodeo, Bella Vista, etc.

Entre los 3.000 m s.n.m. y los 4.000 m s.n.m. los terrenos son más susceptibles a la ocurrencia de avalanchas de detritos y deslizamientos, mientras que entre los 4.000 y 5.000 m s.n.m. lo son la reptación de permafrost (glaciares de escombros) y la solifluxión.

Puede verse que los procesos de remoción en masa identificados son más frecuentes en las laderas que miran al este (45° a 135°) y el sur (135° a 225°), lo cual podría deberse a que son zonas que sufren mayores oscilaciones en la humedad de la capa superficial, por estar más expuestas a ciclos humectación-deseccación, debido a que estas laderas reciben menos radiación solar.

En el caso de la litología, parece claro que hay dos tipos litológicos claramente más propensos a experimentar estos procesos, las areniscas, pelitas, conglomerados y calizas neopaleozoicos y los aglomerados, tobas, ignimbritas, andesitas, riolitas y dacitas permotriásicas.

Las zonas más susceptibles a la ocurrencia de *debris flows* son aquellas de poca altitud (2.000 m s.n.m.), con laderas orientadas hacia el sur, de baja pendiente, donde afloran depósitos cuaternarios y que reciben la menor insolación.

Es preciso seguir realizando inventarios sistemáticos de nuevos eventos con el fin de mejorar los análisis y contrastar los resultados obtenidos anteriormente.

Finalmente, los resultados obtenidos en este estudio implican un importante avance en el conocimiento de la distribución y la ocurrencia de los procesos de remoción en masa en la provincia de San Juan, constituyen una herramienta de base para los ingenieros, al momento de diseñar medidas de contención y/o mitigación que ayuden a reducir pérdidas y al elegir posibles locaciones para la construcción de nuevas infraestructuras.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo de investigación ha sido financiado por CONICET. La autora expresa su sincero agradecimiento al Dr. Emilio F. González Díaz y a un árbitro anónimo cuyas valiosas sugerencias contribuyeron a mejorar el original.

TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

- Amos, A.J. y Roller, E.O. 1965. El Carbonífero marino en el Valle Calingasta-Uspallata (San Juan-Mendoza). Boletín de Informaciones Petrológicas 368: 50-72, Buenos Aires.
- Arenson, L., Hoelzle M. y Springman, S. 2002. Borehole deformation measurements and internal structure of some rock glaciers in Switzerland. Permafrost and Periglacial Processes 13: 117-135.
- Ayala, F.J., Elízaga, E., González de Vallejo, L.I., Durán, J.J., Beltrán de Heredia, F., Oliveros, M.A., Carbó, A., Guillamont, M.L. y Capote, R. 1987. Impacto económico y social de los riesgos geológicos en España, IGME, 138 p., Madrid.
- Azócar, G. y Brenning, A. 2010. Hydrological and geomorphological significance of rock glaciers in the dry Andes, Chile (27°-33°S). Permafrost and Periglacial Processes 21(1): 42-53.
- Barsch, D. 1969. Studien und Messungen an Blockgletschern in Macun, Unterengadin. Z. Geomorphology Supplements 8: 11-30.
- Barsch, D. 1977. Alpiner Permafrost-Ein Beitrag zur seiner Verbreitung, zur seiner Charakteristik und seiner Ökologie am Beispiel der

- Schweizer Alpen. Abhandl.d.Akadamed. Wissenschaft. Göttingen, Math.-Physik. Kl. 3, 3, Folge 31:118-141.
- Barsch, D. 1996. Rockglaciers. Indicators for the Permafrost and Former Geocology in High Mountain Environment. Springer, Series in the Physical Environment 16, 331 p., Berlín.
- Beer, J.A., Allmendinger, R.W., Jordan, T.E. y Figueroa, D. 1990. Seismic stratigraphy of a Neogene piggyback basin, Argentine. American Association of Petroleum Geologists, Bulletin 74: 1183-1202.
- Brenning, A. 2005a. Climatic and geomorphological controls of rock glaciers in the Andes of Central Chile: Combining statistical modelling and field mapping. Tesis doctoral, Humboldt-Universität zu Berlin, (inédito), 136 p., Berlín.
- Brenning, A. 2005b. Geomorphological, hydrological and climatic significance of rock glaciers in the Andes of Central Chile (33-35°S). Permafrost and Periglacial Processes 16(3): 231-240.
- Brenning, A. y Azócar, G. 2008. Mapping and modeling rock glacier distribution in the dry Andes: a progress report. 4° Alexander von Humboldt International Conference, Abstract, Santiago.
- Cardó, R., Díaz, I., Cegarra, M., Rodríguez, R., Heredia, N. y Santamaría, G. 1998. Hoja Geológica 3169-I. Rodeo, escala 1: 250.000. Servicio Geológico Minero Argentino, 70 p., Buenos Aires.
- Cardó, R., Díaz, I., Poma, S., Litvak, V., Santamaría, G. y Limarino, C.O. 2001. Hoja Geológica 2969-III. Malimán. escala 1: 250.000. Servicio Geológico Minero Argentino, 67 p., Buenos Aires.
- CNES (Centro Nacional de Estudios Espaciales francés). 2008. Imagen SPOT 5 Centro de escena: -29.959/-69.4381. Referencia de escena: 56724100804021441472J.
- Collantes, M. 1999. Caracterización de los procesos de remoción en masa en la cuenca del río Tañi, Tucumán, Argentina. 1° Congreso Argentino de Cuaternario y Geomorfología, Actas: 113-122, Santa Rosa.
- Collantes, M., Sayago, J.M., Karlsson, A. 2002. Flujos de detritos Pleistocenos-Holocenos en el piedemonte occidental de Cumbres Calchaquíes, provincia de Tucumán, Argentina. 11° Congreso Peruano de Geología, Actas 1: 14, Lima.
- Collantes, M. 2003. Evidencias de movimientos en masa episódicos durante el Pleistoceno tardío-Holoceno, en el piedemonte occidental de Cumbres Calchaquíes, Tucumán, Argentina. En M.Collantes, J.M. Sayago y L. Neder (eds.) Cuaternario y Geomorfología: 55-66, Tucumán
- Corominas J. y A. García. 1997. Terminología de los movimientos de laderas (conferencia). 4° Simposio nacional sobre taludes y laderas inestables, Actas 2: 320-329, Granada.
- Corte, A. 1976a. Rock glaciers. Biuletyn Peryglacjalny 26: 175-197.
- Corte, A. 1976b. The hydrological significance of rock glaciers. Journal of Glaciology 17: 157-158.
- Crozier, M.J. 1984. Field assessment of slope instability. En D. Brunsten y D.B. Prior (eds.) Slope Instability: 103-142, Chichester
- Cruden, D.M. 1991. A Simple Definition of a Landslide. Bulletin of the International Association of Engineering Geology 43: 27-29.
- Cruden, D.M. y Varnes, D.J. 1996. Landslide types and processes. En Turner, A.A.K. y Schuster, R.L. (eds.) Landslides. Investigation and Mitigation. Transportation Research Board, Special Report 247, National Academy Press, 36-75. Washington, DC.
- Digital Globe 2002. Imágenes QuickBird, ID: 1010010004AF1801, ID: 10100100052D9301, ID: 1010010000DE8604.
- Espizúa, L.E. y Bengochea, J. 1991. A Pleistocene landslide in the Rio Mendoza valley. Mendoza. 13° INQUA Congress Chinese Academy of Sciences, Beijing.
- Fauqué, L., Cortés, J.M., Folguera, A. y Etcheverría, M. 2000. Avalanchas de rocas asociadas a neotectónica en el valle del río Mendoza, al sur de Uspallata. Revista de la Asociación Geológica Argentina 55(4): 419-423.
- Fauqué, L., Cortés, J.M., Folguera, A. y Echeverría, M. 2001. Avalanchas de rocas asociadas a neotectónica en el valle del río Mendoza. Peligrosidad geológica asociada. Hoja 3369-15, Potrerillos, provincia de Mendoza. Servicio Geológico Minero Argentino, Serie Contribuciones, Peligrosidad Geológica N°2, 57 p., Buenos Aires.
- Fernández, D.S. 2005. The giant paleo-landslide deposits of Tañi del Valle, Tucumán Province, Argentina. Geomorphology 70: 97-111.
- Fernández, D.S. y Lutz, M.A. 2003. Procesos de remoción en masa y erosión fluvial en la quebrada del río Los Sosa, provincia de Tucumán. Revista Asociación Geológica Argentina 58(2): 255-266.
- Furque, G. 1963. Descripción Geológica de la Hoja 17b -Guandacol. Boletín Dirección Nacional de Geología y Minería 92: 1-104. Buenos Aires.
- Giardino, J. y Vick, S. 1987. Geologic engineering aspects of rock glaciers. En Giardino, J., Shroder, J. y Vitek, J. (eds.) Rock Glaciers, Allen and Unwin: 265-287, London.
- González Díaz, E.F. 1998a. Mapa Geomorfológico de la Hoja Geológica Las Ovejas (Provincia del Neuquén), escala 1:250.000. Dirección de Geología Ambiental y Aplicada. SEGEMAR, (inédito), Buenos Aires.
- González Díaz, E.F. 1998b. Mapa-Inventario de grandes movimientos gravitacionales en la zona comprendida por los paralelos 36°00' y 37°00'S y el meridiano 70°00'O y el límite argentino-chileno. Dirección de Geología Ambiental y Aplicada, SEGEMAR, (inédito), Buenos Aires.
- González Díaz, E.F. 2003. El englazamiento en la región de la caldera de Caviahue-Copahue: su reinterpretación. Revista de la Asociación Geológica Argentina 58(3): 356-366.
- González Díaz, E.F. 2004. La extensa zona de deslizamientos de la escarpa oriental de la Pampa de Salamanca, Chubut, entre los 45°00'S y 45°45'S. Revista de la Asociación Geológica Argentina 59(4): 743-762.
- González Díaz, E.F. 2005. Geomorfología de la región del volcán Copahue y sus adyacencias (centro-oeste del Neuquén, Argentina). Revista de la Asociación Geológica Argentina 60(1): 58-73.
- González Díaz, E.F. 2009b. Deslizamientos al norte de la población de Tricao Malal, noroeste del Neuquén. Revista de la Asociación Geológica Argentina 65(3): 545-550.
- González Díaz, E.F. 2009b. Síntesis histórica del estudio del proceso de la remoción en masa en la Argentina. Revista de la Asociación Geológica Argentina 65(4): 688-690. Buenos Aires.
- González Díaz, E.F. y Folguera, A. 2005. El reconocimiento de avalanchas de rocas y deslizamientos de bloques rocosos prehistóricos en el área andina de Neuquén (37°15'-37°30'S). Revista de la Asociación Geológica Argentina 60(3): 446-460.
- González Díaz, E.F. y Folguera, A. 2006. La avalancha de rocas de Pilun Challa: ratificación de una única glaciación en la región de Cavia-

- hue-Copahue y sus adyacencias (Neuquén). *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 61(1): 19-30.
- González Díaz, E.F. y Folguera, A. 2009. Los deslizamientos de la cordillera neuquina al sur de los 38° S: su inducción. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 64(4): 569-585.
- González Díaz, E.F., Fauqué, L.A., Giaccardi, A.D. y Costa, C.H. 2000. Las lagunas de Varvar Co Campos y Varvar Co Tapia (N del Neuquén, Argentina): su relación con avalanchas de rocas. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 55(3): 147-164.
- González Díaz, E.F., Giaccardi, A.D. y Costa, C.H. 2001. La avalancha de rocas del río Barrancas (Cerro Pelán), norte del Neuquén: su relación con la catástrofe del río Colorado (29/12/1914). *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 56(4): 466-480.
- González Díaz, E.F., Costa, C.H. y Giaccardi, A.D. 2003. El complejo deslizamiento del Ailínco-Cerro Papas-Las Olletas (Departamento Minas, norte del Neuquén). *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 58(2): 194-200.
- González Díaz, E.F., Folguera, A. y Hermanns, R. 2005. La avalancha de rocas del cerro Los Cardos (37°10'S, 70°53'O) en la región norte de la provincia del Neuquén. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 60(1): 207-220.
- Haerberli, W. 1996. On the morphodynamics of ice/debris-transport systems in cold mountain areas. *Norsk Geografisk Tidsskrift* 50: 3-9.
- Harris, C., Arenson, L.U., Christiansen, H.H., Etzelmüller, B., Frauenfelder, R., Gruber, S., Haerberli, W., Hauck, C., Hölzle, M., Humlum, O., Isaksen, K., Kääb, A., Kern-Lütschig, M.A., Lehnig, M., Matsuoka, N., Murton, J.B., Nötzli, J., Phillips, M., Ross, N. y Seppälä, M. 2009. Permafrost and climate in Europe: monitoring and modelling thermal, geomorphological and geotechnical responses. *Earth Science Review* 92: 117-171.
- Kääb, A., Frauenfelder, R. y Roer, I. 2007. On the response of rock glacier creep to surface temperature increase. *Global and Planetary Change* 56: 172-187.
- Martin, H.E. y Whalley, W.B. 1987. Rock glaciers. Part 1: Rock glacier morphology, classification and distribution. *Progress in Physical Geography* 11: 260-282.
- MDA Federal 2004. Landsat GeoCover ETM+ 2000 and 1990/TM Edition Mosaics Tile S-19-30.ETM-EarthSat-MrSID and S-19-25. ETM-EarthSat-MrSID, 1.0, USGS, Sioux Falls.
- Minetti, J.L., Barbieri, P., Poblete, A.G. y Sierra, E. 1986. El Régimen de precipitaciones de la provincia de San Juan y su entorno. Informe Técnico Nro. 8 CIRSAS, CONICET, IPG-HOEA, (inédito), 200 p., San Juan.
- Moreiras, S.M. 2003a. Remoción en masa en un sector del valle del Río o Mendoza. Mendoza, Argentina. *Revista Científica de la Universidad Nacional de La Rioja* 4(1-2): 2-10.
- Moreiras, S.M. 2003b. Pleistocene Landslide Dam on Rio Mendoza Valley, Mendoza province, Argentina. *Regional Geomorphology Conference*: 46-47, Distrito Federal.
- Moreiras, S.M. 2004a. Landslide incidence zonation in the Rio Mendoza Valley, Mendoza province, Argentina. *Earth Surface Proces and Landforms* 29: 255-266.
- Moreiras, S.M. 2004b. Zonificación de peligrosidad y riesgo de procesos de remoción en masa en el valle del Río Mendoza. Tesis doctoral, Universidad Nacional de San Juan, (inédito), 135 p., San Juan.
- Moreiras, S.M. 2005a. Landslide susceptibility zonation in the Rio Mendoza Valley, Argentina. *Geomorphology* 66 (1-4): 345-357.
- Moreiras, S.M. 2005b. Climatic effect of ENSO associated with landslide occurrence in the Central Andes, Mendoza Province, Argentina. *Landslide* 2: 53-59.
- Moreiras, S.M. 2006a. Chronology of a Pleistocene rock avalanche probable linked to neotectonic, Cordon del Plata (Central Andes), Mendoza-Argentina. *Quaternary International* 148: 138-148.
- Moreiras, S.M. 2006b. Frequency of debris flows and rockfall along the Mendoza river valley (Central Andes), Argentina. *Quaternary International* 158: 110-121.
- Moreiras, S.M. 2009. Análisis estadístico probabilístico de las variables que condicionan la inestabilidad de las laderas en los valles de los ríos Las Cuevas y Mendoza. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 65 (4): 780-790.
- Moreiras, S.M., Lenzano M.G. y Riveros N. 2008. Inventario de procesos de remoción en masa en el Parque provincial Aconcagua, provincia de Mendoza-Argentina. *Multequina Inca* 17: 129-146.
- Outcalt, S.E. y Benedict, J.B. 1965. Photointerpretation of two types of rock glacier in the Colorado Front Range, U.S.A. *Journal of Glaciology* 5(42): 849 - 856.
- Perucca, L. 1992. Fenómenos de remoción en masa y eventos sísmicos en la sierra de La Punilla. *Precordillera noroccidental argentina. 2° Simposio de Fallas Activas y Deformaciones Cuaternarias en la Cordillera de Los Andes. Actas 1*: 52-53, Caracas.
- Perucca, L. y Esper Angillieri, M.Y. 2008. A preliminary inventory of periglacial landforms in the Andes of La Rioja and San Juan, Argentina, at about 28°S. *Quaternary International* 190: 171-179.
- Penna, I.M., Hermanns, R.L. y Folguera, A. 2008 a. Remoción en masa y colapso catastrófico de diques naturales generados en el frente orogénico andino (36°-38°S). Los casos Navarrete y Carrilauquen. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 63(2): 172-180.
- Penna, I.M., Ortiz Avila, S., Folguera, A. y Hermanns, R.L. 2008b. Deformación cuaternaria entre los valles Reñileuvú y Guañacos (Faja Plegada y Corrida de Guañacos, provincia de Neuquén): mecanismos de deformación y relación con los procesos de remoción en masa 17° Congreso Geológico Argentino, Actas 1: 305-306, Jujuy.
- Rolleri, E. y Baldi, B. 1969. Paleography and distribution of Carboniferous deposits in the Precordillera, Argentina. *La estratigrafía del Gondwana, Ciencias de la Tierra* 2: 1005-1024.
- Scalabrini-Ortiz, J. 1972. El Carbónico en el sector septentrional de la Precordillera sanjuana. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 27(4): 351-377.
- Stoffel, M. 2010. Magnitude-frequency relationships of debris flows-a case study based on field surveys and tree-ring records. *Geomorphology* 116:67-76.
- USGS. 2006. Shuttle Radar Topography Mission, 3 Arc Second scene SRTM_u03_p232r081, SRTM_u03_p233r080 and SRTM_u03_p233r081, Unfilled Finished 2.0, Global Land Cover Facility, University of Maryland, College Park, Maryland.
- Wahrhaftig, C. y Cox, A. 1959. Rock glaciers in the Alaska Range. *Geological Society of America Bulletin* 70: 383-436.

Recibido: 17 de agosto, 2010.

Aceptado: 29 de abril, 2011.