

Análisis de susceptibilidad de movimientos de remoción en masa a escala regional en un sector de la Puna Argentina

Diego Sebastián FERNÁNDEZ^{1,2}

Abstract: *ANALYSIS OF SUSCEPTIBILITY OF DEBRIS FLOWS AT REGIONAL SCALE IN THE ARGENTINE PUNA.* In this work a new methodology for mass movements susceptibility zoning analysis, including both occurrence and propagation of the movements, is proposed. The study was performed in a region of the Puna plateau, Argentina, between San Antonio de Los Cobres and Olcapato localities in the province of Salta. The methodology was implemented at 1:100.000 scale allowing a regional susceptibility zoning of the occurrence and propagation of different mass wasting movements. GIS techniques were used for the evaluation and weighting of the different layers under analysis. Trigger factor assessment, precipitations, was performed using the modified Fournier aggressivity index and a rain accumulation index. As intrinsic terrain control factors that control slope stability slope gradient, Melton ruggedness number, distance to rivers and lithology were computed. The occurrence of the movements was modeled using the above control factors. Then flow propagation was calculated with *Flow-R* software using the SRTM 30m digital elevation model (DEM). The model was evaluated with control field data from a landslide inventory of the area and showed good agreement between high mass movements susceptibility zones and landslide locations observed in the field. High precision multi-satellite data have allowed the development of the model in a region where climatic registers are scarce or absent. In combination with SRTM 30m data, used for geomorphometric parameters, the model has showed to be useful for landslide hazard zoning in areas over 4000 masl where the access is difficult by terrestrial media.

Resumen: En este trabajo se propone una metodología para el análisis tanto de las zonas en donde se inician los movimientos de remoción en masa como de aquellos sectores que pueden verse afectados por la propagación de los mismos pendiente abajo. El estudio fue llevado a cabo en un área de la Puna argentina, localizada entre los poblados de San Antonio de Los Cobres y Olcapato en la provincia de Salta. Esta metodología fue implementada a escala 1:100.000 y permite obtener una zonificación del grado de susceptibilidad del terreno a la generación y propagación de los movimientos de remoción en masa mediante la combinación de la valoración y ponderación relativa de los factores que controlan este tipo de movimientos bajo un entorno SIG. El principal factor disparador de estos movimientos en la zona son las precipitaciones estivales y para su análisis regional se trabajó con el índice de agresividad climática de Fournier y el índice de acumulación de lluvia. Como factores intrínsecos del terreno que controlan la inestabilidad de las laderas se utilizaron la pendiente, el índice de rugosidad de Melton, la distancia a los ríos y el tipo de litología. A partir de los factores antes mencionados se modeló las áreas en donde se originan este tipo de movimientos. Luego la propagación de los flujos fue calculada mediante el programa *Flow-R* a partir de un modelo digital de terreno SRTM de 30 metros de tamaño de celda. El modelo fue evaluado con información de campo en donde se realizó un inventario de movimientos de remoción en masa observándose un buen ajuste entre las zonas de alta susceptibilidad y el lugar de ocurrencia de los distintos tipos de movimientos. El uso de información de precipitaciones obtenidos a partir de sensores remotos de alta precisión posibilitó desarrollar este modelo en una zona donde los datos climáticos son escasos y antiguos. En combinación con datos SRTM de 30 metros, utilizado para los parámetros geomorfométricos, el modelo demostró ser útil para el relevamiento regional del peligro derivado de deslizamientos en zonas de difícil acceso situadas por encima de los 4.000 msnm.

¹ Servicio Geológico Minero Argentino (SEGEMAR). Delegación Tucumán. Miguel Lillo 251 - 2 Piso. 4000. Tucumán, Argentina.
e-mail: diegofernandez@segemar.gov.ar

² Facultad de Ciencias Naturales e IML. Universidad Nacional de Tucumán. Miguel Lillo 205. 4000. Tucumán, Argentina

Palabras clave: Peligrosidad geológica. Zonación regional. Puna. Argentina.

Key words: Natural hazards. Regional zoning. Puna. Argentina.

Introducción

La habilidad para predecir las zonas propensas a deslizarse depende en gran medida de la escala en que se realiza el trabajo, y por lo tanto de la extensión areal del sector de estudio, como así también, de la información geomorfológica, climática y de los lugares en donde se manifiestan los procesos dentro de esa área. Los modelos de base física normalmente requieren de una gran cantidad de datos geotécnicos e hidrológicos que difícilmente se cuente para una región amplia y por lo tanto son aplicados a escala de cuenca o de más detalle aún (Montgomery y Dietrich, 1994; Baum *et al.*, 2010). Los estudios empíricos a nivel regional se basan en capas de información referente tanto a los factores geoambientales (pendiente, litología, etc.) que controlan el desarrollo de los procesos de

remoción en masa como de los factores disparadores que los desencadenan (precipitaciones y/o sismos). El principal problema radica en el hecho de poder contar con todo ese cúmulo de información de manera homogénea para regiones que a menudo cubren cientos de kilómetros cuadrados. En este sentido la información proveniente de sensores remotos juega un papel clave para poder llevar a cabo este tipo de análisis debido a que en muchos casos se tratan de zonas de difícil acceso en donde la información primaria, como por ejemplo datos de precipitaciones, es escasa o inexistente. La misión de medición de lluvias tropicales o TRMM en inglés (*Tropical Rainfall Measuring Mission*) provee de un registro de precipitaciones estimadas que abarca desde el año 2000 hasta el presente que puede ser utilizado para la evaluación sistemática de la relación entre las precipitaciones y la

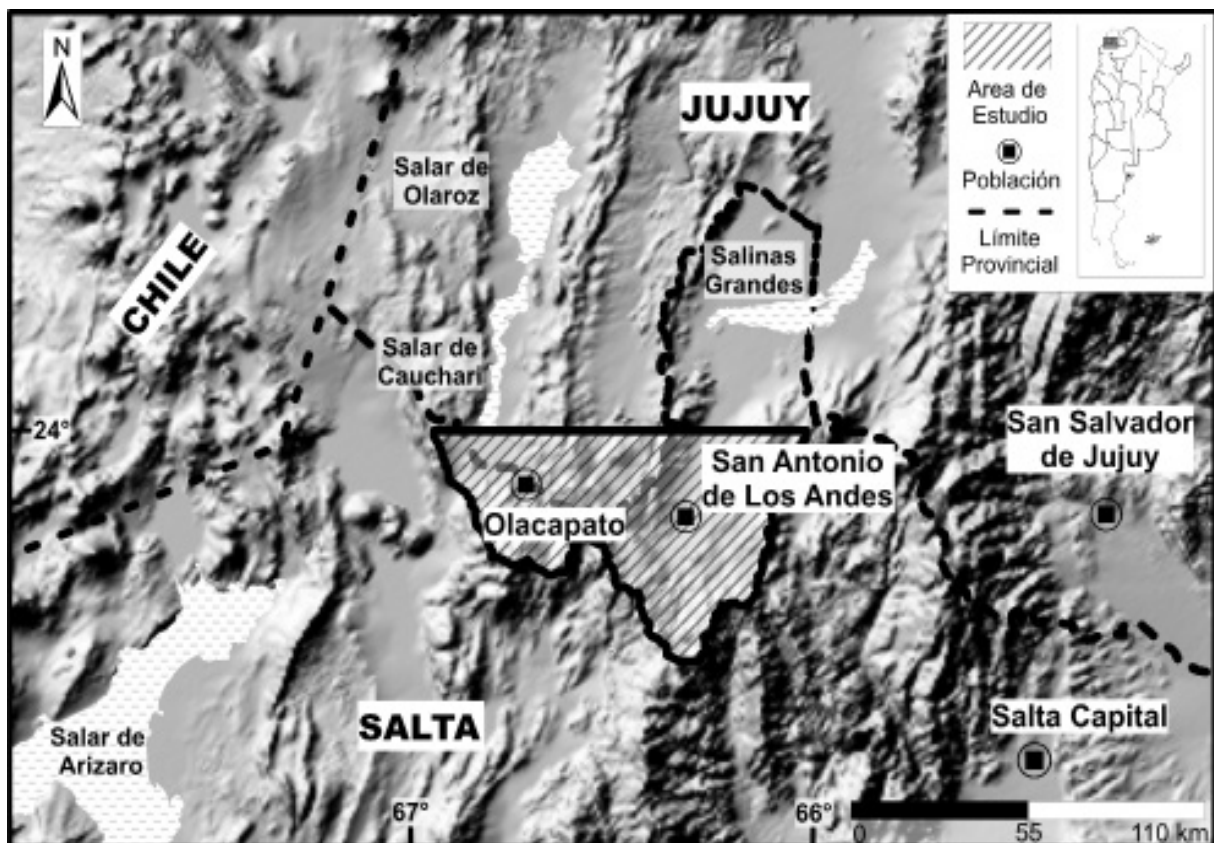


Figura 1. Ubicación del área de estudio. / Figure 1. Location of study area.

generación de deslizamientos a escalas espaciales y temporales múltiples (Ray y Jacobs, 2007; Kirchbaum *et al.*, 2015). Por otro lado, los datos de elevación de terreno brindados por la misión SRTM permiten calcular los parámetros morfométricos vinculados al control de los deslizamientos.

En este trabajo se propone una metodología para la evaluación de áreas susceptibles a los movimientos de remoción en masa a escala regional mediante el uso de información de sensores remotos de acceso libre. La capacidad predictiva del mapa final es evaluada a partir de un inventario de deslizamientos realizado en la zona de estudio.

Area de estudio

El estudio fue llevado a cabo en un área de la Puna argentina, localizada entre los poblados de San Antonio de Los Cobres y Olacapato en la provincia de Salta (figura 1) con una superficie aproximada de 3.380 km². Este sector se encuentra ubicado a 170 km al noroeste de la ciudad de Salta a una altitud aproximada de 3.600 msnm. El área está conformada por cadenas montañosas subparalelas en sentido norte-sur con valles intermontanos que responden a una génesis tectónica y un vulcanismo asociado de gran importancia.

La hidrología se encuentra caracterizada por cuencas endorreicas que en los sectores centrales de las depresiones tectónicas acumulan sedimentos y solutos conformando los salares típicos de la región. El sistema de drenaje del área de estudio abarca parte de las cuencas hídricas de las Salinas Grandes, Salar de Cauchari y Salar de Pastos Grandes.

El clima de la región es frío y seco, con una gran amplitud térmica diaria de hasta 30° C. Las lluvias son estivales y promedian generalmente entre 100 y 200 mm anuales. De acuerdo a datos climáticos para la estación San Antonio de Los Cobres, período 1949-1990, las precipitaciones medias anuales para ese período son de 113 mm con un déficit hídrico muy marcado durante todo el año. El mes de mayores preci-

pitaciones es enero con una media mensual de 47 mm.

Metodología

Los principales tipos de movimientos de remoción en masa que se observan en la región responden a flujos de detritos y deslizamientos traslacionales someros. Los principales factores disparadores de estos movimientos en la zona son las precipitaciones y la actividad sísmica, aunque con un claro predominio del primer factor. Como consecuencia de ello para este trabajo solo se tomaron a las precipitaciones como factor disparador.

La metodología seguida para la elaboración del mapa de susceptibilidad de deslizamientos a escala regional (escala 1:100.000) consta de dos componentes principales. Por un lado, se trabajó con un modelo que contemple tanto a los factores disparadores como de control de los movimientos a escala regional con el fin de determinar cuáles son las áreas más susceptibles a deslizarse. Por otro lado, como el primer modelo sólo contempla las áreas en donde se generan los movimientos, se trabajó con el modelo *Flow-R* (Horton *et al.*, 2013) para determinar hasta donde se podrían propagar esos movimientos fundamentalmente en el caso de los flujos. Por último se realizó la adición de los mapas finales obtenidos por ambos modelos para la obtención del mapa final, el que fue evaluado en base a la distribución de los deslizamientos identificados en el campo y a zonas en donde no se registraban deslizamientos. En la figura 2 puede observarse un esquema metodológico en donde se muestra los modelos utilizados y las capas de información con las que se trabajó en cada uno.

A continuación se describen los modelos utilizados para la obtención del mapa de susceptibilidad final.

Modelo Regional

La metodología seguida para la obtención del modelo regional resulta de la combi-

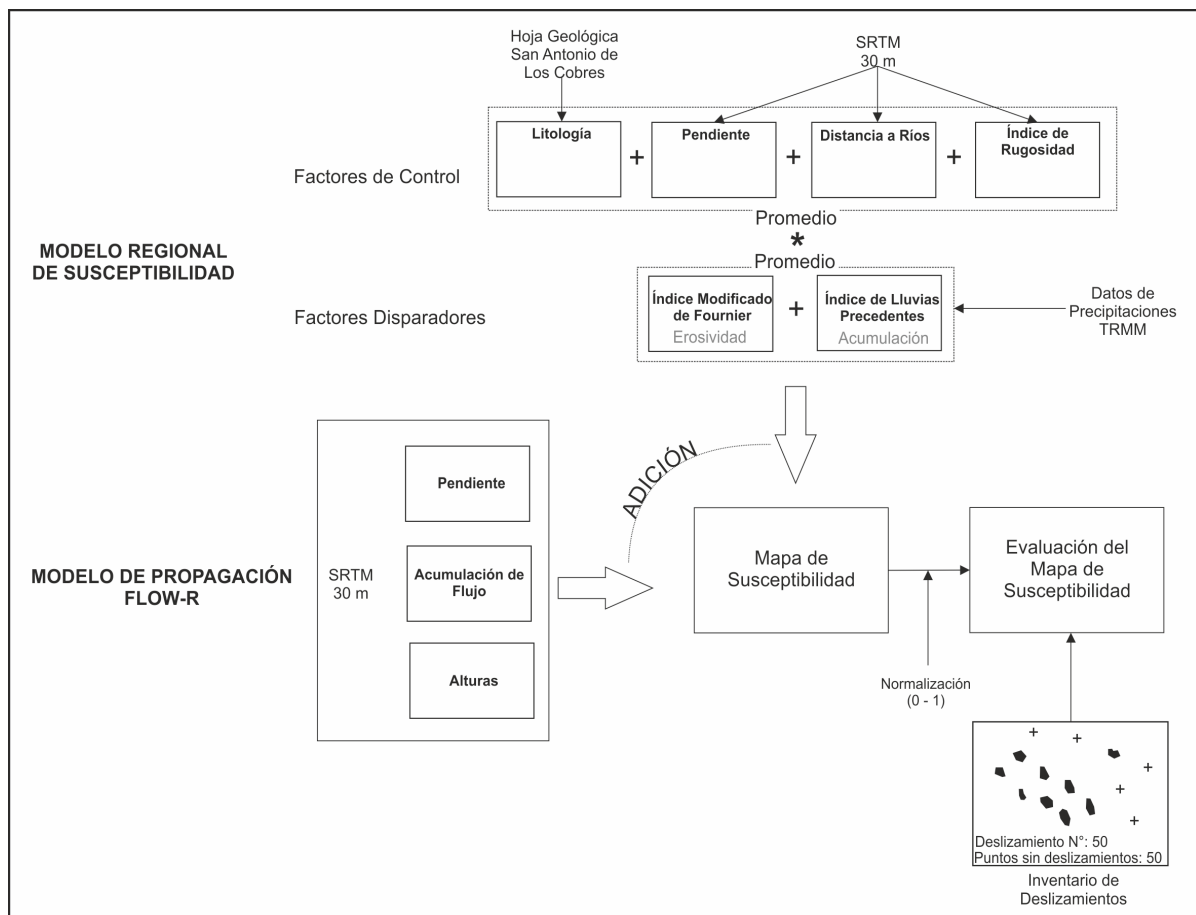


Figura 2. Esquema metodológico seguido para la realización del mapa de susceptibilidad. / **Figure 2.** Methodological flowchart for the preparation of landslide susceptibility map.

nación de varios factores que se basan en la medición de indicadores morfodinámicos y su distribución espacio-temporal. La combinación de los factores se realiza considerando que los deslizamientos ocurren cuando en una ladera, compuesta por una litología determinada, con cierto contenido de humedad y con cierta pendiente, se alcanza un grado de susceptibilidad (Mora y Vahrson, 1994).

Los factores de control considerados para el modelo fueron el tipo de litología, el grado de pendiente, la distancia a los cursos de agua y el índice de rugosidad de Melton. Los primeros dos parámetros son habitualmente utilizados en la mayoría de los modelos de susceptibilidad mientras que los dos últimos surgen del análisis estadístico realizado por Fernández y Puchulu (2015) en donde se corroboró su importancia en la generación de deslizamientos.

Para la obtención de los parámetros pen-

diente e índice de rugosidad se trabajó con datos de altura provenientes de la misión SRTM con tamaño de celda de 30 m. A este modelo de altura se le aplicó un filtro (*mesh denoise*) para remover los artefactos y luego fueron rellenadas las depresiones para el cálculo de los parámetros derivados del mismo.

Una vez que se determinaron los factores de control estos fueron divididos en clases y ponderados de acuerdo a su relación con la susceptibilidad de los terrenos a desplazarse pendiente abajo como se indica en la tabla 1. Para su clasificación se utilizaron los trabajos de Ambalagan *et al.* (2008) y Fernández (2009).

Para el análisis del factor disparador, que en el caso del presente estudio fueron consideradas sólo las precipitaciones, se trabajó con el índice de agresividad climática de Fournier (Arnoldus, 1978) y el índice de acumulación de llu-

Tipo de Dato	Fuente	Resolución	Clases	Categoría
Litología	Hoja Geológica	1:250.000	- Calizas y granitos inalterados, gabros, basaltos y andesitas	2
			- Depósitos sedimentarios bien cementados (areniscas), aluvión grueso permeable.	3
			- Depósitos sedimentarios poco cementados o con intercalaciones de arcillas, ignimbritas, tobas poco soldadas.	5
			- Rocas metamórficas fracturadas (pizarras, filitas, esquistos) y/o intrusivos alterados meteóricamente.	7
			- Rocas afectadas por alteración hidrotermal.	9
			- Aluviones recientes y material glacialacustre.	10
Pendiente	SRTM	30 metros	< 10°	2
			10° - 15°	4
			15° - 20°	6
			20° - 25°	8
			> 25°	10
Distancia a ríos	Red Hidrológica	1:100.000	Buffer < 50 metros	10
			50 - 100 metros	8
			100 - 150 metros	5
			> 150 metros	2
Índice de Rugosidad de Melton	SRTM	30 metros	< 0,3	2
			0,3-0,6	4
			0,6 - 1	6
			1 - 2	8
			> 2	10

Tabla 1. Tipo de datos utilizados para la evaluación de los factores de control del modelo regional. / **Table 1.** Base data used for the evaluation of control factors in the regional model.

vías precedentes (Kholer y Linsley, 1951). Los datos de precipitación fueron obtenidos a partir del proyecto TRMM (*Tropical Rainfall Measuring Mission*) de la Nasa en su versión 3B42 para un período de registro de 15 años (Dic. 2000-Dic. 2015). Para este estudio se trabajó con las precipitaciones diarias que se encuentran en formato geotif con un tamaño de celda de 0,25° (aproximadamente 30 km). Con el fin de mejorar la resolución se procedió a generar un archivo vectorial de puntos con los valores para el centro de las celdas del raster. Posteriormente se interpoló estos valores mediante el método IDW (*inverse distance weighting*) para lograr un segundo raster con un tamaño de celda de 5 km que fue utilizado para la obtención de los índices.

Arnoldus (1978) propuso una corrección del índice de *Fournier* original en la que se consideran no solo la precipitación mensual del mes más húmedo, sino también la del resto de

los meses. De esta forma se puede obtener la variación espacial en la erosividad de las precipitaciones parámetro que está íntimamente relacionado con la intensidad de las mismas. El índice modificado de *Fournier* (IMF) se calcula de la siguiente manera:

$$IMF = \sum_{i=1}^{12} \frac{P_i^2}{P_t}$$

donde P_i es la precipitación media mensual y P_t es la precipitación media anual.

La clasificación del IMF se realizó siguiendo el trabajo de Jordan y Bellinfante (2000) quedando los rangos de acuerdo a la tabla 2.

La otra variable que se encuentra asociada con las lluvias es determinar en qué lugares de la zona de estudio se acumula la mayor canti-

IMF (mm)	Descripción	Valor
< 60	Muy Bajo	2
60 - 90	Bajo	4
90 - 120	Moderado	6
120 - 160	Alto	8
> 160	Muy Alto	10

Tabla 2. Categorización de los valores del Índice Modificado de Fournier. / **Table 2.** Categorization of Fournier Modified Index values.

dad de agua. Para esto fue utilizado el índice de precipitación antecedente (IPA). Este índice intenta reproducir el estado de saturación de agua de una región en base a las lluvias antecedentes para un período dado. El cálculo del IPA fue realizado a partir de la siguiente ecuación:

$$IPA = \sum_{t=-1}^{-i} P_t * K^{-t}$$

donde P_t es la precipitación acumulada en el día t y K es una constante de decaimiento.

Para el cálculo del IPA se trabajó con una acumulación de 30 días para cada enero desde el año 2001 hasta el 2015 debido a que es el mes en el que más llueve. Luego se obtuvo la media para esos 15 años a partir del cual se pudo contar con un mapa de acumulación de lluvias promedio.

La clasificación del IPA se realizó calculando los percentiles 25, 50, 75 y 90 de los valores obtenidos y asignándole valores de acuerdo a la tabla 3.

El grado de susceptibilidad a los movimientos para este modelo estará dado por el producto entre los factores disparadores y los de control:

$$S = FC * FD$$

donde S es la susceptibilidad, FC los factores de control y FD los factores disparadores.

Al reemplazar los distintos factores por sus parámetros constitutivos la ecuación queda de la siguiente manera:

$$S = \left(\frac{L + P + DR + IRM}{4} \right) * \left(\frac{IMF + IPA}{2} \right)$$

donde L es la litología, P la pendiente, DR la distancia a ríos y IRM el índice de rugosidad de Melton.

IPA (percentiles)	Descripción	Valor
< 25	Muy Bajo	2
25 - 50	Bajo	4
50 - 75	Moderado	6
75 - 90	Alto	8
> 90	Muy Alto	10

Tabla 3. Categorización de los valores del Índice de Precipitación Antecedente. / **Table 3.** Categorization of the values of the Precipitation Index Background.

Modelo Flow-R

Este modelo fue aplicado debido a que además de su capacidad predictiva del área en donde se generan los flujos, principal tipo de movimiento en la zona, permite calcular su propagación. Constituye un programa de acceso libre que fue aplicado en diferentes casos de estudio en varios países y con datos de diferente calidad (Blahut *et al.*, 2010; Baumann *et al.*, 2011; Fischer *et al.*, 2012). El programa estima la propagación de los flujos de detritos mediante un balance energético básico y una propagación probabilística. Los algoritmos de la dirección de flujo calculan la probabilidad de que un flujo de detrito se mueva de una celda hacia las próximas 8 celdas. Estas probabilidades dependen de la pendiente y la persistencia que representa la inercia del flujo (Horton *et al.*, 2013). El modelo propone varios algoritmos incluido el de Holmgren (1994) cuya ecuación es la siguiente:

$$f_{si} = \frac{(\tan B_i)^x}{\sum_{j=1}^8 (\tan B_j)^x} \text{ para } \tan B > 0$$

donde i y j son las direcciones de flujo (1 a 8), f_{si} es la proporción del flujo en dirección i , $\tan B_i$ es el gradiente de pendiente entre la celda central y las otras celdas en dirección i y x es una variable exponencial cuyo valor óptimo para los flujos de detritos varía entre 4 y 6.

La propagación de los flujos fue calculada a partir de un modelo digital de terreno SRTM de 30 metros de tamaño de celda. Para su cálculo se utilizaron tres capas que fueron altura, pendiente y acumulación de flujo. Se aplicó el algoritmo de distribución de Holmgren modificado con ajuste por la inercia del movimiento y la pérdida de energía por fricción. Para el algoritmo de distribución se utilizó una diferencia de altura de la celda central de 2 m y un valor exponencial de 6. El ajuste de la inercia del mo-

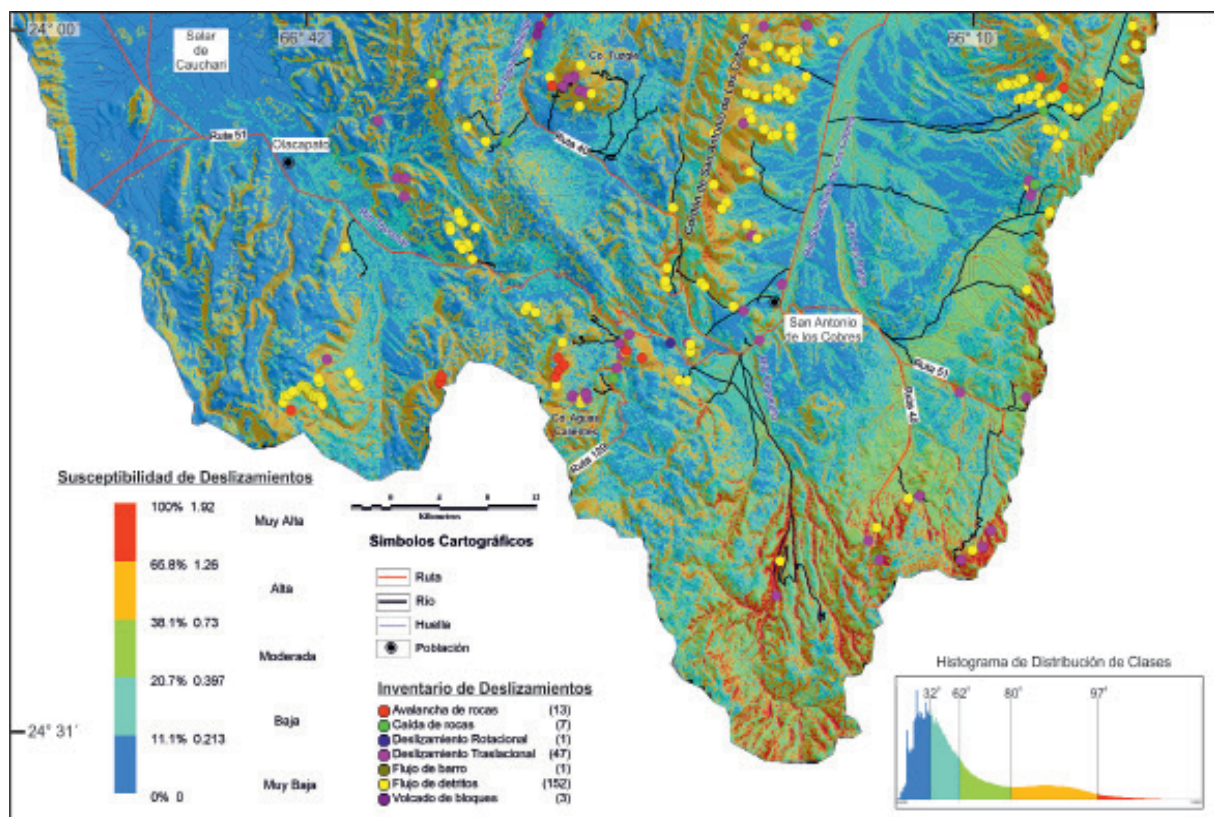


Figura 3. Mapa de susceptibilidad de deslizamientos a escala regional para el área ubicada entre las localidades de San Antonio de Los Cobres y Olacapató, provincias de Salta y Jujuy. Sobre el mapa se puede apreciar los tipos de procesos de remoción en masa registrados durante el año 2015. / **Figure 3.** Landslide susceptibility map at regional scale for the area located between the localities of San Antonio de Los Cobres and Olacapató, provinces of Salta and Jujuy. On the map are marked the different mass movements recorded during the 2015 field inventory.

vimiento fue realizada siguiendo el algoritmo inercial planteado por Gamma (2000). Para la pérdida de energía por fricción se utilizó el método de ángulo mínimo de viaje que para el caso de los flujos de granulometría gruesa ronda los 11° (Zimmermann *et al.*, 1997) y una velocidad máxima del flujo menor a 15 m/seg.

Evaluación del modelo

A partir de la superposición de los dos modelos se obtuvo el mapa de susceptibilidad final en donde los distintos grados de susceptibilidad fueron determinados mediante el método de quiebres naturales de Jenks (1967) debido a que los datos no presentaban una distribución estadística normal. Este método calcula las diferencias de valores entre los individuos estadísticos ordenados de forma creciente. Luego coloca un límite para separar los grupos donde las diferencias de valores son apreciables. En la figura 3 se puede observar el mapa de susceptibilidad final obtenido el cual fue dividido en 5 grupos o categorías de susceptibilidad (muy baja, baja, moderada, alta y muy alta) sobre el cual se superpusieron los distintos procesos de remoción en masa que fueron identificados

durante el inventario de deslizamientos llevado a cabo en el campo. En total se relevaron 224 deslizamientos dentro del área que fueron descriptos y clasificados de acuerdo al tipo de movimiento que los originó. Los tipos de movimientos descriptos fueron mayoritariamente flujos de detritos en donde se identificaron 152 movimientos, seguidos de deslizamientos traslacionales (47), avalanchas de rocas (13), caída de rocas (7), volcado de bloques (3), flujo de barro (1) y deslizamiento rotacional (1).

La figura 4a compara la distribución de las 5 categorías de susceptibilidad del mapa con el número de movimientos observados en cada categoría. Del total de procesos descriptos en el campo el 77 % cayeron en categorías alta a muy alta y sólo el 11 % en las categorías muy baja y baja a pesar de que en el mapa estas dos últimas categorías suman el 63 % del área bajo estudio. El resto (12 %) coincidieron con la categoría moderada cuya extensión abarca el 18 % del área. Al analizar la distribución de los valores de susceptibilidad obtenidos para los principales tipos de movimientos inventariados (flujos de detritos, deslizamientos traslacionales, caída de rocas y avalancha de rocas) surge que en el caso de los flujos de detritos y avalancha de de-

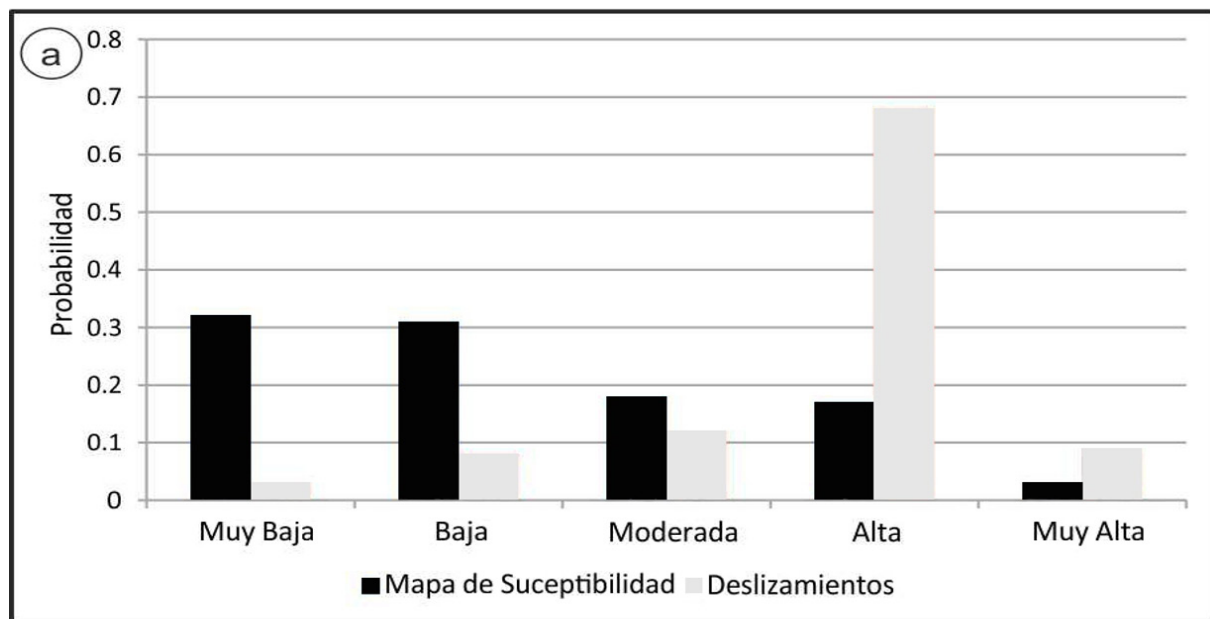


Figura 4. A- Gráfico de distribución de frecuencia en donde se compara el área cubierta por cada clase de susceptibilidad y el número de procesos descriptos en cada una de ellas. / **Figure 4. A-** Probability distribution of susceptibility values at landslide locations compared to landslide susceptibility classes for the study area.

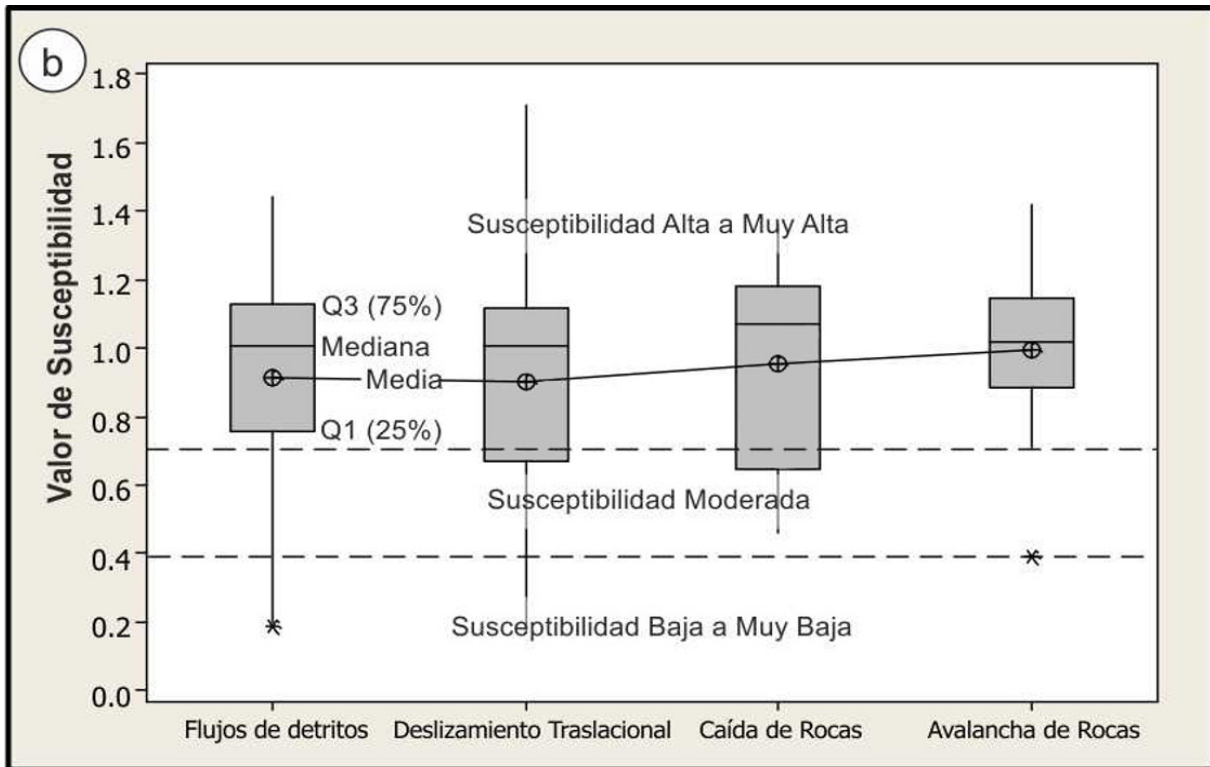


Figura 4. B- Diagrama de caja de los valores de susceptibilidad obtenidos para los principales movimientos bajo análisis. / **Figure 4. B-** Box diagram of landslide susceptibility values obtained for main movements under analysis.

tritos tuvieron la mayor parte de su distribución dentro de los terrenos clasificados como de susceptibilidad alta a muy alta (figura 4b). Sus rangos intercuartiles (Q1-Q3) cayeron dentro del campo de susceptibilidad alta y sólo los valores con percentiles superiores al 75% cayeron en el campo de susceptibilidad muy alta. En el caso de los deslizamientos traslacionales y las caídas

de rocas mostraron valores medios y medianas parecidas a los otros movimientos aunque sus rangos intercuartiles variaron entre los campos de susceptibilidad moderada y alta a muy alta. Esto implica que un mayor porcentaje de estos últimos movimientos obtuvieron valores de susceptibilidad más bajos que los flujos de detritos y avalanchas de rocas.

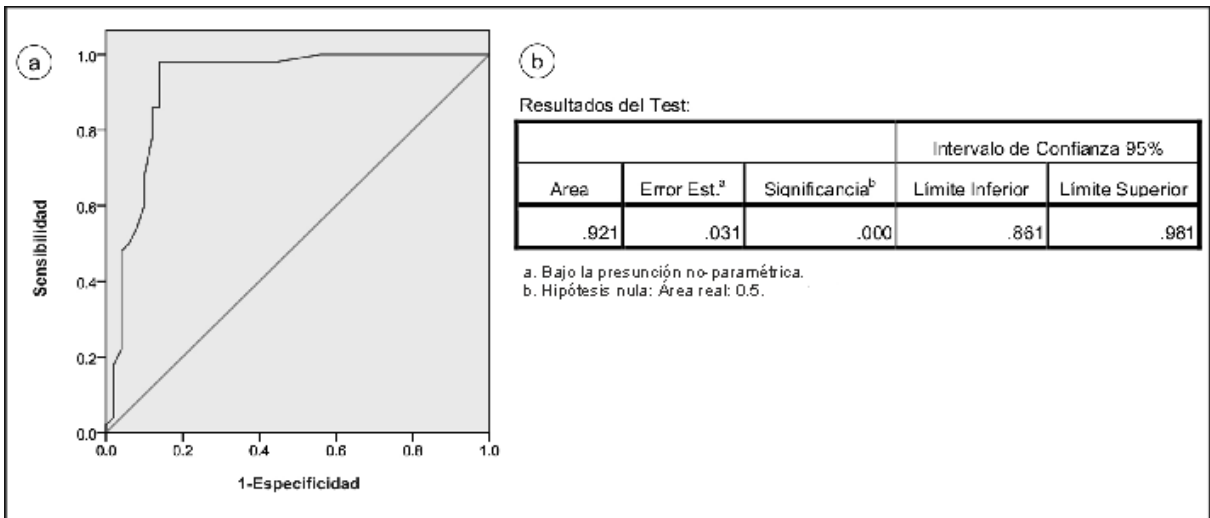


Figura 5. A- Curva ROC obtenida para el resultado del modelo mixto de susceptibilidad. **B-** Área bajo la curva calculada junto con su error estándar y su significancia. / **Figure 5. A-** ROC curve test for the result of the mixed susceptibility model. **B-** Area under the curve calculated with their standar error and significance.

Para poder evaluar el desempeño del mapa de manera cuantitativa en cuanto a su capacidad predictiva se trabajó con el método de la curva ROC (*Receiver Operating Characteristic*) y se determinó el estadístico denominado “distancia a la clasificación perfecta” de Cepeda *et al.* (2010) debido a que ambos métodos son ampliamente aceptados. El área de la curva ROC puede ser utilizada para evaluar la calidad global del modelo (Hanley y McNeil, 1982) independientemente de un valor de corte que marque las áreas como estables o inestables. Cuanto mayor sea ese área o más se acerque la curva a la esquina superior izquierda del gráfico mejor será el desempeño del modelo. Las curvas ROC trabajan con la sensibilidad (probabilidad de que los deslizamientos caigan en terrenos mapeados como inestables) y la especificidad (probabilidad de que no haya deslizamientos en terrenos mapeados como estables). Como consecuencia de este análisis se puede realizar una clasificación del terreno bajo estudio en áreas positivas verdaderas (TP), cuando un deslizamiento es observado en un área mapeada como inestable, áreas positivas falsas (FP), cuando un área sin presencia de deslizamientos fue mapeada como positiva, áreas negativas verdaderas (TN), cuando un área sin presencia de deslizamiento fue mapeada como estable y áreas negativas falsas (FN), cuando un deslizamiento es observado en un área mapeada como estable. Para el análisis se utilizaron 50 puntos dentro de las áreas montañosas donde no se observaban deslizamientos y 50 procesos identificados durante el inventario, todos elegidos al azar. Los terrenos tomados como inestables fueron aquellos que obtuvieron la categoría de susceptibilidad alta y muy alta es decir con un valor nominal >0,73.

En el caso de las curvas ROC la sensibilidad es definida por la relación $TP/(TP+FN)$ mientras que la especificidad como la relación $1 - FP/(FP+TN)$. Para poder aplicar este método se normalizó la susceptibilidad del terreno entre 0 y 1 y se comparó con la presencia (1) o ausencia (0) de deslizamientos en cada unidad de terreno mediante un sistema binario.

Las figuras 5 a y b muestran el resultado

obtenido para el área bajo la curva que arrojó un valor de 0,92 con una significancia <0.000 y para un intervalo de confianza de 95% mostrando un excelente desempeño.

Posteriormente se calculó la “distancia a la clasificación perfecta” (r_j) definida como:

$$r_j = \sqrt{(FPR^2 + (1 - TPR^2))}$$

donde $TPR = TP/(TP+FN)$ y $FPR = FP/(FP+TN)$

El valor obtenido para r_j fue de 0.16 lo que representa una muy buena performance teniendo en cuenta que cuanto más se acerque el valor a cero mejor es el resultado del modelo.

Conclusiones

El mapa de susceptibilidad obtenido a partir de los modelos utilizados mostró un buen ajuste con los distintos procesos de remoción en masa identificados en el campo. El 77 % de los movimientos coinciden con los terrenos clasificados como de alta a muy alta susceptibilidad. De los principales tipos de procesos descriptos, los que mostraron un mejor ajuste con el mapa final fueron los flujos de detritos y las avalanchas de rocas. Este resultado tiene sentido ya que, en un principio, el modelo *Flow-R* permite analizar la propagación pendiente abajo de los sedimentos movilizados y por lo tanto logra un mayor ajuste con aquellos tipos de movimientos que generan una mayor dispersión de los materiales.

El uso de información de precipitaciones obtenidos a partir de sensores remotos de alta precisión, tamaño de celda de $0,25^\circ \times 0,25^\circ$, posibilitó desarrollar este modelo en una zona donde los datos climáticos son escasos y antiguos. En combinación con datos SRTM de 30 metros, utilizado para los parámetros geomorfométricos, el modelo demostró ser útil para el relevamiento regional del peligro derivado de deslizamientos en zonas de difícil acceso situadas por encima de los 4.000 msnm.

Los mapas de susceptibilidad de movi-

mientos de ladera son de gran importancia para los futuros proyectos de obras ingenieriles lineales como gasoductos, tendidos eléctricos, rutas, etc. que atraviesan extensas áreas o para la planificación de las medidas de acción ante la ocurrencia de eventos extremos.

Referencias

- Anbalagan, R., Chakraborty, D. y Kohli, A. 2008. Landslide hazard zonation (LHZ) mapping on meso-scale for systematic town planning in mountainous terrain. *Journal of Scientific and Industrial Research*. 67:486 - 497.
- Arnoldus, H.M. 1978. An approximation of the rainfall factor in the Universal Soil Loss Equation. De Boodst, M. y Gabriels, D. (Eds.): *Assessment of erosion*. Pages 127 - 132. John Wiley y Sons, Inc. Chichester - Gran Bretaña.
- Baum, R.L., Godt, J.W. y Savage, W.Z. 2010. "Estimating the timing and location of shallow rainfall induced landslides using a model for transient, unsaturated infiltration". *Journal of Geophysical Research*. 115. F03013. doi: 10.1029/2009JF001321.
- Baumann, V., Wick, E., Horton, P. y Jaboyedoff, M. 2011. "Debris flow susceptibility mapping at a regional scale along the National Road N7, Argentina". In: *Proceedings of the 14th Pan-American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*. Toronto, Ontario, Canada.
- Blahut, J., Horton, P., Sterlacchini, S. y Jaboyedoff, M. 2010. Debris flow hazard modelling on medium scale. Valtellina di Tirano, Italy. *Natural Hazards Earth System Science*. 10: 2379 - 2390. doi: 10.5194/nhess - 10-2379-2010.
- Cepeda, J., Chávez, J.A. y Cruz Martínez, C. 2010. Procedure for the selection of runoff model parameters from landslide backanalyses: application to the Metropolitan Area of San Salvador, El Salvador. *Landslides*, 7: 105-116. doi: 10.1007/s10346 - 010 - 0197 - 9.
- Fernández, D.S. 2009. Eventos de remoción en masa en la provincia de Tucumán: tipos, características y distribución. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*. 65(4): 748 - 759.
- Fernández, D.S. y Puchulu, M.E. 2015. Modelación de áreas susceptibles de deslizamientos mediante análisis espacial y regresión logística multivariante. *Libro de resúmenes del VI Congreso de Geología del Cuaternario y Geomorfología*. 293 - 294. ISBN: 978 - 987 - 3767 - 34 - 0.
- Fischer, L., Rubensdotter, L., Sletten, K., Stalsberg, K., Melchiorre, C., Horton, P. y Jaboyedoff, M.: 2012. "Debris flow modeling for susceptibility mapping at regional to national scale in Norway". *Proceedings of the 11th International and 2nd North American Symposium on Landslides*, 3 - 8 June 2012, Banff, Alberta, Canada.
- Gamma, P. 2000. Dfwalk - Ein Murgang-Simulationsprogramm zur Gefahrenzonierung, *Geographisches Institut der Universität Bern*.
- Hanley, J. A. y McNeil, B. J. 1982. The meaning and use of the area under a receiver operating characteristic (ROC) curve. *Radiology* 143 (1): 29 - 36.
- Holmgren, P. 1994. Multiple flow direction algorithms for runoff modelling in grid based elevation models: An empirical evaluation. *Hydrology*. Process. 8:327 - 334. doi:10.1002/hyp.3360080405.
- Horton, P., Jaboyedoff, M., Rudaz, B. y Zimmermann, M. 2013. Flow-R, a model for susceptibility mapping of debris flows and other gravitational hazards at a regional scale. *Natural Hazards Earth System Science*. 13: 869 - 885. doi:10.5194/nhess 13 - 869.
- Jenks, G.F. 1967. The Data Model Concept in Statistical Mapping. *International Yearbook of Cartography* 7: 186 - 190.
- Jordán, A. y Bellinfante, N. 2000. Cartografía de la erosividad de la lluvia estimada a partir de datos pluviométricos mensuales en el campo de Gibraltar (Cádiz). *Revista Edafología*. 7(3): 83 - 92.
- Kohler, M.A. y Linsley, R.K. 1951. Predicting the runoff from storm rainfall. *US Weather Bureau Results Paper* 34.
- Kirschbaum, D.B., Stanley, T. y Simmons, J. 2015. "A dynamic landslide hazard assessment system for Central America and Hispaniola". *Natural Hazards Earth System Science*. 15: 2257 - 2272. doi: 10.5194/nhess 15 - 2257 - 2015.
- Montgomery, D.R. y Dietrich, W.E. 1994. A physically based model for the topographic control on shallow landsliding. *Water Resour. Res.* 30(4): 1153 - 1171. doi: 10.1029/93WR02979.
- Mora, S. y Vahrson, W. 1994. Macrozonation methodology for landslide hazard determination. *Bulletin of the Association Engineering Geologists*. 31(1): 49 - 58.
- Ray, R.L. y Jacobs, J.M. 2007. Relationships among remotely sensed soil moisture, precipitation and landslide events. *Natural Hazards Earth System Science* 43: 211 - 222. doi: 10.1007/s11069 - 006 - 9095 - 9.
- Zimmermann, M., Mani, P., y Gamma, P. 1997. Murganggefahr und Klima anderung - ein GIS - basierter. Ansatz, NFP 31 Schlussbericht, Hochschulverlag an der ETH, Zurich.

Recibido: 07 de Noviembre del 2016

Aceptado: 30 de Marzo del 2017

