

LA AVALANCHA DE ROCAS LAS MAJADITAS: CARACTERIZACIÓN GEOMÉTRICA Y POSIBLE RELACIÓN CON EVENTOS PALEOSÍSMICOS (PRECORDILLERA DE SAN JUAN, ARGENTINA)

L. Perucca^{1,2} e Y. Esper Angilieri^{1,2}

¹ CONICET (Consejo de Investigaciones Científicas y Técnicas)

² Gabinete de Neotectónica y Geomorfología, Instituto de Geología Dr. Emiliano Aparicio, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de San Juan, Av. Ignacio de la Roza y Meglioli, 5400 San Juan, Argentina.
lauraperucca@yahoo.com.ar, yaninaesper@gmail.com

Resumen: En este trabajo se describe una avalancha de rocas muy bien preservada situada en el área de Las Majaditas, flanco noroccidental de la Precordillera (San Juan, Argentina) y su origen es analizado. Se estudió el mecanismo del movimiento en función de las características morfológicas de la avalancha. Algunos factores locales, principalmente su litología contrastante, topografía y características estructurales y probablemente condiciones más húmedas durante el periodo postglacial fueron condiciones que favorecieron la pérdida de equilibrio de las laderas montañosas. Se analizó además, las relaciones espaciales entre la avalancha y la distribución de la sismicidad instrumental, terremotos históricos y fallas con actividad cuaternaria (fallas Las Majaditas y La Bolsa). Los autores sugieren un evento paleosísmico como el inductor del fenómeno de remoción en masa.

Palabras clave: Avalancha de rocas Las Majaditas, terremotos, Precordillera, Provincia de San Juan, Argentina

Abstract: A well preserved rock avalanche in Las Majaditas area, north occidental flank of Precordillera, is described here and its origin analysed. The movement mechanism was studied on the basis of morphological features of the avalanche. Some local factors, principally contrasting lithology, topography, structural factors and a probably more humid condition during postglacial times favored conditions for the loss of slope equilibrium. The spatial relationships among such landslide and the distribution of the instrumental seismic epicentres, historical earthquakes and Quaternary faults (Majaditas and La Bolsa faults) are analysed. The authors suggest that this big gravitational movement was triggered by seismic shock.

Key words: Las Majaditas rock avalanche, earthquakes, Precordillera, San Juan Province, Argentina.

L. Perucca, L. y Esper Angilieri, Y. (2008): La avalancha de rocas Las Majaditas: caracterización geométrica y posible relación con eventos paleosísmicos (Precordillera de San Juan, Argentina). *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 21 (1-2): 35-47.

Los movimientos de ladera son desplazamientos pendiente abajo relativamente rápidos, de una masa de suelo o rocas a lo largo de una superficie o plano de ruptura que corresponde a menudo a una discontinuidad preexistente (plano de debilidad estructural representado por la estratificación, diaclasamiento, existencia de fallas activas), inestabilidad de laderas de fuertes pendientes, procesos geomorfológicos, etc. De acuerdo con diversos autores (Hauser, 1993, 2000; Cruden y Varnes, 1996), deben su origen a la combinación de diferentes factores geológicos, morfológicos, antropogénicos y físicos, donde la gravedad, la sismicidad y el agua constituyen los principales agentes desencadenantes. También influyen la presencia de sedimentos no consolidados, la erosión lateral de los ríos, la acción del hielo, altas pendientes,

meteorización mecánica y química de los materiales y discontinuidades en las rocas, entre otros.

Las avalanchas son flujos turbulentos o caóticos de material rocoso y granulometría variable, aunque con escasa participación del agua. Por tratarse de un flujo «seco» con materiales gruesos, las avalanchas son características de zonas montañosas (Hauser, 1993).

Los terremotos constituyen uno de los principales disparadores de procesos de remoción en masa (Keefer 1984). La provincia de San Juan ha sido afectada por numerosos movimientos sísmicos y está ubicada en la zona de mayor riesgo sísmico de Argentina. Sin embargo, la región carece de un registro completo de los terremotos que ha sufrido, por lo cual se conoce sólo en parte su historia sísmica.

Numerosos autores consideran las fallas activas como fuentes sismogénicas generadoras de procesos de

remoción en masa en la región oeste de Argentina. Fauqué *et al.* (2000) asignaron las avalanchas de rocas ubicadas en el valle del río Mendoza a la actividad tectónica de fallas inversas con evidencias de actividad durante el Cuaternario. González Díaz (2003), González Díaz y Folguera (2005, 2006), González Díaz *et al.* (2005, 2006) reconocieron deslizamientos y avalanchas de rocas prehistóricas en el área andina de la provincia de Neuquén y los relacionaron con tramos de debilidad estructural (fallas y lineamientos) asignándoles su ocurrencia a eventos sísmicos.

Costa y González Díaz (2007) sugirieron un origen sísmico para las avalanchas de roca reconocidas en noroeste de la Patagonia argentina, considerando entre otros factores, las elevadas pendientes de las laderas montañosas ($>25^\circ$), los importantes volúmenes de depósitos de avalancha estimados y el potencial sismogénico de la región. Moreiras (2006) estudió avalanchas de rocas en la provincia de Mendoza concediéndoles un probable origen sísmico. Perucca (1992) relacionó los fenómenos de remoción en masa reconocidos en las sierras de La Punilla y Volcán con los tramos activos de las fallas ubicadas en la porción norte de la provincia de San Juan y sur de La Rioja.

El área estudiada en este trabajo se emplaza en el centro-oeste de la República Argentina y noroeste de la Provincia de San Juan, Departamento Iglesia, delimitado por la Cordillera Frontal al oeste; la provincia de La Rioja al norte y este (divisoria de aguas de la Sierra de La Punilla-Volcán) y con los Departamentos de Jáchal al sureste y Calingasta al Sur (Fig. 1). El sector seleccionado para el presente trabajo, queda incluido aproximadamente entre los 29° y $29^\circ 10'$ S y $68^\circ 50'$ y 69° O.

El sistema orográfico sierra de La Punilla posee un rumbo general norte-sur y una forma ligeramente sinusoidal con una altura máxima de 4.857 m s.n.m. en el cerro La Bolsa, una longitud de alrededor de 125 km y un ancho máximo de 26 km. Sus mayores elevaciones se encuentran en la porción norte y centro del cuerpo montañoso principal, como el cerro Alto del Descubrimiento (4.851 m s.n.m.) bajando suavemente hacia el sur. El límite oeste de la sierra lo constituye el río Blanco y la provincia geológica de Cordillera Frontal, mientras que por el este el límite se ubica el río de La Troya, la provincia geológica de Sierras Pampeanas y Precordillera Central.

La zona de estudio se ubica en el flanco noroccidental de la sierra de La Punilla, 4 km al este del río Blanco, en un área no poblada y de difícil acceso, cuyos poblados más cercanos se encuentran a más de 80 km en línea recta, situados en valles intermontanos.

Metodología

Los métodos aplicados en este trabajo están basados en la interpretación y análisis digital de los rasgos geomorfológicos del relieve haciendo uso de fotografías aéreas de escala 1:30.000 suministradas por

la Secretaría de Minería de la Provincia e imágenes de satélite Landsat TM de 30 y 15 m de resolución. Una vez identificada la avalancha de rocas, se analizó su geometría en ambiente SIG, realizando cálculos de áreas y longitudes. Para el análisis de pendientes se confeccionó un mapa en ambiente GIS a partir de la creación de un modelo digital de terreno (MDT). Las altitudes fueron obtenidas como resultado de la digitalización parcial de Cartas Topográficas del Instituto Geográfico Militar. La función pendiente calcula el máximo rango de cambio en elevación por distancia entre cada celda y sus vecinas. Mientras más bajo el valor de pendiente más plano es el terreno, este valor es calculado en grados ($0-90^\circ$). Se evaluó además la relación de este fenómeno de remoción en masa con los segmentos de falla activos ubicados en áreas aledañas y la sismicidad histórica e instrumental de la región.

Marco geológico y tectónico

En el extremo noroccidental de la sierra de la Punilla afloran rocas sedimentarias del Devónico - Carbonífero inferior pertenecientes a la Formación Punilla (Furque, 1956), compuesta por dos miembros: uno inferior, constituido por grauvacas y conglomerados y el superior formado por areniscas, conglomerados, limonitas y pelitas (Camino *et al.*, 1993). Por encima de esta formación y en discordancia angular se encuentra la Formación Quebrada Larga (Scalabrini Ortiz, 1973) de edad carbonífera superior, constituida por areniscas de grano mediano a grueso de colores claros intercaladas con areniscas grises verdosas, de grano fino, lutitas de color gris oscuro y escasos conglomerados finos (Fig. 2).

Camino *et al.* (1993) explicaron la sierra de la Punilla como un bloque tectónico de rumbo norte-sur cortado por pliegues cuyos ejes tienen un rumbo noroeste - sureste y una edad carbonífera. Describen estructuras gondwánicas, principalmente dos pliegues de primer orden con fallas inversas paralelas a los ejes de plegamiento que suprimen o repiten la secuencia sedimentaria. Como estructuras andinas definen a la propia sierra de la Punilla como un bloque tectónico limitado por fallas inversas de alto ángulo y de rumbo meridional. Asignan un carácter de fractura principal a la ubicada en el flanco oriental de la sierra, y a la del flanco occidental como antitética, de manera análoga al estilo estructural de las Sierras Pampeanas. Mencionan fracturas en el interior de la sierra de rumbo norte-sur como originadas posiblemente por los movimientos andinos, y también fracturas antiguas reactivadas por los mismos.

Los principales segmentos de falla con actividad durante el Cuaternario (Fig. 3), se encuentran distribuidos a lo largo de la sierra de la Punilla, con un rumbo aproximadamente norte-sur. Existen fallas con rumbo NO-SE y NE-SO, pero subordinadas a las anteriores.

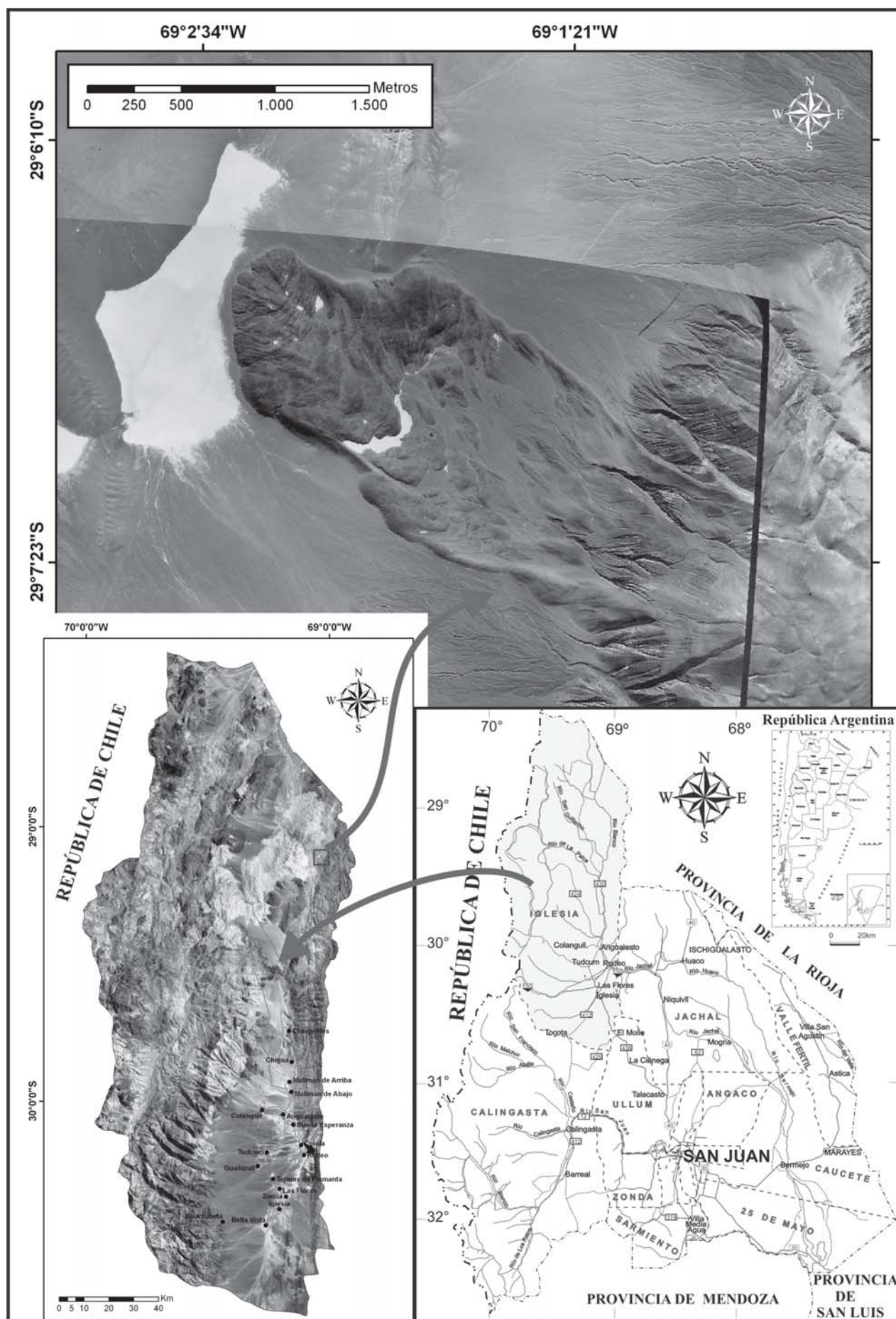


Figura 1.- Ubicación del área de estudio.

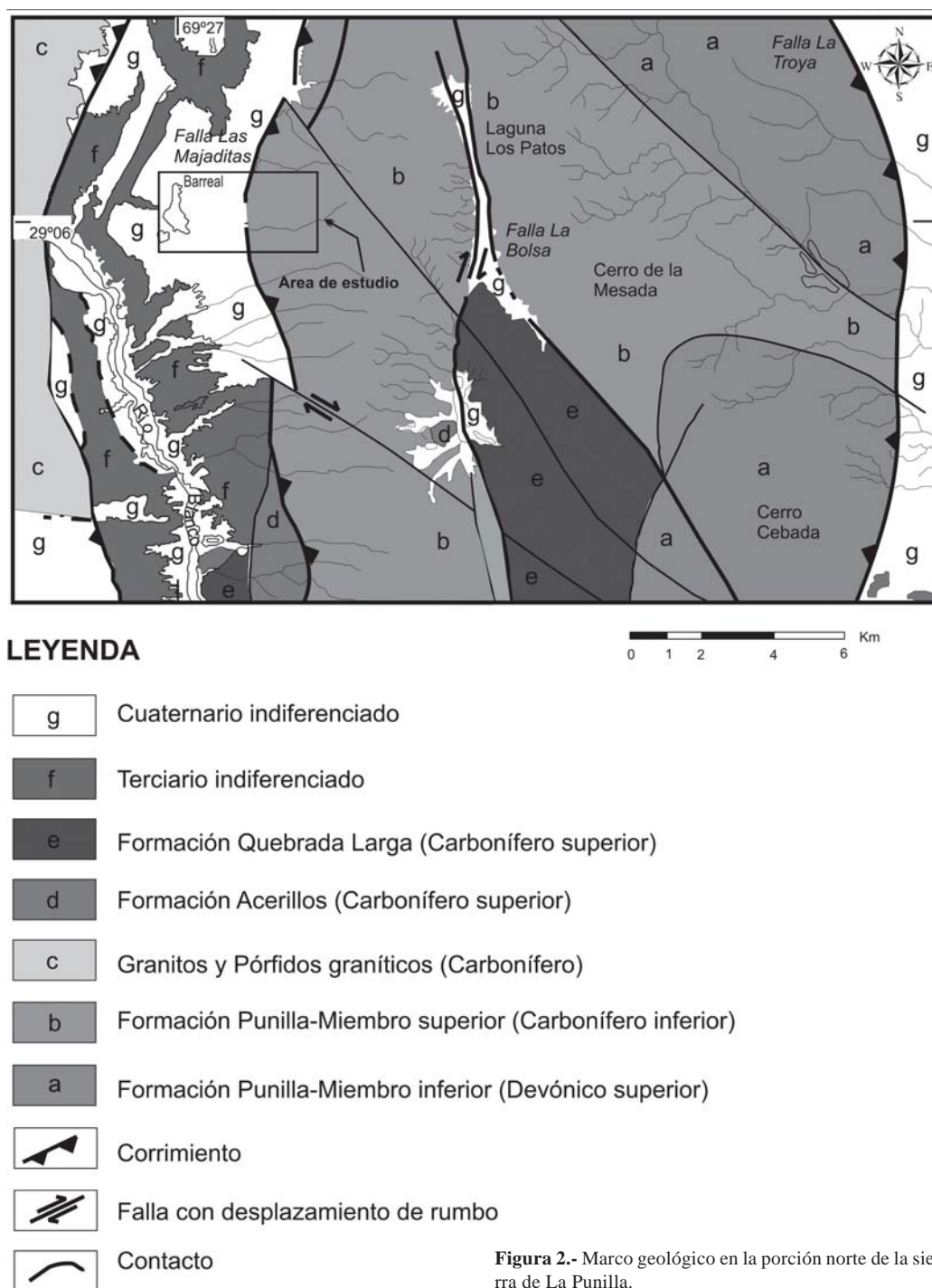


Figura 2.- Marco geológico en la porción norte de la sierra de La Punilla.

Bastías (1986) localizó la región dentro del Sistema de Fallamiento el Tigre, y la denomina Area Norte. Las fallas ubicadas en la porción noroeste de la sierra de la Punilla se denominan fallas La Bolsa y Majaditas. Perucca (1995) efectuó el análisis de estas fallas y relaciona los fenómenos de remoción en masa existentes en la sierra de La Punilla con los tramos de falla con evidencias de actividad tectónica durante el Cuaternario.

Falla Las Majaditas

En el flanco noroccidental de la sierra de La Punilla se encuentra la falla Las Majaditas, de rumbo norte-sur,

con el bloque hundido al oeste y que afecta el piedemonte cuaternario. El trazo de la falla en esta zona es ligeramente cóncavo hacia la sierra, con desplazamiento inverso. La superficie de los conos aluviales provenientes de la sierra posee pavimento y barniz del desierto y la altura del escarpe oscila entre 0,50 y 1m.

Falla La Bolsa

En el centro del cuerpo montañoso de la sierra de la Punilla se encuentra la falla La Bolsa, cuyo rasgo principal es una trinchera o surco de falla en la porción central del mismo. En la porción septentrional, la falla

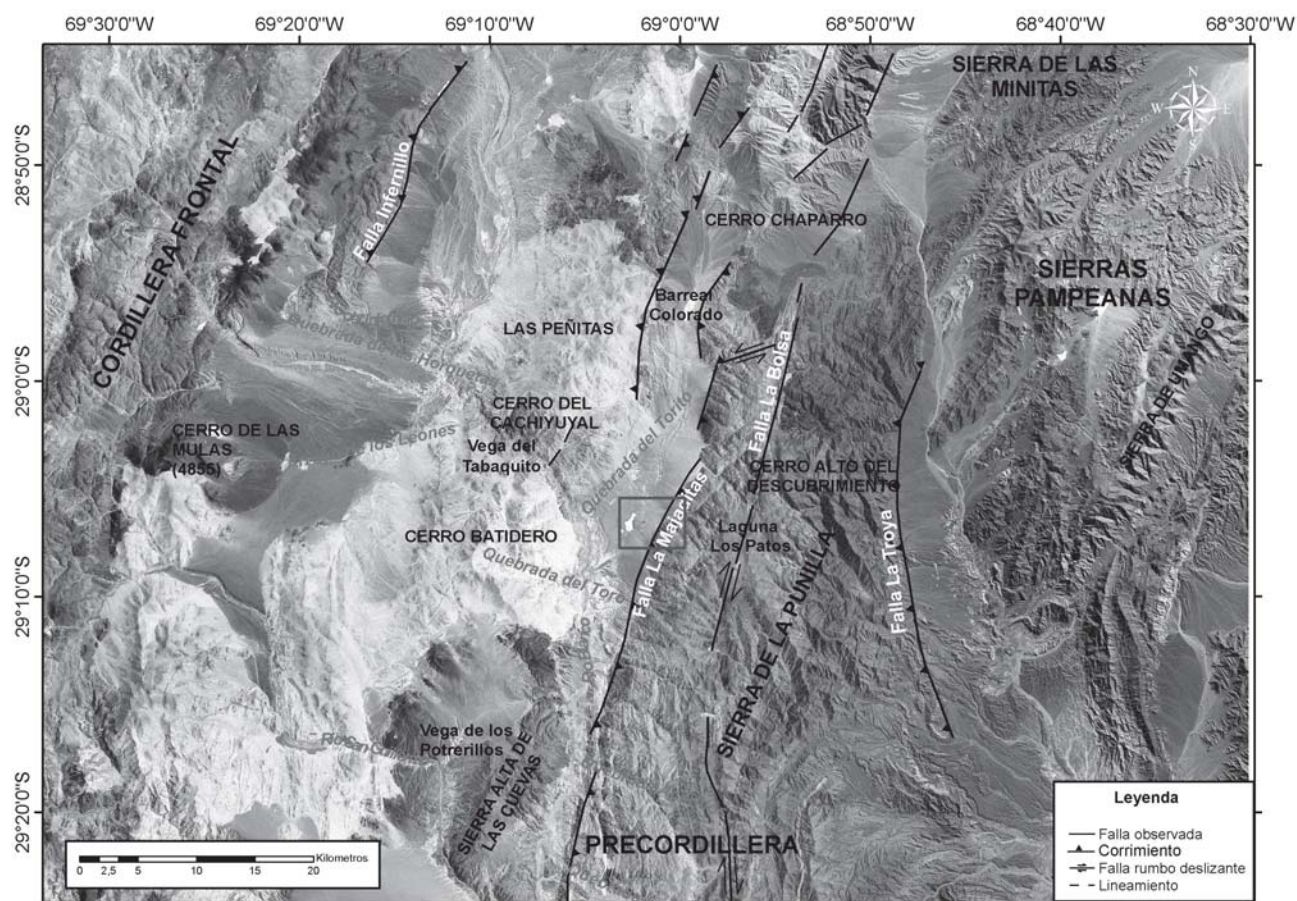


Figura 3.- Principales fallas con actividad cuaternaria del sector norte de la Precordillera.

afecta el piedemonte y su trazo tiene un rumbo nornoreste-sursuroeste y una longitud aproximada de 90 km, con un desplazamiento de los cauces fluviales en sentido dextral. La falla posee una alternancia en el bloque elevado, ya que en el tramo sur se encuentra al este, y hacia el norte al oeste (Perucca *et al.*, 1999). Hacia el sur la falla La Bolsa ingresa en el cuerpo montañoso de la sierra de La Punilla en donde se manifiesta como una depresión elongada y muy estrecha ubicada unos 15 km al oeste del río Blanco, en forma de un valle intermontano de rumbo norte-sur de menos de 1 km de ancho, con una altura promedio de 3.500 m s.n.m., poco definido en los mapas topográficos existentes. Algunas de estas depresiones son pequeñas cuencas endorreicas, cuyos sectores más bajos son ocupados por vegas y lagunas. Este valle presenta evidencias de actividad cuaternaria, como vegas desplazadas, conos disectados y corrientes fluviales y contrafuertes montañosos desplazados en sentido dextral.

En el segmento suroriental, en las proximidades del cerro La Bolsa, los contrafuertes montañosos se encuentran desplazados en forma dextral. Esto ha originado un escarpe en el flanco sur del contrafuerte coincidente con su trazo, con un flanco norte con formas más suavizadas. Bastías (1986) determinó un desplazamiento en los contrafuertes de aproximadamente 250 a 300 m, mientras que en las acumulaciones de detritos de talud originados por la

acción de los deshielos, el desplazamiento es de alrededor de 25 m. Un poco más al norte se encuentra otra avalancha de rocas, aunque de dimensiones más reducidas que la de Las Majaditas y mejor conservada, lo que indicaría su formación durante un evento posterior.

Geomorfología

La rigurosidad del clima actual se manifiesta con las extremas temperaturas invernales (de hasta -30°C), insolación intensa, amplitudes térmicas extremas, humedad ambiente mínima, nevadas invernales y escasísimas precipitaciones pluviales. La ausencia de vegetación contribuye a la acción de la meteorización física que origina una extensa cubierta detrítica. Esta cubierta de detritos indicaría un cambio en las condiciones climáticas del área, con una disminución de la capacidad de transporte de los agentes geomórficos, los cuales generaron anteriormente los abanicos.

Los depósitos cuaternarios presentes en el área pertenecen principalmente a conos aluviales, depósitos lacustres y procedentes de inestabilidades de laderas. Las depresiones situadas en la porción norte del área estudiada constituyen pequeñas cuencas endorreicas ubicadas a unos 4.000 m s.n.m. y originadas por una tectónica reciente. En ellas se encuentran depósitos finos como en el barreal Colorado. Estas cuencas se

encuentran marginadas por conos aluviales coalescentes provenientes de los cerros aledaños que aportan el material fino y condicionan su evolución geomórfica. Estos se caracterizan por poseer un buen desarrollo de pavimento y barniz del desierto. La granulometría de los clastos es decreciente hacia la porción distal de los abanicos. La tonalidad es oscura debido al área del cual provienen (areniscas y lutitas de colores grises verdosos).

Los conos aluviales que descienden de la sierra de La Punilla poseen una dirección predominante este-oeste y un corto desarrollo areal debido a que están limitados por una serie de estructuras plegadas de rumbo submeridional constituidas por sedimentos finos (arenas y arcillas) de posible edad terciaria superior-cuaternaria. Los conos se encuentran fallados, con escarpas que miran al oeste, poseen pavimento y barniz del desierto y poseen clastos angulosos que varían su diámetro de 5 a 10 cm.

Geometría de la avalancha Las Majaditas

La avalancha de rocas Las Majaditas se ubica en el flanco noroccidental de la sierra de La Punilla, en las proximidades de la falla del mismo nombre.

El estudio morfogeométrico efectuado en este trabajo corresponde al estado actual de dicha avalancha, para lo cual los métodos aplicados, fueron basados primeramente en la identificación de la misma

en base a la interpretación y análisis digital de fotografías aéreas de escala 1:30.000 e imágenes Landsat TM de 30 y 15 m de resolución. Luego se procedió a definir su planta, así como la distribución espacial de sus elementos. Para su caracterización geométrica se utilizaron los siguientes parámetros (modificado de Dikau *et al.*, 1996):

- Altitud (H): cota altimétrica máxima ($H_{\text{máx}}$), mínima ($H_{\text{mín}}$) y media (H_{m}).
- Pendiente (S): gradiente máximo ($S_{\text{máx}}$) y medio (S_{m}).
- Coordenadas del punto central: representadas por valores de X Y, enmarcadas en un sistema de referencias específico.
- Superficie de rotura: tipo de escarpa (plana, curva, etc.)
- Longitud total (L): distancia mínima comprendida entre la punta y la coronación del deslizamiento.
- Longitud de la masa desplazada (L_d): Distancia mínima comprendida entre la punta y la cima del deslizamiento.
- Longitud de la superficie de ruptura (L_r): Es la mínima distancia comprendida entre el extremo inferior de la superficie de ruptura y la coronación.
- Profundidad de la masa desplazada (D_d): Es la máxima profundidad del depósito deslizado medida en la dirección perpendicular al plano

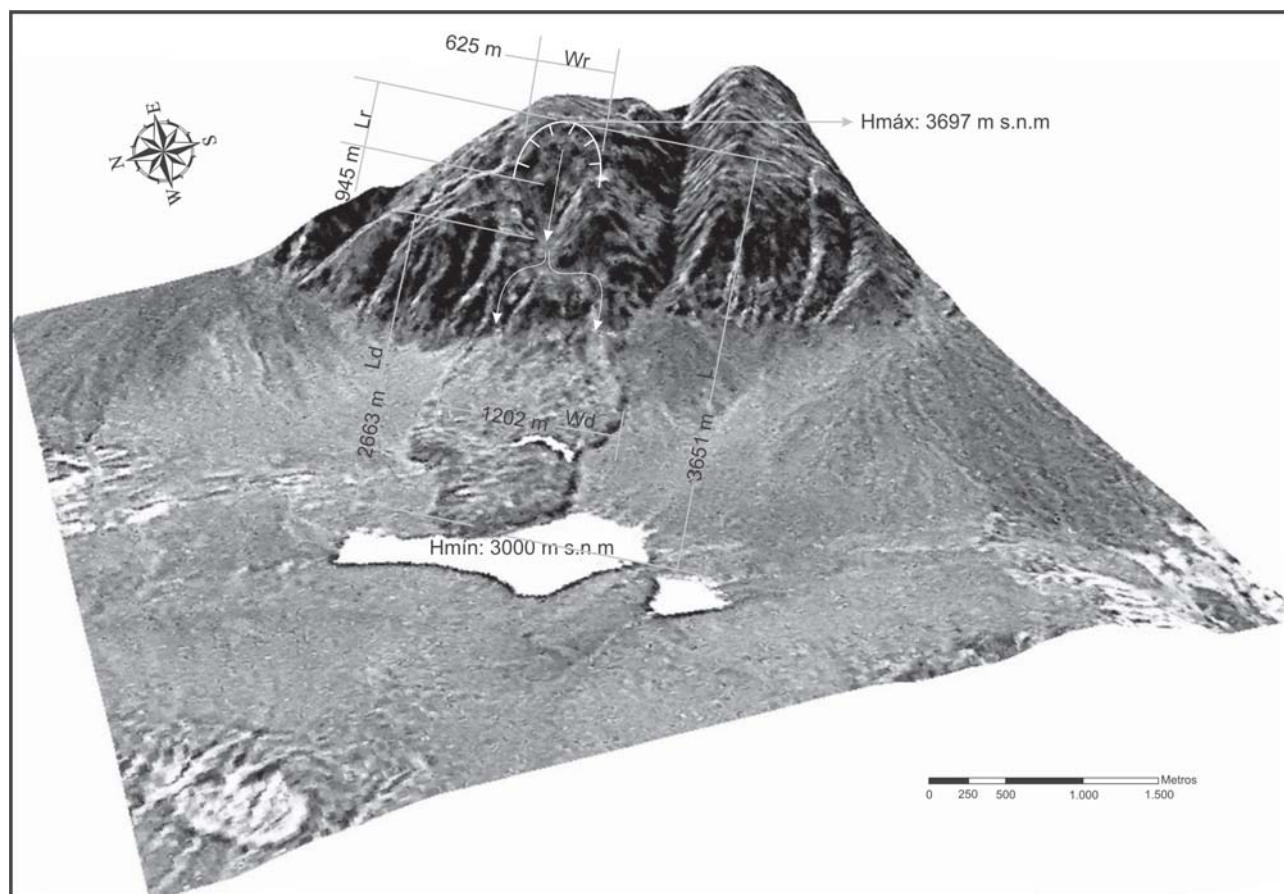


Figura 4.- Modelo digital del terreno y parámetros morfométricos de la avalancha de rocas Las Majaditas.

constituido por W_d y L_d .

- Anchura de la superficie de ruptura (W_r): Es la distancia máxima comprendida entre los dos flancos y medida perpendicularmente a la dirección de L_r .
- Anchura de la masa desplazada (W_d): Es el ancho máximo de la masa desplazada medido perpendicularmente a la dirección L_d .
- Altura de la superficie de rotura (H_r): Distancia vertical entre la coronación y el pie de la superficie de ruptura.
- Longitud perimetral de la masa desplazada (P): perímetro de la masa desplazada.
- Área (A): área total incluida la superficie de ruptura (A_r) y área de la masa desplazada (A_d)
- Volumen estimado (V): volumen probable del depósito de avalancha.

Finalmente se elaboró un modelo digital de terreno (MDT), el cual permite observar la real morfología de la avalancha bajo estudio (Fig. 4).

Con un área total de aproximadamente 3,2 km², esta avalancha posee evidencias de haber estado sometida a una intensa actividad erosiva. Sin embargo conserva sus características principales, lo cual permite la identificación de sus diversos elementos morfológicos: la corona, la masa deslizada, los flancos (derecho e izquierdo) y la sección basal o distal. La corona ocupa las partes más elevadas del deslizamiento (3.697 m s.n.m.) y con una orientación submeridional, posee una longitud estimada en 945 m. y un ancho de 625 m. Esta sección tiene una forma semicircular que define el área de despegue y se presenta parcialmente erosionada.

El área actual del depósito deslizado abarca unos 2,5 km². La topografía en este sector muestra pequeñas depresiones con drenaje cerrado o barreales. Posee una forma abultada en su porción distal y ha sido intensamente erosionada en los ejes superiores. La longitud de la masa desplazada (2.663 m) resulta ser inferior a la longitud total (3.651 m) dado que en la

cabecera del deslizamiento existen unos escarpes muy desarrollados.

La sección distal (3.000m s.n.m.) se encuentra en contacto con un pequeño barreal, ubicado entre este deslizamiento y una serie de estructuras plegadas relacionadas con la falla Las Majaditas. El desnivel de aproximadamente 697 m entre la corona y el pie, en una longitud muy corta, con pendiente pronunciada, que sumado a la gran cubierta de detritos y material suelto existente en las laderas, producto del clima periglacial de la zona; son factores condicionantes del movimiento en masa. Los índices geométricos de la avalancha se indican en la tabla I.

Mediante la obtención de los parámetros definidos, se propone la ocurrencia de un deslizamiento planar que habría derivado en una avalancha de rocas de 3.651 m de longitud total, una profundidad de la masa acumulada media de 5 m, con una pendiente media de 10°. El estudio planimétrico ha permitido establecer los valores correspondientes a la anchura de la superficie de rotura y de la masa deslizada en 625 m y 1.202 m respectivamente. Su volumen se ha estimado en más de 12x10⁶ m³.

Sismicidad

Si bien los eventos sísmicos registrados en la región en la actualidad son escasos (Tabla II), se han podido ubicar en el periodo 1931-2007 en la porción norte de la sierra de La Punilla, tres sismos de magnitud $M_s > 4$ y al menos seis de magnitud M_s 4 a 5 (USGS-NEIC, 2007). Prácticamente todos los eventos registrados en el periodo instrumental son de intraplaca de profundidad intermedia. La sismicidad superficial actual es muy baja y sólo se registraron dos sismos superficiales de M_s 3.6. Por otro lado, no se ha logrado establecer relación alguna entre la actividad sísmica histórica e instrumental y los segmentos de falla con señales de actividad cuaternaria conocidos en la región

| Parámetros | | Valor |
|---|---------------------------|-----------------------------------|
| Altitud (H) | máxima ($H_{máx}$) | 3,697 m s.n.m. |
| | mínima ($H_{mín}$) | 3,000 m s.n.m. |
| | media (H_m) | 3,348.5 m s.n.m. |
| Pendiente (S) | máxima ($S_{máx}$) | 39° |
| | media (S_m) | 10° |
| Coordenadas del punto central (Gauss Kruger Campo Inchauspe) | X | 2497274.40 |
| | Y | 6780040.86 |
| Superficie de rotura | | Plana |
| Longitud total (L) | | 3.651 m. |
| Longitud de la masa desplazada (L_d) | | 2.663 m. |
| Longitud de la superficie de ruptura (L_r) | | 945 m. |
| Profundidad de la masa desplazada (D_d) | | 20 m. |
| Anchura de la superficie de ruptura (W_r) | | 625 m. |
| Anchura de la masa desplazada (W_d) | | 1.202 m. |
| Altura de la superficie de rotura (H_r) | | 354 m. |
| Longitud perimetral de la masa desplazada (P) | | 7.131 m. |
| Área (A) | total (A_t) | 3,2 km ² |
| | masa desplazada (A_d) | 2,5 km ² |
| Volumen (V) estimado | | 12x10 ⁶ m ³ |

Tabla I.- Parámetros geométricos del deslizamiento Las Majaditas

| Año | Fecha | Latitud | Longitud | Profundidad (km) | Magnitud Ms |
|------|---------|---------|----------|---------------------|----------------|
| | Mes/día | | | | |
| 1931 | 05 24 | -29 | -68.5 | | 5.4 |
| 1933 | 01 30 | -29 | -69 | | 5.5 |
| 1944 | 01 10 | -29 | -69 | | 5 |
| 1965 | 08 12 | -29 | -69.4 | 80 | 4.5 |
| 1966 | 08 05 | -28.99 | -69.3 | 110 | 4.3 |
| 1966 | 08 11 | -29.04 | -69.2 | 122 | 4.19 |
| 1967 | 06 13 | -28.97 | -68.6 | 92 | 4.19 |
| 1967 | 06 22 | -28.95 | -68.5 | 96 | 4.50 |
| 1967 | 09 15 | -29.18 | -68.5 | 95 | 4.19 |
| 1967 | 11 02 | -28.84 | -69.46 | 84 | 5 |
| 1972 | 03 21 | -28.98 | -68.59 | 126 | 3.9 |
| 1974 | 02 08 | -28.89 | -69.12 | 109 | 4.4 |
| 1978 | 11 16 | -28.84 | -69.01 | 120 | 4.8 |
| 1979 | 04 11 | -29.15 | -69.45 | 128 | 4.5 |
| 1985 | 02 25 | -29.13 | -68.67 | 109 | 4.5 |
| 1985 | 04 02 | -28.81 | -69.17 | 106 | 5 |
| 1985 | 07 02 | -29.12 | -69.46 | 110 | 4.8 |
| 1987 | 06 06 | -29.29 | -68.58 | 110 | 4.7 |
| 1988 | 02 29 | -29.25 | -68.9 | 104 | 5 |
| 1991 | 03 15 | -29.13 | -68.68 | 113 | 5.5 |
| 1994 | 02 05 | -29.19 | -68.94 | 119 | 4.7 |
| 1995 | 10 01 | -28.92 | -69.5 | 113 | 4.4 |
| 1995 | 12 02 | -28.92 | -68.75 | 121 | 3.5 |
| 1996 | 10 05 | -28.97 | -68.84 | 120 | 4.5 |
| 1999 | 05 09 | -29.27 | -68.65 | 111 | 4.4 |
| 1999 | 12 12 | -29.01 | -69.46 | 113 | 4.6 |
| 2001 | 12 10 | -29.12 | -69.35 | 151 | 4 |
| 2002 | 03 20 | -29.07 | -68.77 | 125 | 4 |
| 2002 | 09 22 | -28.89 | -69.29 | 101 | 4.3 |
| 2003 | 01 15 | -29.01 | -69.49 | 153 | 3.6 |
| 2003 | 11 21 | -28.83 | -68.64 | 33 | 3.6 |
| 2004 | 10 11 | -28.99 | -68.70 | 109 | 3.6 |
| 2006 | 06 04 | -29.1 | -68.91 | 150 | 3.6 |
| 2006 | 06 21 | -29.16 | -68.99 | 3 | 3.7 |
| 2006 | 09 12 | -28.94 | -68.90 | 114 | 6 |
| 2006 | 10 14 | -29.14 | -69.42 | 115 | 4.1 |
| 2006 | 11 24 | -29.15 | -69.5 | 105 | 3.7 |

Tabla II.- Eventos sísmicos registrados en la región (Ms \geq 3.5), periodo 1931-2007, (USGS-NEIC, 2007).

(Figs. 3 y 7). Sin embargo, regiones de intraplaca que actualmente tienen una baja sismicidad, pueden ser fuentes sismogénicas potenciales. Revisten un elevado peligro sísmico para un futuro próximo ya que en épocas prehistóricas podrían haber sufrido crisis sísmicas mayores a las registradas en los catálogos sísmicos, desconociéndose sus intervalos de recurrencia (Yeats, 2007).

Se destaca la ocurrencia de dos terremotos con características destructivas que tuvieron su epicentro en el norte de la provincia de San Juan y suroeste de La Rioja a fines del siglo XX (Fig. 5A). El primero, denominado terremoto argentino (Bodenbender, 1894) del 27 de octubre 1894, responsable probablemente, de gran parte de los deslizamientos de la zona, al cual diversos autores le asignaron una magnitud M 8.2 (Bodenbender, 1894) y 7.5 (Bastias, 1986). Según las crónicas de la época, el sismo fue sumamente fuerte y se produjo aproximadamente a las 16 horas, fue de carácter ondulatorio y larga duración; causó alarma en gran parte de la Argentina y países limítrofes. Se produjeron grandes alteraciones del terreno aún en áreas muy alejadas del epicentro, como fenómenos de

licuefacción, (agrietamiento del terreno, volcanes de arena y salida de agua en forma de chorros de hasta 2 m de altura) en los terrenos saturados de agua y sin cohesión.

El diario La Unión del día 2 de noviembre de 1894 se refiere a interesantes fenómenos ocurridos en el departamento Iglesia donde señala arroyos que salieron de sus cauces naturales y formaron lagunas, caída de masas de tierra en los barrancos, generación de grandes grietas de las que surgía el agua. También describe la aparición y desaparición de manantiales y «en la zona de La Jarilla, camino a Copiapó, se han abierto muchas grietas, zanjas hondas y campos pantanosos, esto es, en el área del río Blanco».

En centro y oeste de la provincia de La Rioja se sintió con gran intensidad en los caminos montañosos se produjo un gran número de deslizamientos. Su intensidad máxima en el área epicentral fue IX (EMM) mientras que al norte de la ciudad de San Juan alcanzó el grado X debido a la ocurrencia de fenómenos de licuefacción (Fig. 5B).

El 12 de abril de 1899 se produjo un sismo de Ms 6,4 en la escala de Richter (Perucca y Navarro, 2005)

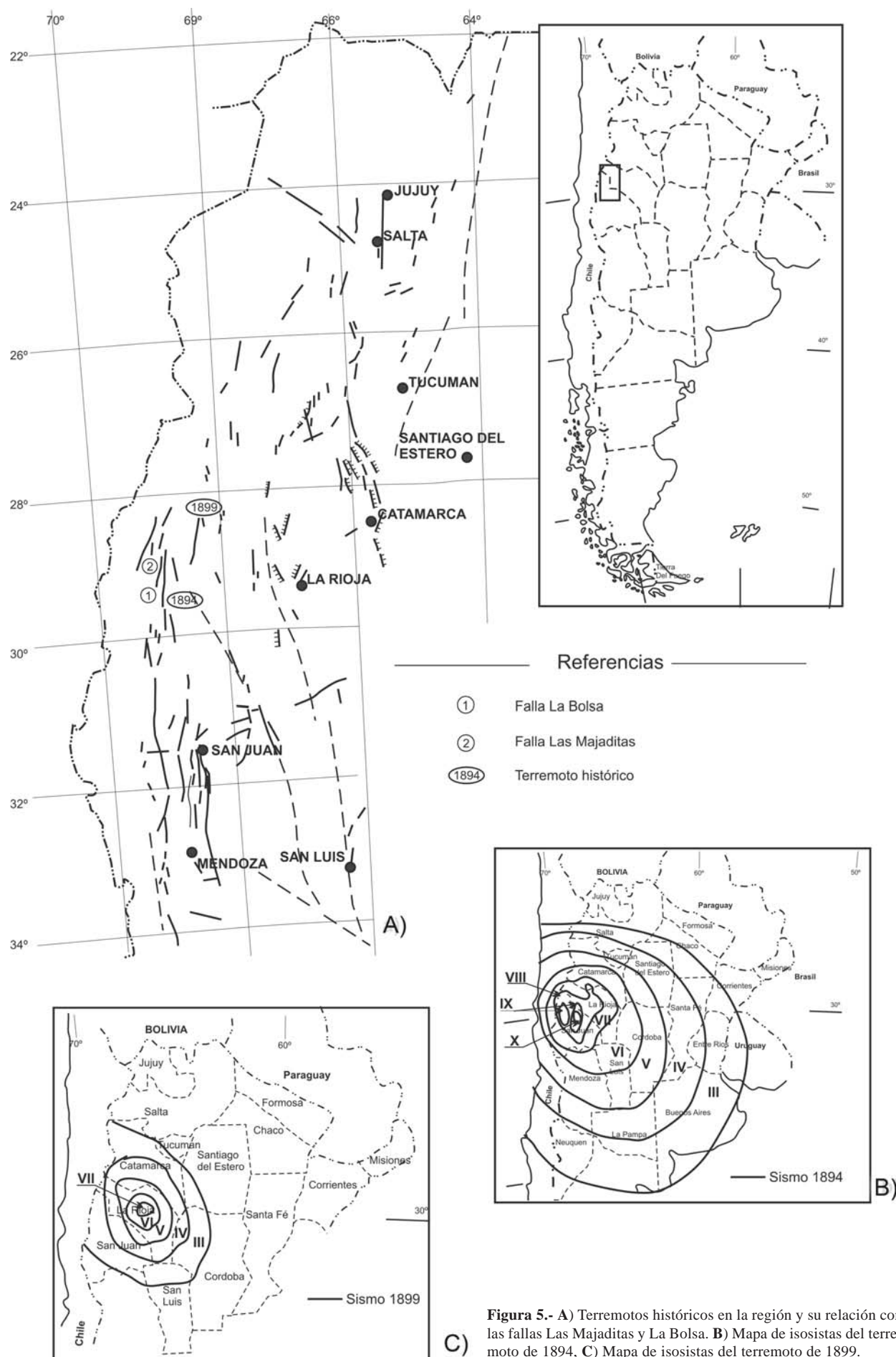


Figura 5.- A) Terremotos históricos en la región y su relación con las fallas Las Majaditas y La Bolsa. **B)** Mapa de isosistas del terremoto de 1894, **C)** Mapa de isosistas del terremoto de 1899.

con epicentro en el oeste de la provincia de La Rioja, poco conocido en el registro histórico de nuestro país a pesar de que su intensidad máxima fue a VII (EMM) en las poblaciones más cercanas al área epicentral (Fig. 5C). El sismo principal se produjo a las 13,10 hs, su duración fue de 90 segundos y fue acompañado de varias réplicas. Fue precedido además por un sismo premonitor a las 16,20 hs del día anterior, y otro, instantes antes del sismo principal. El terremoto fue percibido en las provincias de La Rioja, Catamarca, San Juan, Córdoba, Tucumán y Santiago del Estero. Tuvo características destructivas en las localidades ubicadas en el oeste y centro de La Rioja, registrándose deslizamientos de laderas. Además, durante el mes de octubre del mismo año, se produjeron sismos, réplicas del terremoto principal, que provocaron derrumbes en las laderas de los cerros, cortándose algunos pasos. Además de los numerosos movimientos de laderas se describieron grietas en el terreno de las que salían «humo y cenizas» (licuación de suelos) en las localidades ubicadas en los valles.

Discusion

Existen en la región andina de la Argentina numerosos antecedentes de avalanchas de rocas

generadas por movimientos sísmicos (Fauqué *et al.*, 2000; González Díaz, 2003; Costa y González Díaz, 2007; Moreiras, 2006; Hermmans *et al.*, 2000, 2001). Sin embargo, en la provincia de San Juan, considerada el área de mayor sismicidad en Argentina, no hay estudios que relacionen los eventos sísmicos con deslizamientos, aunque durante los terremotos históricos ocurridos en 1894, 1944, 1950 y 1977 en la provincia, (todos de $M_s \geq 7.0$) se registraron numerosos movimientos en masa a lo largo de los caminos montañosos que atraviesan los sectores cordilleranos y precordilleranos, aún en sectores alejados al epicentro.

Factores condicionantes

La topografía controla las laderas montañosas a nivel local y regional. Provee el componente de gravedad ladera abajo. En algunos casos, las laderas pueden ser afectadas por efectos de sitio durante un terremoto, por la interacción de las ondas sísmicas con ciertos rasgos geomorfológicos como las pendientes abruptas, siendo el de amplificación por topografía común en laderas de roca y suelos (Sepúlveda *et al.*, 2005 a, b). Mientras más inclinada sea una ladera, la propensión a los movimientos de ladera será mayor. En

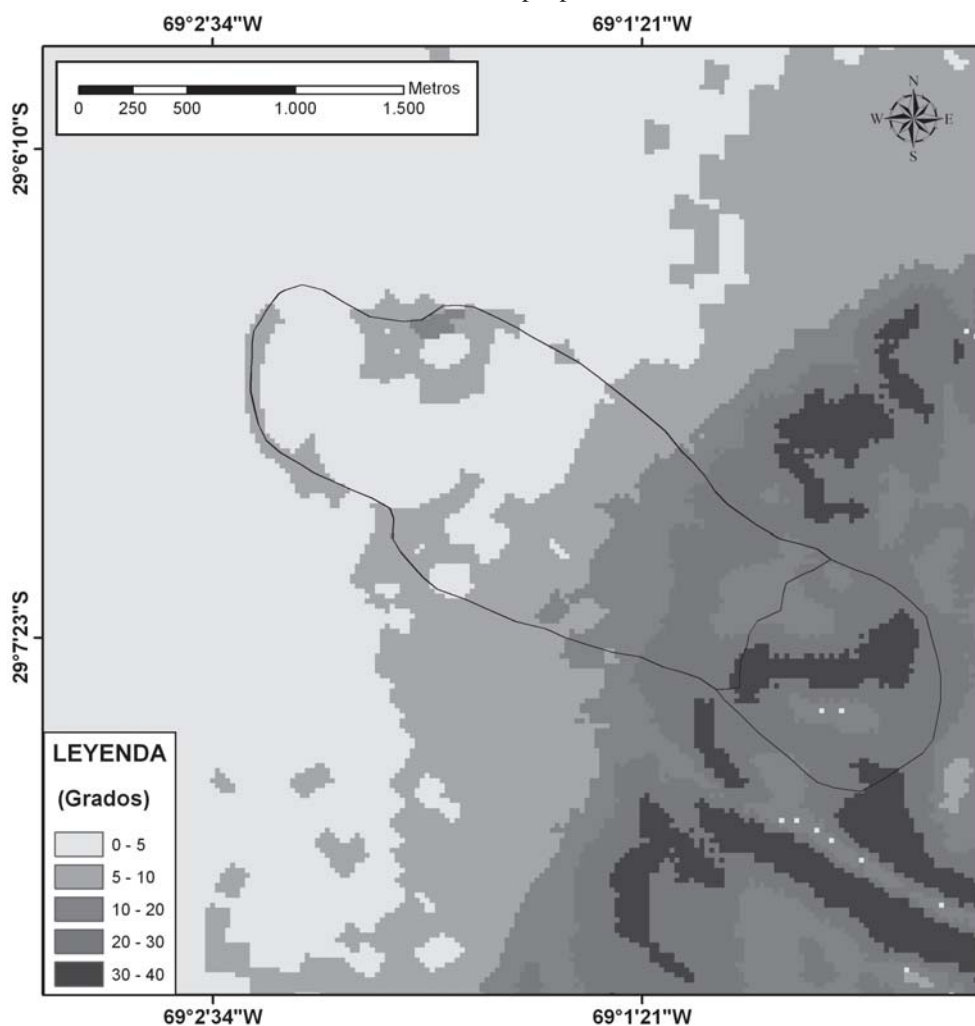


Figura 6.- Mapa de pendientes en grados

el flanco noroccidental de la sierra de la Punilla, la pendiente oscila entre 20° y 40 (Fig. 6).

La humedad es uno de los factores condicionantes en la generación de fenómenos de remoción en masa. En regiones áridas, eventos extraordinarios de lluvias torrenciales pueden ocasionar grandes movimientos del terreno, principalmente del material fuertemente diaclasado. En el área de estudio, las precipitaciones son muy escasas, con un promedio anual inferior a 50 mm (Minetti *et al.*, 1986).

Otro factor condicionante es la litología, ya que las propiedades físicas y la resistencia de cada material determinan su comportamiento tenso-deformacional y, por lo tanto, su estabilidad. En los macizos rocosos las inestabilidades suelen generarse por la existencia de capas o estratos de diferente competencia. En el sector de la avalancha se encuentran conglomerados, areniscas, limolitas y pelitas interestratificadas que inclinan al oeste. La alternancia de estas rocas de distinta competencia y la inclinación en el sentido de la pendiente favorecieron la ocurrencia del proceso de remoción en masa.

La tectónica suele tener una incidencia significativa en la ocurrencia de procesos gravitacionales. Uromehy *et al.* (2000) consideran la actividad tectónica de una región, indicada por la presencia de fallas principales, como un factor condicionante importante para la inestabilidad de las laderas. La avalancha de rocas Las Majaditas se ubica a escasos metros de la falla del mismo nombre y a poca distancia de la falla La Bolsa, ambas con actividad tectónica durante el Holoceno (Perucca *et al.*, 1999).

La geomorfología de la región es otro parámetro de importancia que condiciona la existencia de fenómenos de remoción en masa. Abele (1974) indicó la importancia de los procesos periglaciales en la inestabilidad de las laderas en donde el proceso de congelamiento - descongelamiento facilita la aparición de grietas y por lo tanto de la producción de detritos. En la sierra de la Punilla, con alturas que superan los 3.600 msnm en el área de estudio, predominan los procesos de meteorización mecánica que generan la rotura de la roca y la formación de una espesa cubierta de detritos.

Factores Desencadenantes

Los movimientos sísmicos son una de las causas principales en la iniciación de los procesos de remoción en masa (Keefer, 1984, 2002). Keefer (1984) realizó una clasificación de los deslizamientos, basada en la terminología de Varnes (1978) y estableció que el sismo más pequeño capaz de producir un deslizamiento tiene una magnitud Ms 4 mientras que para avalanchas de roca, es necesario un sismo de Ms 6,0. Por otra parte, Rodríguez *et al.* (1999) consideraron necesario un sismo de magnitud Ms 5,4 para originar caída de rocas o suelos y deslizamientos de roca y un evento de Ms 6,5 para generar las avalanchas de roca.

La provincia de San Juan ha sufrido en los últimos 120 años la ocurrencia de cuatro terremotos de Mse > 7. En todos ellos se registraron deslizamientos en las áreas montañosas, aún en regiones alejadas al epicentro.

Densmore y Hovius (2000) proponen, a partir de métodos empíricos, que la situación topográfica de los desprendimientos en una pendiente está determinada por el mecanismo disparador (precipitaciones o sismos). Estos autores consideran que los terremotos concentrarían sus efectos en la parte superior de una ladera, en donde la actividad fluvial es casi nula. Por ello, la posición de la cicatriz, cercana a la cresta de la pendiente, indicaría un origen sísmico para el deslizamiento Las Majaditas. Además, el gran volumen de masa rocosa deslizado reafirmaría un paleosismo como mecanismo inductor.

Keefer (1984, 2002), relacionó la máxima distancia de los movimientos en masa al epicentro con la magnitud de los terremotos. A pesar de que este autor observó que las áreas afectadas por deslizamientos dependen de las condiciones geológicas y de la profundidad del foco, obtuvo una curva bien definida como el límite que representa la distancia máxima a la que se puede esperar la ocurrencia de movimientos de ladera para una magnitud dada. Según este autor, para un sismo de Ms 6.4, tal como el ocurrido en 1899, la distancia llegaría a 150 km, mientras que para un sismo de Ms 7.5 (Bastias 1986), la distancia máxima al epicentro para los movimientos de ladera superaría los 200 km. Durante ambos terremotos se registraron numerosos movimientos en masa en toda la región montañosa y en el caso del sismo de 1894 se produjeron movimientos de ladera a distancias de más de 200 km del epicentro (Bodenbender, 1894, Perucca y Navarro 2005).

Si bien la sismicidad superficial instrumental actual es muy baja (Fig. 7), la presencia de fallas con actividad tectónica durante el Cuaternario en las proximidades del deslizamiento, su proximidad (330 km) a la fosa oceánica y en una región reiteradamente afectada por sismos destructivos, definen un marco sismotectónico ideal para provocar la ocurrencia de la avalancha de rocas aquí descrita. Es por ello que en este trabajo se propone como disparador de dicha avalancha, a un evento paleosísmico de magnitud moderada a elevada (Mse > 6,5). En cuanto a la edad del depósito, la falta de dataciones absolutas sólo permite hacer una generalización en tal sentido. Se acepta que la avalancha de rocas Las Majaditas habría ocurrido en tiempos postglaciales, probablemente bajo condiciones más húmedas que las actuales.

Conclusiones

Se ha identificado en la porción noroccidental de la sierra de La Punilla, norte de la provincia de San Juan una mega avalancha visible aún en imágenes de satélite de escasa resolución, denominada en este trabajo avalancha de rocas Las Majaditas.

- Patagonian Andes, Argentina. *Journal of South American Earth Sciences*, 24: 48-57.
- Cruden, D., y Varnes, D. (1996): Landslides types and processes. En: *Landslides. Investigation and Mitigation* (Turner, A.K. y Schuster, R.L., Eds.). Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C., 36-75.
- Densmore, A. y Hovius, N. (2000): Topographic fingerprints of bedrock landslides. *Geology*, 28: 371-374.
- Dikau, R., Brunsden D., Schrott L. y Ibsen M. (Eds.) (1996): *Landslide Recognition*. Reporte N°. 1 of the European Commission Environment Programme Contract No. EV5V-CT94-0454. Identification, Movement and Causes. Chichester, 251 p.
- Fauqué, L., Cortés, K., Folguera, A. y Etcheverría, M. (2000) : Avalanchas de rocas asociadas a neotectónica en el valle del Río Mendoza, sur de Uspallata. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 55: 419-423.
- Furque, G. (1956): Nuevos depósitos devónicos y carboníferos de la Precordillera sanjuanina. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 11: 46-71.
- González Díaz, E. (2003): El englazamiento en la región de la caldera de Caviabue- Copahue (Provincia de Neuquén): su reinterpretación. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 58: 356-366.
- González Díaz, E. y Folguera, A. (2005): Reconocimiento y descripción de avalanchas de rocas prehistóricas en el área neuquina delimitada por los paralelos 37° 15' y 37° 30' S y los meridianos 70° 55' y 71° 05' O. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 60: 446-460.
- González Díaz, E. y Folguera, A. (2006): La avalancha de rocas de Pilun Challa: una nueva y consistente ratificación del concepto de una única glaciación en la región de Caviabue-Copahue y sus adyacencias (Neuquén). *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 61: 19-30.
- González Díaz, E., 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 (Argentina). *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 60: 207-220.
- González Díaz, E., Folguera, A., Costa, C., Wright, E. y Ellisondo, M. (2006): Los grandes deslizamientos de la región septentrional neuquina entre los 36° - 38°S: una propuesta de inducción sísmica. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 61: 197-217.
- Hauser, A.Y. (1993): *Remociones en masa en Chile*. Servicio Nacional de Geología y Minería. Boletín 45: 1-75.
- Hauser, A.Y. (2000): *Remociones en masa en Chile*. Servicio Nacional de Geología y Minería. Boletín, 59: 1-89. Santiago.
- Hermanns, R., Trauth, M., Niedermann, S., Mc Williams, M. y Strecker, M. (2000): Tephrochronologic constraints on temporal distribution of large landslides in northwest Argentina. *Journal of Geology*, 108: 35-52.
- Hermanns, R., Niedermann, S., Villanueva García, A., Sosa Gomez, J. y Strecker, M., (2001): Neotectonics and catastrophic failure of mountain fronts in the southern intra-Andean Puna Plateau, Argentina. *Geology*, 29: 619-623.
- Keefer, D.K. (1984): Landslides caused by earthquakes. *Bulletin of the Geological Society of America*, 95: 406-421.
- Minetti, J.L., Barbieri, P.A.G. Poblete y E. Sierra (1986): *El Régimen de precipitaciones de la provincia de San Juan y su entorno*. Informe Técnico 8. CIRSASJ-CONICET. IPGHOEA. 200 p. San Juan.
- Moreiras, S. (2006): Chronology of a probable neotectonic Pleistocene rock avalanche, Cordon del Plata (Central Andes), Mendoza, Argentina. Linking African palaeoenvironments and modern environments: PAGES Workshop. *Quaternary International*, 148: 138-148.
- Perucca, L. (1992): Fenómenos de remoción en masa y eventos sísmicos en la sierra de La Punilla. Precordillera noroccidental argentina. En: *II Simposio de Fallas Activas y Deformaciones Cuaternarias en la Cordillera de Los Andes*. Actas 1: 52-53. Venezuela.
- Perucca, L. (1995): *Actividad Tectónica cuaternaria en la sierra de La Punilla. San Juan - La Rioja. Argentina*. Tesis doctoral, Univ. Nacional de San Juan, 157p.
- Perucca, L. y Navarro, C. (2005): El terremoto de Jagüé, departamento Vinchina, provincia de La Rioja. En: *16 Congreso Geológico Argentino*. Actas 4: 501-504.
- Perucca, L., Paredes, J., Tello, G. y Bastias H. (1999): Fallamiento Activo en el área norte del Sistema de Fallamiento El Tigre, San Juan-La Rioja, Argentina. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 54:206-214.
- Rodríguez, C.E., Bommer, J.J. y Chandler, R.J. (1999): Earthquake-induced landslides: 1980-1997. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 18: 325-345.
- Scalabrini Ortiz, J. (1973): El Carbónico en el sector septentrional de la Precordillera sanjuanina. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 28: 351-377.
- Sepúlveda, S.A., Murphy, W. y Petley, D.N. (2005 a): Topographic controls on coseismic rock slides during the 1999 Chi-Chi earthquake, Taiwán. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 38: 189-196.
- Sepúlveda, S.A., Murphy, W., Jibson, R.W. y Petley, D.N. (2005 b): Seismically-induced rock slope failures resulting from topographic amplification of strong ground motions: The case of Pacoima Canyon, California. *Engineering Geology*, 80: 336-348.
- Uromehy A. y Maddavifar M.R. (2000): Landslide Hazard zonation of the Khorshrostan area, Iran. *Bulletin of Engineering Geology Environment*, 56: 207-213.
- USGS/NEIC (2007): *National Earthquake Information Center, World Data Center A for Seismology. Global Earthquake Search*. United States Geological Survey, National Earthquake Information Center. http://www.neic.cr.usgs.gov/neis/epic/epic_global.html.
- Varnes, D. (1978): Slope movement. Types and processes. En: *Landslides: analysis and control* (Schuster, R.L. y Krizek, R.J., Eds.). Transportation Research Board Special Report 176, National Academy of Sciences, Washington DC, 11-33.
- Yeats, R. (2007): Paleoseismology: Why can't earthquakes keep on schedule? *Geology*, 35: 863-864.

Manuscrito recibido el 12 de diciembre de 2007

Aceptado el manuscrito revisado el 13 de febrero de 2008