

# Procesos de remoción en masa y erosión fluvial en la quebrada del río Los Sosa, provincia de Tucumán

Diego S. FERNÁNDEZ<sup>1</sup> y María A. LUTZ<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Servicio Geológico Minero Argentino. Delegación Tucumán. Miguel Lillo 251 2 P. CC44 Suc. 2 (4000). Tucumán.  
E-mail: segemartuc@arnet.com.ar

**RESUMEN.** Durante las últimas precipitaciones que tuvieron lugar en la quebrada del río Los Sosa en los meses de verano de 2001, se registraron numerosos movimientos de remoción en masa y eventos de erosión fluvial que afectaron severamente a la ruta Provincial 307. El costo de las reparaciones que se tuvieron que realizar en la zona ascendió a US\$ 821.598, los que fueron afrontados mediante créditos externos. Los dos parámetros que tienen incidencia directa en esos procesos son: la progresiva acumulación de agua de prolongadas lluvias y la intensidad de las tormentas, a los que se suma la acción antrópica efectuada de manera intencional y/o accidental. En cuanto a los factores condicionantes, la litología y las pendientes cumplen un importante papel en el control del tipo de proceso desarrollado. Los flujos fueron observados en su mayoría en la zona donde afloran las metamorfitas de bajo grado, mientras que los deslizamientos de detritos en materiales previamente alterados por acción meteórica predominaron en la zona donde aflora la tonalita El Indio. En total se inventariaron 36 casos, correspondiendo en su mayoría a los deslizamientos superficiales, mientras que los de mayor magnitud fueron los flujos de detritos. La zona de mayor peligrosidad, que afecta a la ruta provincial 307, se encuentra ubicada entre los kilómetros 23 y 38, donde tienen lugar la mayoría de los movimientos de ladera.

**Palabras clave:** Remoción en masa, Deslizamientos, Peligrosidad geológica, Tucumán

**ABSTRACT.** Mass wasting and fluvial erosion processes in Río Los Sosas gulch, province of Tucumán, Argentina. During summer storms in late 2000 and early 2001 several mass wasting movements and fluvial erosion episodes took place along the Río Los Sosas and caused serious damage to Provincial Road N° 307, which runs parallel to the river course. The cost of the repairs amounted to US\$ 821,598, and was met by external credits. The two main environmental factors directly affecting the zone were the accumulative rainfall and the intensity of the storm. In addition, man-made alteration of the natural environment intensified the affects. Lithology and regional slopes also exerted a significant control on the type of processes observed. Thus, flows occurred mainly over outcrops of low-grade metamorphic rocks, whereas debris slides took place in previous altered materials formed by weathering of the "El Indio" tonalite. Thirty six separate events were recognized in the area; most were shallow debris slides, but debris flows were more impressive in terms of magnitude. A zone of maximum hazard zone was identified between km 23 and 38 of Provincial Road N°307 where the majority of the down-slope mass movements were recognized.

**Key words:** Mass wasting, Natural hazard, Debris slides, Debris flows, Tucumán province

## Introducción

Tanto los procesos de remoción en masa como los de erosión y desborde de los arroyos y ríos, constituyen fenómenos naturales en la evolución del relieve, que pueden generar grandes pérdidas materiales e incluso humanas. Es por ello que la identificación de los sectores donde tienen lugar, como así también la comprensión de los factores que los controlan, son de fundamental importancia para una correcta planificación territorial.

La quebrada del río Los Sosa se encuentra ubicada a 56 kilómetros al suroeste de la ciudad de San Miguel de Tucumán y es el paso obligado desde la llanura tucumana a los valles intermontanos de altura, ubica-

dos al oeste de la provincia (Tafí del Valle y Valles Calchaquies).

La ruta provincial 307 atraviesa la quebrada, conectando la población de Acherai con las localidades de La Angostura, Tafí del Valle y Amaicha del Valle (Fig. 1). Al ser la única vía directa hacia los valles, esta ruta presenta un importante tránsito vehicular, el que se incrementa en gran medida durante los meses de verano como consecuencia del turismo, una fecha que coincide con la época de máximas precipitaciones y por lo tanto, con la ocurrencia de los procesos geológicos aquí descriptos. Debido a esta situación, a lo largo de los años se han registrado numerosos accidentes en el lugar, con riesgo para la vida de los transeúntes, siendo los cortes de ruta un fenómeno que corrientemente se manifiesta año tras año.

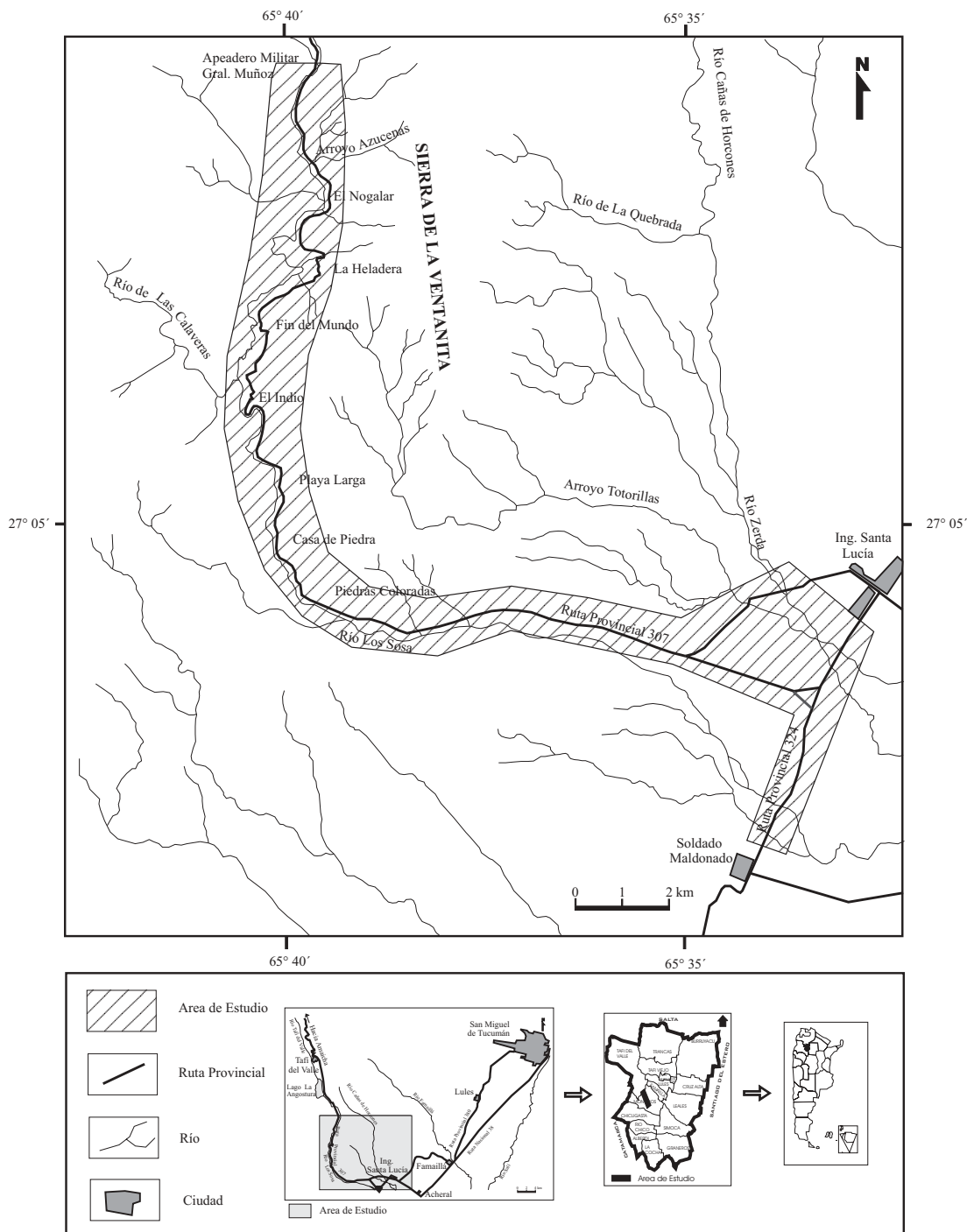


Figura 1: Mapa de ubicación del área de estudio.

En la zona de estudio se realizaron numerosos trabajos de índole geológica regional y estructural (Fernández 1997; Mansilla 1990; Marini 1988), sin registrarse hasta el momento trabajos orientados a la descripción de los procesos geológicos activos que tienen lugar en la citada quebrada. En el valle de Tafí, inmediatamente al norte de la zona de estudio, Collantes (1994) caracterizó los procesos de remoción en masa que tienen lugar en ese sector y remarcó la relación en-

tre la variabilidad climática y la intensidad y extensión de los procesos de remoción en masa antiguos.

El objetivo del presente trabajo es realizar una descripción y caracterización de los distintos procesos, tanto de remoción en masa como de erosión fluvial, observados en la zona de estudio, establecer los factores de control de los mismos y elaborar una zonificación de peligrosidad sobre las rutas del lugar por ser las zonas de mayor vulnerabilidad social del sector.

### Metodología

El trabajo de campaña consistió en reconocimientos del área de la quebrada del río Los Sosa, realizados en marzo de 2000, diciembre de 2000 y marzo de 2001, durante los cuales se procedió a la identificación, descripción y ubicación (mediante GPS y altímetro) de los principales sectores en donde ocurrieron los procesos. Además, se tomaron puntos de control de altura, que

fueron luego incluidos en la elaboración del modelo digital de altura y en el mapa de pendientes.

En una segunda fase, se trabajó sobre los datos obtenidos y se volcaron los puntos de chequeo sobre una base georreferenciada, utilizando el sistema de información geográfica MapInfo. Posteriormente se procedió a la elaboración de un mapa de pendientes (Fig. 3) y de un modelo digital de terreno (Fig. 2), con los datos de campo y los obtenidos a partir de la Hoja Topográfica

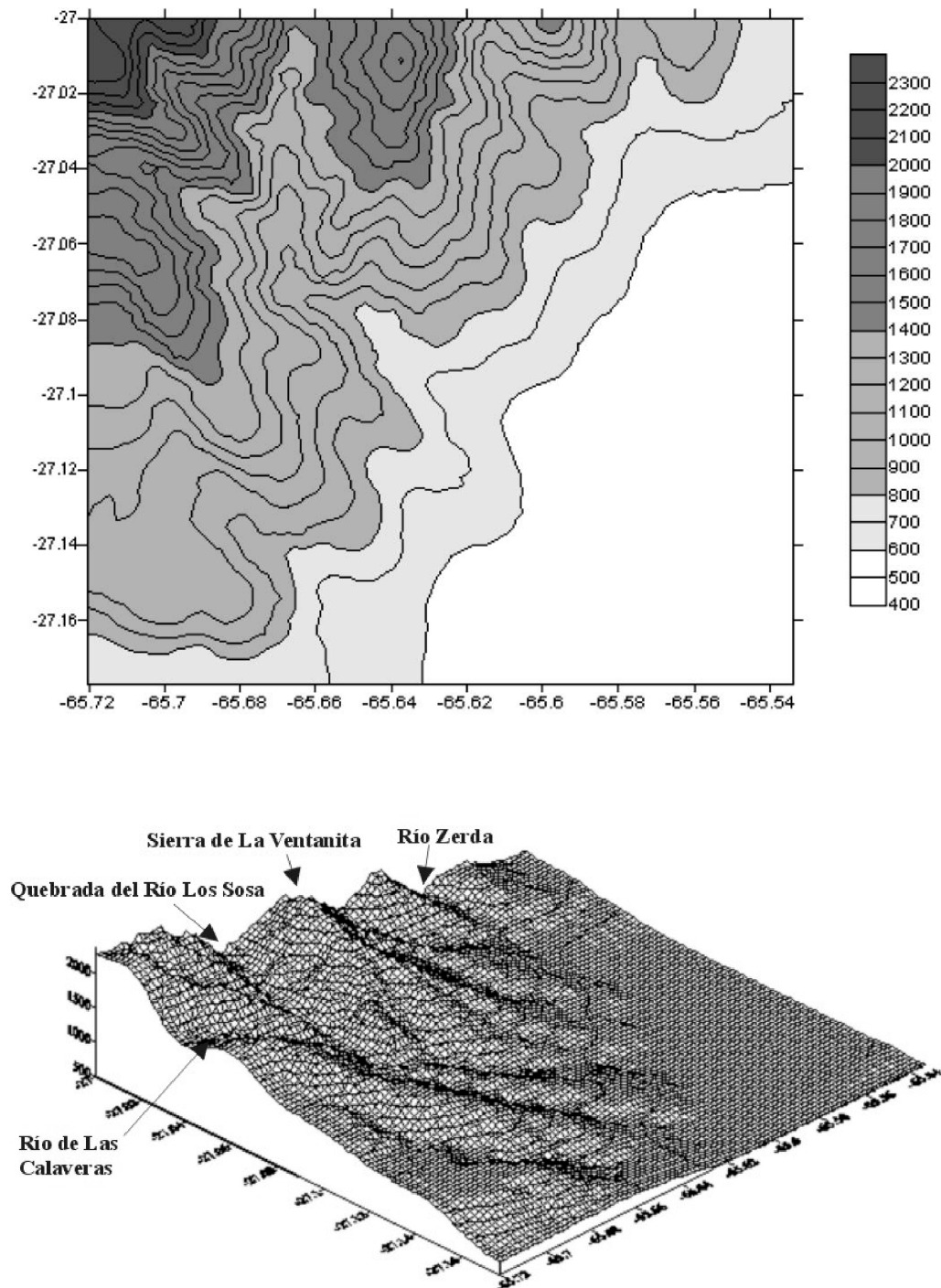


Figura 2: Modelo digital de elevaciones y representación en 3D del área de estudio.

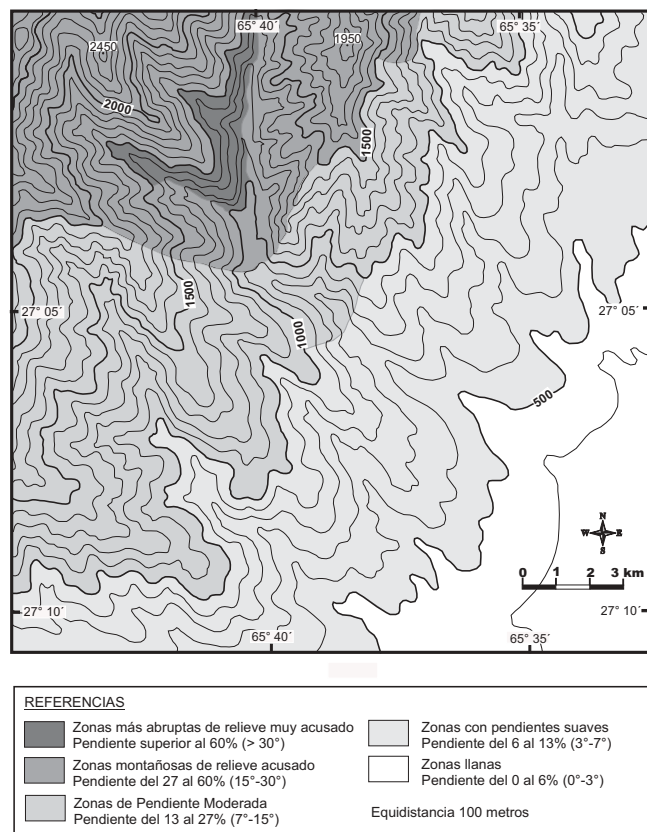


Figura 3: Mapa de pendientes del sector de estudio.

12e "Aconquija" a escala 1:100.000 del Instituto Geográfico Militar (1965), mediante los programas Surfer 7.0 y MapInfo 6.0.

Finalmente en base a los distintos mapas temáticos así obtenidos, se delimitaron zonas de distinta peligrosidad.

## Características del área de estudio

### Fisiografía

La quebrada del río Los Sosa está labrada sobre el bloque de basamento cristalino de la sierra del Aconquija, elevado tectónicamente, cuyo relieve está caracterizado por laderas abruptas y por una espesa cobertura vegetal selvática, que dificulta en gran medida el reconocimiento detallado de las distintas unidades geológicas.

El río Los Sosa divide al área en dos sectores principales, un sector occidental y un sector oriental. El sector occidental presenta alturas máximas que oscilan entre los 2200 y los 2400 ms.n.m., pertenecientes a los flancos sudeste y sur de los cerros Ñuñorco Chico y Ñuñorco Grande respectivamente, ubicados fuera del área de estudio. En el sector oriental las alturas máximas alcanzan los 1900 ms.n.m., representadas por la si-

erra de la Ventanita que separa a la quebrada del río Los Sosa de la quebrada del río Cañas de Horcones (Fig. 2).

Las pendientes generales para el área montañosa oscilan entre 10° para los sectores menos acusados y más de 50° para los más empinados. Hacia el sur los valores de las pendientes descienden a medida que se avanza sobre la zona pedemontana, obteniéndose inclinaciones generales que rondan los 6° (Fig. 3).

### Clima

La sierra del Aconquija constituye una barrera orográfica a la circulación de los vientos húmedos provenientes del sureste de la provincia de Tucumán, dando lugar a precipitaciones en su faldeo oriental, las que pueden alcanzar los 2000 mm anuales. Según Rohmeder y Kühn (1943) la mayor frecuencia de lluvias se produce entre los 1000 y 1500 metros de altura; allí las precipitaciones caen en forma de lloviznas persistentes, a menudo de varios días de duración. A mayores alturas predomina una neblina espesa y húmeda que limita la visibilidad y abarca una zona ubicada entre los 1500 y 3000 m sobre el nivel del mar.

Las precipitaciones más intensas tienen lugar durante el período estival, llegándose a registrar la caída de 120 mm en una hora.

La temperatura media anual para el sector ronda los 19° C, siendo la temperatura media del mes más caliente (enero) de 25° y la del mes más frío (julio) de 12° (Zuccardi y Fadda 1985).

### Vegetación

Las laderas húmedas del faldeo oriental de la sierra del Aconquija poseen un tipo de vegetación que está representada en todo el noroeste argentino por distintas comunidades vegetales pertenecientes a la provincia fitogeográfica de "Las Yungas", reconocida como de dominio amazónico por Cabrera y Willink (1980).

En esta provincia fitogeográfica, la variación florística se produce con el gradiente altitudinal, encontrándose:

*Selva Montana*: Constituye la formación vegetal que se desarrolla entre los 450 y 1400 m sobre el nivel del mar. Según Aceñolaza (1995), en líneas generales se encuentran tres estratos arbóreos diferenciados. El *estrato emergente* (25 a 35 metros) compuesto por especies como laurel, horco molle, cedro y pacará, un *estrato arbóreo intermedio* (10 a 20 metros) constituido por especies como el horco cebil, cebil colorado y el naranjillo y un *estrato arbóreo inferior* con especies como el arrayán, la ortiga y la papaya silvestre.

*Bosque Montano de Altura*: Ubicado altitudinalmente por encima de la Selva Montana, entre los 1500

y 2700 ms.n.m. aproximadamente. Cabrera (1976), diferencia en este piso altitudinal tres tipos de bosques: bosques de pino del cerro, bosques de aliso y bosques de queñoa.

*Pastizales de Altura:* Situados en el sector cumbre de los cordones montañosos.

### Geología

La zona de estudio está comprendida en el extremo norte de la provincia geológica de Sierras Pampeanas Noroccidentales. La geología del sector está caracterizada por un Basamento Metamórfico conformado por “Esquistos Listados” pertenecientes al Grupo Puncoviscana (González *et al.* 2000), a cuyos componentes psamo-pelíticos originales se les adjudica una edad precámbrica superior-cámbrica inferior. Este basamento aloja una serie de intrusivos ígneos que fueron asignados al Paleozoico inferior. En la zona analizada, aflora la tonalita El Indio entre los kilómetros 28 y 35 de la ruta provincial 307. Constituye un cuerpo intrusivo blanco grisáceo, foliado, fuertemente meteorizado y definido petrográficamente como tonalita biotítica (Fernández 1997).

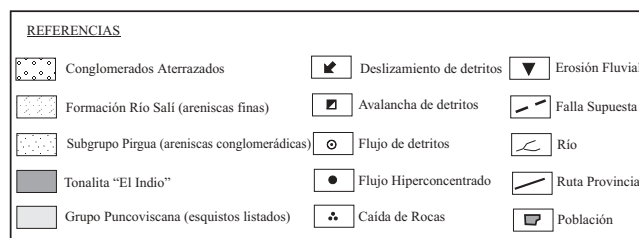
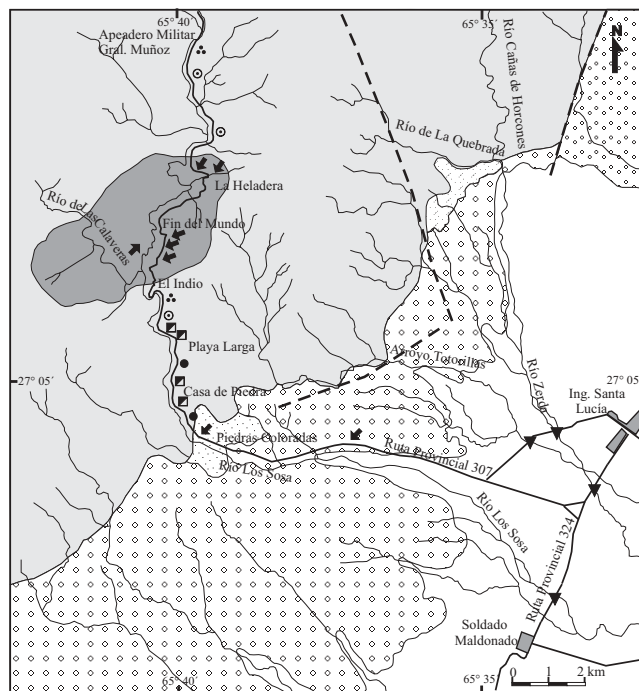
Sobre este basamento cristalino, entre los kilómetros 19 a 21,5 de la ruta citada, se apoyan sedimentitas de edad cretácica pertenecientes al Subgrupo Pirgua, representado por areniscas conglomerádicas consistentes en una secuencia granodecreciente, que comienza con un conglomerado rojizo, con clastos de cuarzo y fragmentos líticos subredondeados cuyos tamaños oscilan entre 2 a 5 cm, pasando hacia arriba a una arenisca gruesa.

Hacia el este de la quebrada del río Los Sosa, sobre el río de La Quebrada, afloran areniscas pardo rojizas, de grano fino, muy feldespáticas y friables pertenecientes a la Formación Río Salí.

Por último, en el sector pedemontano, se ubican depósitos cuaternarios terrazados de edad pleistocena-holocena, parcialmente cubiertos por sedimentos limo-loesicos. Se caracterizan por una alternancia de depósitos de grava gruesa con materiales limo-arenosos depositados bajo distintos regímenes de energía y que conforman lomadas bajas, redondeadas y muy erosionadas por la acción fluvial (Fig. 4).

### Estructura

La estructura de los “Esquistos Listados”, que constituye la litología de mayor extensión en la quebrada (Fig. 4), se caracteriza por presentar varios eventos deformativos superpuestos. Mansilla (1990), reconoce un primer evento ( $S_1$ ) que produjo pliegues tipo *chevron* con clivaje de plano axial que se manifiesta en forma del bandeado característico de los esquistos, y



**Figura 4:** Mapa donde se observa la relación entre la litología y los procesos relevados.

un segundo evento ( $S_2$ ) que deforma al primero, y genera pliegues asimétricos. Este último es coincidente con la esquistosidad, la cual presenta una orientación oblicua, en algunos casos casi perpendicular, a la traza de la ruta provincial 307. A su vez, el macizo se encuentra afectado por 2 juegos de cizalla principales que se suelen interceptar formando ángulos de  $120^\circ$ .

Según Valoy (1982) los taludes naturales con pendientes moderadas ( $25^\circ$  a  $40^\circ$ ) observados en las rocas metamórficas de los caminos montañosos del norte argentino, están relacionados con discontinuidades que corresponden a diaclasas de cizalla o a planos de esquistosidad, mientras que los que presentan pendientes de alto ángulo ( $>50^\circ$ ), se deben a discontinuidades de alto ángulo, moderadamente separadas ( $> 30$  cm), originadas por diaclasas de extensión.

### Procesos geomorfológicos

Los procesos geomorfológicos de mayor magnitud observados en la zona, que conllevan peligro para la

vida humana, respondieron a desbordes de cauces torrentosos y procesos de remoción en masa.

#### *Erosión y desborde de ríos y arroyos de montaña*

Este fenómeno fue observado en el río Zerda, en el arroyo Totorillas y en el río Los Sosa, a la altura de los puentes sobre las rutas 307 y 324 (Fig. 4). Constituyen cursos de agua que discurren por terrenos cuyas pendientes son del orden del 20%, que durante el verano, cuando se producen las precipitaciones más intensas del sector, son capaces de movilizar grandes volúmenes de agua y sedimentos, alcanzando a transportar bloques de hasta 1 metro cúbico.

En febrero de 2001 se produjo el corte y destrucción de la ruta provincial 307 en su tramo sobre el río Zerda y el arroyo Totorillas. En el caso del río Zerda, el cual a la altura de dicha ruta tiende a dividirse en 2 pequeños cursos los cuales se unen aguas abajo, el brazo sur creció en gran medida y erosionó 50 metros de la ruta, mientras que en el brazo norte se produjo el colapso del puente por erosión de los estribos del mismo. La longitud total de la ruta afectada por la acción de este río fue de 150 a 200 metros. Aguas abajo, a la altura de la ruta provincial 324, los efectos de la crecida del río quedaron evidenciados por la erosión que sufrieron ambos estribos del puente.

En el arroyo Totorillas el gran aumento de caudal que originaron las intensas precipitaciones del sector, se tradujo en un ensanchamiento de la planicie aluvial del arroyo, socavando principalmente la margen sur y produciendo un corte en la ruta de 40 metros. Se determinó que durante las crecidas de 2001, su planicie aluvial se extendió de 25 metros a casi 60 metros, quedando el puente sobre la ruta (cuya luz original era de 30 metros), en el medio de la misma y registrándose cortes de la ruta por fuera de los estribos.

El otro sector afectado durante el mismo período fue la ruta provincial 324, a la altura del puente sobre el río Los Sosa, en donde se produjo la destrucción del estribo sur como consecuencia de su socavamiento por erosión lateral. También fue afectado el pilote central, debido a la acción de la erosión de fondo de la corriente.

#### *Procesos de remoción en masa*

Constituyen los procesos geológicos activos más abundantes y espectaculares de la quebrada del río Los Sosa y tienen lugar en las laderas de pendientes abruptas (Fig. 4). Los distintos tipos de remoción en masa reconocidos en la zona fueron agrupados en el Cuadro 1. Para su descripción se utilizaron los trabajos de Varnes (1975) y de Pierson y Costa (1987).

*Deslizamientos:* Son muy abundantes en las laderas con altas pendientes, se reconocieron 3 tipos principa-

**Cuadro 1:** Procesos de remoción en masa identificados en el área de estudio.

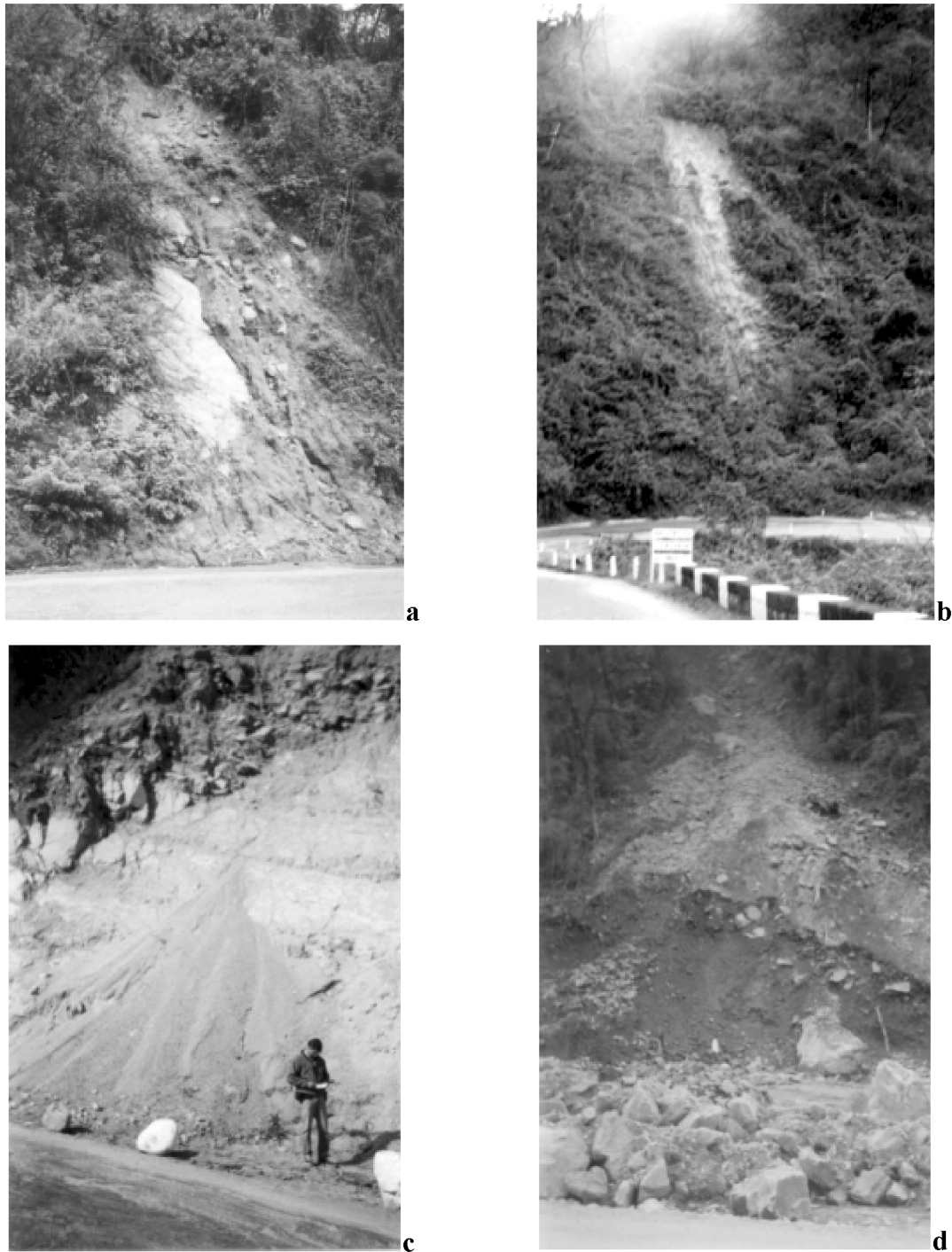
Tipo de movimiento	Proceso identificado
Deslizamientos	Deslizamiento de tierra ( <i>Earth Slide</i> )
	Deslizamiento de detritos ( <i>Debris Slide</i> )
	Avalancha de detritos ( <i>Debris Avalanche</i> )
Flujos	Flujo de detritos ( <i>Debris Flow</i> )
	Flujo hiperconcentrado ( <i>Hyperconcentrated Flow</i> )
Caídas	Caída de rocas ( <i>Rock Fall</i> )
Movimiento complejo	Combinación de deslizamientos y flujos

les: deslizamientos de tierra (*earth slide*), deslizamiento de detritos (*debris slide*) y avalanchas de detritos (*debris avalanche*). Estos procesos comienzan como movimientos pendiente abajo que se desplazan por superficies de deslizamientos dadas por la interfase suelo-roca meteorizada (Fig. 5a) o por superficies de foliación o diaclasamiento en las rocas fracturadas del basamento metamórfico.

Los deslizamientos de tierra y de detritos constituyen movimientos traslacionales, de características poco profundas y que tienen esencialmente un plano de deslizamiento recto (Fig. 5b). La profundidad de dicho plano, en estos tipos de movimientos, generalmente se ubica entre 1 y 4 metros, siendo una particularidad de los mismos que la longitud del deslizamiento es mayor que la profundidad del mismo (Selby 1993).

Un caso especial de deslizamientos de detritos bajo condiciones “secas” tuvo lugar en la tonalita El Indio. Se ha observado que en aquellas zonas donde se produjeron deslizamientos durante las intensas precipitaciones, los materiales que quedaron adheridos al plano de deslizamiento o los fragmentos de la parte superior de la cicatriz del deslizamiento que no llegaron a moverse, al secarse, son incapaces de permanecer en pendientes superiores a 30° por lo cual se desplazan pendiente abajo (Fig. 5c).

La distinción entre los deslizamientos de detritos y las avalanchas de detritos se basa en el grado de deformación del material y del contenido de agua de la masa deslizada. Tanto el grado de deformación como el contenido de agua frecuentemente aumentan pendiente abajo, por lo tanto las avalanchas de detritos obser-



**Figura 5:** **a.** Plano de deslizamiento de detritos que coincide con la interfase suelo-roca en el km 28. **b.** Cicatriz de un deslizamiento de detritos en la tonalita El Indio, observado en la zona de La Heladera. **c.** Deslizamiento de detritos bajo condiciones “secas” en la tonalita El Indio. **d.** Depósito de una avalancha de detritos en el Kilómetro 24.

vadas en la zona se habrían originado durante las intensas precipitaciones a partir de deslizamientos que tuvieron lugar en los sectores más altos de las laderas. A medida que la masa de pequeños bloques y detritos se deslizó ladera abajo fue adquiriendo mayor deformación y fueron ganando en contenido de agua y aire hasta transformarse en un “deslizamiento fluente” com-

puesto por detritos y sedimentos finos, agua y aire, que responde a lo que Sharpe (1938) originalmente definió como avalancha de detritos (*debris avalanche*) y que Pierson y Costa (1987) lo clasifican dentro de la categoría de flujos granulares masivos.

Las avalanchas de detritos que descienden de las laderas de la sierra de La Ventanita, al interceptar la ruta

provincial 307 sufren una pérdida abrupta de energía como consecuencia del brusco cambio de pendiente, lo que origina la depositación del material grueso (bloques y detritos) conformando conos de detritos cuyos espesores pueden alcanzar los 4 a 5 metros de espesor (Fig. 5d).

*Flujos:* Según Murck *et al.* (1996), cuando una fuerza es aplicada sobre cualquier material deformable, éste comenzará a fluir. En el proceso de remoción en masa, la fuerza es la gravedad y el material consiste en mezclas densas de sedimentos, agua y aire. Los procesos de remoción en masa que involucran tales mezclas son llamadas flujos.

En la zona de estudio han sido reconocidos dos tipos de flujos principales que responden a flujos de detritos y flujos hiperconcentrados.

En el caso de los flujos de detritos, se tratan de flujos densos con un comportamiento plástico en donde la mezcla sedimento-agua se mueve como una sola fase. Los depósitos dejados por este tipo de movimiento en la quebrada se caracterizan por formar conos de detritos, matrix portante y donde los clastos de mayor tamaño se encuentran en la parte más alta del depósito. Otro rasgo distintivo es su alta deformación interna durante el movimiento.

Estos flujos fueron iniciados a partir de deslizamientos de las laderas ubicadas a ambos márgenes del canal principal (Fig. 6a) o por acumulación de sedimentos en *chutes* o canaletas laterales a partir de la erosión y/o meteorización en sus márgenes y sustrato.

Los flujos hiperconcentrados fueron observados en pequeños arroyos que descienden de las laderas y se caracterizan por ser corrientes de agua con una gran carga de sedimentos y lo suficientemente densos como para conferirles un carácter de flujo no newtoniano pero sin llegar a exhibir un comportamiento plástico (Selby 1993).

Los depósitos que resultan de estos flujos presentan una naturaleza intermedia entre una corriente de agua normal y un flujo de detritos y se particularizan por ser clastos portantes y tener un menor contenido de matrix que los flujos de detritos (Fig. 6b).

Es de destacar que la diferenciación entre estos 2 tipos de flujos sólo se pudo realizar en pocos casos, debido a lo complejo que resulta la misma.

*Movimientos Complejos:* De acuerdo a Varnes (1975) se denomina movimiento complejo a la combinación de 2 o más tipos de procesos. Este tipo de movimientos tuvieron lugar en laderas con pendiente superior a 25° y coincidieron con los sectores en los que la vegetación original fue afectada por un incendio del año 1999. Se originan a partir de 3 o más deslizamientos superficiales que confluyen en un mismo canal, depositando gran cantidad de material el cual se mezcla con el agua proveniente de las laderas y de los cauces menores, licuándose hasta convertirse en flujos. Este tipo

de proceso de formación de flujos a partir de una serie de deslizamientos fueron descritos con anterioridad por otros autores en países como Venezuela y Estados Unidos (Ellen and Fleming 1987; Cannon 1997; Wieczorek *et al.* 2001).

*Caída de Rocas:* Tienen lugar en los sectores conocidos como Angosto del Naranjal y Kilómetro 32, donde personal de Vialidad Provincial realizó voladuras con el objetivo de ensanchar la ruta provincial 307. El proceso tiene lugar en paredones subverticales, conformados por materiales esquistosos muy fracturados que durante las lluvias se ven sometidos a un aumento de presión en sus grietas, facilitando el desprendimiento y caída de rocas.

#### *Factores de control*

Según Ferrer Gijón (1995), los factores que controlan los procesos, sobre todo los movimientos de ladera, pueden quedar agrupados en factores condicionantes y factores desencadenantes. Los primeros están unidos a la propia naturaleza, composición, estructura y forma de terreno, mientras que los desencadenantes pueden ser considerados como “externos”, ya que al actuar sobre el terreno provocan o desencadenan los procesos al modificar las condiciones de equilibrio pre-existentes.

#### *Factores desencadenantes*

En la quebrada del río Los Sosa, la lluvia constituye el principal factor desencadenante de los procesos observados. El efecto que provoca sobre los materiales es el incremento de las presiones intersticiales (*pore-pressure*) y el flujo de agua a través del terreno. Esto genera una disminución en la resistencia al corte de los materiales, además de elevar su peso e influir en sus propiedades resistentes.

Los dos parámetros relacionados con las precipitaciones que tienen incidencia directa en la zona son la progresiva acumulación del agua con lluvias persistentes y la intensidad de las tormentas de verano. En la quebrada, la mayor parte de las lluvias tiene lugar durante el período estival, lo que genera la saturación estacional de los materiales porosos. Por otro lado, en los últimos años, se ha observado un aumento en el volumen e intensidad de estas precipitaciones, un hecho que fue relacionado con fenómenos meteorológicos como la corriente de El Niño (Toledo *et al.* 2001).

Según registros pluviométricos, el 14 de febrero de 2000 cayeron 210 mm en 6 horas, mientras que el 12 de febrero de 2001 se produjo la tormenta de mayor intensidad en los últimos 15 años, registrándose 200 mm en 2 horas y media. Ello desencadenó un gran aumento en el caudal de los ríos y la ocurrencia de numerosos movimientos de ladera que mantuvieron cortada la ruta provincial 307 por varios días.





**Figura 6:** **a**, Flujo de detritos en el km 39 en los esquistos listados, se puede observar la cicatriz de deslizamiento original y sobre la ruta el cono de detritos que depositó. **b**, Depósito de un flujo hiperconcentrado.

El otro factor desencadenante es el antrópico, ya que juega un papel importante en los cambios que introduce sobre el sistema de manera intencional y/o accidental. De esta manera se han identificado dos acciones que actuando de manera conjunta con las precipitaciones generaron procesos de remoción en masa. Por un lado, la desestabilización de las laderas que se produce por los cambios en la geometría y pendiente de las laderas, como consecuencia de la necesidad de ensanchar

la ruta provincial 307. Por el otro, la generación de incendios, intencionales o no, en la Selva Montana.

El último incendio registrado data de agosto del año 1999 y abarcó una franja de aproximadamente 30 kilómetros de longitud desde la sierra de la Ventanita al norte, hasta el parque nacional Campo de Los Alisos al sur, con un ancho promedio de 8,5 kilómetros medido sobre la ruta provincial 307. Este incendio afectó principalmente a la Selva Montana y al Bosque Montano

de altura. La pérdida de cobertura y protección como consecuencia de este evento, se tradujo en la aparición de numerosos deslizamientos traslacionales durante las tormentas de los años 2000 y 2001, en sectores en donde en el pasado no se tenían registros de movimientos gravitacionales.

Hasta la fecha la vegetación original no se ha regenerado, observándose en aquellos sectores afectados por el incendio únicamente la presencia de plantas parásitas, las cuales no ofrecerán resistencia a las intensas precipitaciones del sector.

### Factores condicionantes

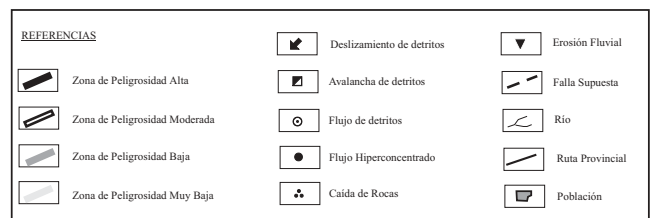
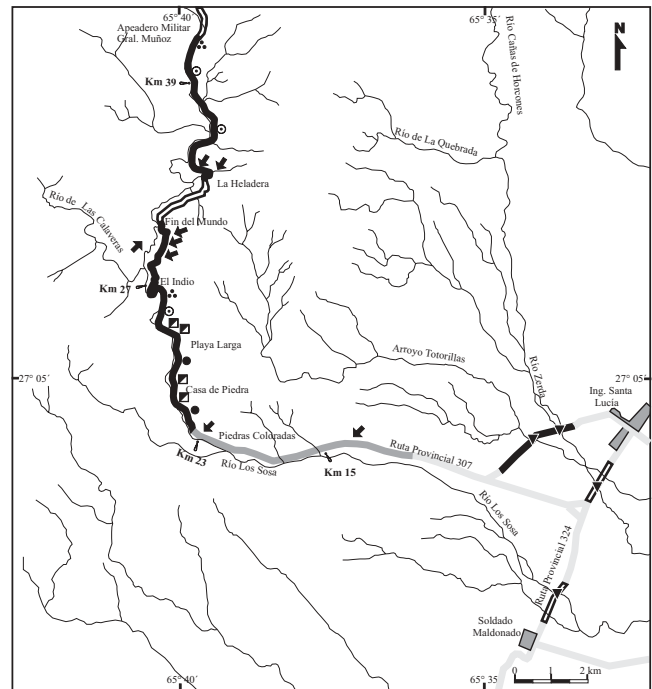
**Litología:** La litología cumple un papel muy importante en el control del tipo de movimiento generado. De esta forma, se observó que las avalanchas de detritos y los flujos sólo se registraron en materiales esquistoos, mientras que los deslizamientos de detritos "secos", tuvieron lugar sólo en el tramo que aflora la tonalita El Indio.

En el caso de los deslizamientos de detritos y de tierra, ocurrieron en casi todas las litologías, lo que sugiere que el control de los mismos está dado por la interfase roca fresca-material meteorizado y por el grado de pendiente (Fig. 6c).

La combinación del factor litológico y el grado de meteorización es de singular importancia en el caso de la tonalita El Indio. La relación entre la litología y los procesos mapeados pueden observarse en la figura 4.

**Pendientes:** La pendiente juega un papel preponderante en el control de los procesos de remoción en masa, toda vez que se tratan de movimientos gravitacionales por excelencia. En el sector de estudio predomina las pendientes altas producto del relieve montañoso. Casi la totalidad de los movimientos identificados se produjeron en pendientes superiores a  $10^\circ$ , mientras que los eventos de mayor magnitud acontecieron a partir de los  $20^\circ$ . Se debe tener en cuenta que las pendientes antes mencionadas son generales para todo el sector, por lo que en algunos procesos tiende a ser más importante la pendiente del talud que la general del terreno; es el caso de los procesos de deslizamientos de detritos bajo condiciones "secas" y de caída de rocas. En este último se observan taludes que superan los  $70^\circ$  y que fueron realizados artificialmente por medio de voladuras, por lo cual existiría una sinergia importante entre ambos factores.

**Suelos:** Al constituir suelos de poca profundidad efectiva, éstos suelen saturarse rápidamente con el agua de las precipitaciones y fluir bajo la acción de la gravedad. Es importante recalcar el delicado equilibrio existente entre los suelos y la vegetación selvática, que los protege de la erosión y les brinda los nutrientes necesarios que permiten la formación de un epipedón úmbrico



**Figura 7:** Mapa de zonificación de la peligrosidad realizado sobre las rutas provinciales 307 y 324.

con altos contenidos de materia orgánica que posibilitan el crecimiento de la exuberante selva. Al eliminarse la misma, el horizonte superficial de estos suelos se erosiona con suma facilidad, debido a su fragilidad estructural, facilitando la ocurrencia de deslizamientos de tierra.

### Zonificación

En función del análisis de los factores condicionantes y de la presencia y magnitud de los procesos, se realizó una zonificación de la peligrosidad geológica sobre las rutas mencionadas, por ser el lugar de mayor vulnerabilidad de las personas frente a los procesos en la quebrada. Así se establecieron 4 zonas de distinta peligrosidad (Fig. 7):

-*Zona de Peligrosidad Alta:* Zonas sujetas a inestabilidades o procesos erosivos importantes debido a su frecuencia, intensidad o extensión.

-*Zona de Peligrosidad Moderada:* Zonas sujetas a problemas de inestabilidad o a procesos de erosión de relativa importancia.

-Zona de Peligrosidad Baja: Zonas sujetas a problemas de inestabilidad o a procesos erosivos poco importantes o de carácter esporádico.

-Zona de Peligrosidad Muy Baja: Zonas con características poco favorables para la ocurrencia de procesos peligrosos y en donde durante el relevamiento no se encontraron indicios de los mismos.

## Conclusiones

Las precipitaciones intensas, por sí mismas o precedidas inmediatamente por otras, pueden desencadenar de forma relativamente rápida movimientos superficiales en zonas de fuerte pendiente, reactivar antiguos planos de deslizamientos o activar aquellos potenciales.

Se inventariaron 36 procesos en total, pudiéndose identificar sólo 23 en la figura 4, por razones de escala.

Los flujos observados en la quebrada del río Los Sosa, tienen lugar principalmente en los sectores en donde afloran las rocas metamórficas fuertemente fracturadas.

Los procesos más comúnmente observados fueron los deslizamientos de detritos, mientras que aquéllos de mayor magnitud son las avalanchas de detritos y los flujos de detritos, destacándose entre éstos últimos el del km 39, que depositó aproximadamente 14.100 m<sup>3</sup> de materiales.

Las zonas afectadas por movimientos de ladera a lo largo de la ruta provincial 307 abarcaron desde el kilómetro 15 hasta el kilómetro 43. Se pudieron distinguir 5 zonas bien diferenciadas:

-Zona 1: Caracterizada por deslizamientos en materiales conglomerádicos cuaternarios. La longitud afectada fue de 800 metros.

-Zona 2: Deslizamientos superficiales en las areniscas y conglomerados finos de la Formación Pircua. La longitud afectada fue de 300 metros.

-Zona 3: Abarca desde el kilómetro 20 hasta el kilómetro 26; se observaron deslizamientos de detritos, avalanchas de detritos, flujos hiperconcentrados y caída de rocas. Tuvieron lugar en los materiales esquistosos del Grupo Puncoviscana.

-Zona 4: Zona de múltiples deslizamientos y movimientos complejos. La longitud afectada fue de 6,25 kilómetros. Fueron observados en los esquistos del grupo Puncoviscana y en la tonalita El Indio.

-Zona 5: Se extiende desde el kilómetro 36 hasta el kilómetro 40 y fueron reconocidos deslizamientos de detritos, flujos de detritos, movimientos complejos y caída de detritos. Afectaron a los esquistos del Grupo Puncoviscana.

La zona de mayor peligrosidad del área estudiada se encuentra ubicada entre el kilómetro 23 y el kilómetro 40 de la ruta provincial 307 en donde se suceden distintos tipos de movimientos de ladera. Los puentes sobre el río Zerda y el Arroyo Totorillas, cuyos caudales

aumentan considerablemente en pocas horas durante las intensas precipitaciones, constituyen otro sector de gran peligro para los transeúntes.

## Agradecimientos

Al Servicio Geológico Minero Argentino (SEGEMAR), por el importante apoyo económico brindado sin el cual no hubiera sido posible realizar el presente trabajo. A los árbitros por los valiosos aportes que realizaron durante la lectura crítica del presente trabajo y que redundaron en una mejora significativa del mismo.

## TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

- Aceñolaza, P., 1995. Estructura y dinámica de bosques de Aliso (*Alnus acuminata* HBKssp *acuminata*) de la provincia de Tucumán. Tesis doctoral de la Facultad de Ciencias Naturales e IML. Universidad Nacional de Tucumán. Inédito.
- Cabrera, A., 1976. Fitogeografía de la República Argentina. Enciclopedia Argentina de Agricultura y Jardinería, 2 (1): 74. Buenos Aires.
- Cabrera, A. y Willink, A., 1980. Biogeografía de América Latina. Serie Biológica: Monografía 13. OEA. Washington. 122 p.
- Cannon, S. H., 1997. Evaluation of the potencial for debris and hyperconcentrated flows in Capulin Canyon as a result of the 1996 Dome Fire, Bandelier National Monument, New Mexico. Open File Report 97-136. U. S. Geological Survey.
- Collantes, M., 1994. Caracterización de los procesos de remoción en masa en la cuenca del río Tafi, Tucumán, Argentina. Actas del I Congreso Argentino de Cuaternario y Geomorfología: 113-122.
- Ellen, S. D. and Fleming, R. W., 1987. Mobilization of debris flows from soil slips, San Francisco Bay region, California. In Costa, J. E. and Wicczorek, G. F., eds., Debris flows/avalanches: Process, recognition and mitigation. Geological Society of America, Reviews in Engineering Geology, 7: 31-40.
- Fernández, D. S., 1997. Prospección geológica y geoquímica de la quebrada del río Los Sosa. Seminario de la Facultad de Ciencias Naturales e IML, Universidad Nacional de Tucumán. Inédito.
- Ferrer Gijón, M., 1995. Los movimientos de ladera en España. En: "Reducción de Riesgos Geológicos en España". Instituto Tecnológico Geominero de España (ed.). Madrid.
- Gonzalez, O., Mon, R., Viruel, M. E., Barber, E. y Tchilinguirian, P., 2000. Hoja Geológica 2766-II "San Miguel de Tucumán". Boletín N° 245. Servicio Geológico Minero Argentino. Buenos Aires.
- Instituto Geográfico Militar. 1965. Hoja Topográfica 12e "Aconquija", provincia de Tucumán.
- Mansilla, N., 1990. Estudio estructural del basamento metamórfico del río Los Sosa, entre los kilómetros 35 y 40 de la ruta provincial N° 307, provincia de Tucumán. Facultad de Ciencias Naturales e IML, Universidad Nacional de Tucumán. Inédito.
- Marini, O., 1988. Estudio estructural a lo largo del Río Los Sosa, entre los km 23-28 de la ruta 307, provincia de Tucumán. Facultad de Ciencias Naturales e IML, Universidad Nacional de Tucumán. Inédito.
- Murck, B., Skinner, B. and Porter, S., 1995. Environmental Geology. John Wiley & Sons. 520 p. New York.
- Pierson, T. C. and Costa, J. E., 1987. A rheologic classification of subaerial sediment-water flows. In Costa J. E. and Wicczorek G. F., eds., Debris Flows/Avalanches: Geological Society of America Reviews in Engineering Geology, 3: 1-12

- Rohmeder, G. y Kühn, F., 1943. Estudio fisiográfico de las sierras de Tucumán. Monografía N° 3, Instituto de Geografía de la Universidad Nacional de Tucumán. Tucumán.
- Selby, M. J., 1993. Hillslope materials and processes. Oxford University Press. Second Edition 446 p. New York.
- Sharpe, C. F. S. 1938. Landslides and related phenomena. 131 p. Pageant Books Inc., New Jersey.
- Toledo, M., Fernandez, R. y Sayago, J.M., 2001. El embalse Río Hondo como geoindicador del creciente deterioro ambiental en sus cuencas de aporte. Actas de la 3° Reunión Nacional de Geología Ambiental y Ordenación del Territorio y 1° Reunión de Geología Ambiental y Ordenación del Territorio del Area Mercosur. Formato digital.
- Valoy, J.C., 1982. Taludes y deslizamientos en rutas del norte argentino. Actas 5° Congreso Latinoamericano de Geología, 4: 53-67. Argentina.
- Varnes, D. J., 1975. Slope movements in the Western United States. En Mass Wasting (Norwich: Geo Abstracts), 1-17.
- Wieczorek, G. F., Larsen, M. C., Eaton, L. S., Morgan, B. A. and Blair, J. L., 2001. Debris flow and flooding hazards associated with the December 1999 storm in coastal Venezuela and strategies for mitigation. Open File Report 01-0144. U. S. Geological Survey.
- Zuccardi, R. y Fadda, G., 1985. Bosquejo agrológico de la provincia de Tucumán. Miscelánea N° 86, Facultad de Agronomía y Zootecnia. 63 p. Tucumán.

**Recibido:** 18 de febrero, 2002

**Aceptado:** 14 de abril, 2003