

# INDICE

Trabajo	Autor/es	Pág
Editorial		
Instrucciones para autores		
Geología, estructura y caracterización geotécnica del sector de cierre y embalse de la presa Río Grande Provincia de San Luis, Argentina	<i>Cuesta, Rubén O. Massabie, Armando C.</i>	1
El interés público de la Geología	<i>Di Salvo, Carlos Alberto</i>	11
La geología, las ciudades y los proyectos urbanos Un abordaje histórico y presente	<i>Di Salvo, Carlos Alberto Rimoldi, Horacio Víctor</i>	15
Deslizamiento de ladera sobre la Ruta Provincial N° 9 Localidad de Nogolí - Provincia de San Luis	<i>Gardini, Carlos E. - Sales, Daniel A. Ricci, Walter R.</i>	23
Deslizamientos y rasgos asociados producidos en el año 2001 en un sector de las sierras septentrionales Provincia de Buenos Aires	<i>Gentile, Rodolfo Osvaldo Villalba, Horacio Alejo</i>	31
Cartografía de peligrosidad geológica en la zona de San Martín de los Andes, Neuquén	<i>Lara, Jorge - Pereyra, Fernando X.</i>	45
Susceptibilidad de agregados silíceos a la degradación frente a la reacción álcali - sílice	<i>Maiza, Pedro J. - Marfil, Silvina A.</i>	61
Caracterización geoambiental de los ríos de la ciudad de Salta y su influencia en el Espacio Geológico Urbano (EGU), Argentina	<i>Marcuzzi, Jorge J. - Rojas, Luis Vera Sanchez, Hugo - Gutierrez, Miguel</i>	65
Características geológicas y geotécnicas de la vertiente oriental andina en la provincia de Tucumán	<i>Mon, Ricardo - Eremchuk, Jorge E. Minetti, Juan L.</i>	73
Mejoramiento y búsqueda de nuevas aplicaciones en Materiales Regionales	<i>Muñoz, Luis - Torrán, Eduardo Treppo, Oscar - Schalamuk, Isidoro</i>	89
Las redes hidrográficas como modelos de reconocimiento en aerofotointerpretación	<i>Popolizio, Eliseo</i>	97
Estimación de la recarga de las aguas subterráneas a partir de la elaboración y análisis de mapas de suelo	<i>Rivas, Raúl - Varni, Marcelo Entraigas, Ilda - Usunoff, Eduardo</i>	105
Características hidrológicas de Bahía del Diablo Isla Vega, Península Antártica	<i>Silva Busso, A. - De Angelis, H. Skvarca, P. - Ermolin, E.</i>	113
Geomorfología de la cuenca del Río Purmamarca Jujuy - Argentina	<i>Soler, Ramiro Daniel</i>	121
Estudio de sistematización de las cuencas de ríos y arroyos del faldeo oriental de la sierra de San Javier Importancia de la geología, geotecnia, hidrología y sismicidad Provincia de Tucumán República Argentina	<i>Suayter, Luis - Sirombra, Martín Torres de Plaza, Marta Benítez de Parra, Lidia - Toscano, Victoria Fernández, Rubén López García, María Delfina</i>	135

# Revista de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente



Publicación Oficial de la

ASOCIACION ARGENTINA  
DE GEOLOGIA APLICADA  
A LA INGENIERIA



# Revista de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente



Publicación Oficial de la

ASOCIACION ARGENTINA  
DE GEOLOGIA APLICADA  
A LA INGENIERIA

Número 19 ■ 2003

ISSN 0326-1921



0326-1921

## COMISIÓN DIRECTIVA

PRESIDENTE	<i>Carlos Alberto Di Salvo</i>
VICEPRESIDENTE	<i>Horacio V. Rimoldi</i>
SECRETARIO	<i>María Beatriz Ponce</i>
PROSECRETARIO	<i>Jorge Eduardo Caló</i>
TESORERO	<i>Alfredo N. Del Mónaco</i>
PROTESORERO	<i>Ricardo Dubois</i>
VOCAL TITULAR	<i>María Alejandra González</i>
VOCAL TITULAR	<i>Roberto Kokot</i>
VOCAL TITULAR	<i>Rubén O. Cuesta</i>
VOCAL SUPLENTE	<i>Adrián A. Silva</i>
VOCAL SUPLENTE	<i>Martín Guichón</i>
VOCAL SUPLENTE	<i>Ángel Marcos</i>
REVISORES DE CUENTAS	<i>Jorge J.C. Colombo</i> <i>José Luis Guerrero</i> <i>Guillermo E. Turazzini</i> <i>Fernando Díaz</i>

## REVISTA DE GEOLOGÍA APLICADA A LA INGENIERÍA Y AL AMBIENTE

DIRECTOR: *Dr. Horacio V. Rimoldi*  
EDITOR ASOCIADO: *MSc Norberto Jorge Bejerman*

## COMITÉ EDITORIAL

*Dr. Jorge O. Codignotto*  
*Geól. Juan Carlos Malecki*  
*Dr. Armando C. Massabie*  
*Dr. Ricardo Mon*  
*Dr. Jorge Santa Cruz*  
*Ing. José Speziale*  
*Ing. Oscar Vardé*  
*Dr. Bernardo Zakalik*

## DELEGADOS REGIONALES (2003 - 2005)

REGIÓN NOROESTE	Titular: <i>Felipe Rivelli</i> Suplente: <i>Juan Carlos Valoy</i>
REGIÓN CENTRO NORTE	Titular: <i>Eliseo Popolizio</i> Suplente: <i>Roberto Torra</i>
REGIÓN MESOPOTAMIA	Titular: <i>Luis Muñoz</i> Suplente: <i>Eduardo Díaz</i>
REGIÓN LITORAL	Titular: <i>Oscar Albert</i> Suplente: <i>Carlos Canoba</i>
REGIÓN CUYO	Titular: <i>Bernardo Zakalik</i> Suplente: <i>Rodolfo Cantarelli</i>
REGIÓN CENTRO	Titular: <i>Alberto E. Rusculleda</i> Suplente: <i>Juan Carlos Malecki</i>
REGIÓN PATAGONIA NORTE	Titular: <i>Eloy Depiante</i> Suplente: <i>Carlos Yema</i>
REGIÓN PATAGONIA SUR	Titular: <i>Nestor Hirtz</i> Suplente: <i>Mario Grizinik</i>



## EDITORIAL

---

*Ya finalizando un año, que ha dejado su marca en la Asociación, le acercamos un nuevo ejemplar de nuestra Publicación Oficial.*

*Se incluyen en este número el conjunto de trabajos que fueron presentados en el Simposio desarrollado en octubre de 2001 en Bahía Blanca y que estaban pendientes de publicación. Los mismos se relacionan con las distintas áreas del conocimiento que formaron parte de la citada convocatoria.*

*Además, se incorporaron trabajos que, relacionados con distintos aspectos de la geología ingenieril, nos permiten seguir avanzando en nuestro objetivo de difundir lo que llevan adelante nuestros miembros en su actividad profesional.*

*El próximo año, más precisamente en octubre, nos espera nuestro Simposio que en conjunto con los Congresos del Comité Argentino de Presas y de la Sociedad Argentina de Geotecnia conforman SINERGIA 2004. Será la primera vez, en nuestro país, que las tres entidades se reúnen con lo que se espera generar un ámbito de encuentro, tanto técnico como social, que sirva para promover discusiones técnicas que permitan avanzar en el conocimiento de los mismos en nuestro país.*

*Con esa perspectiva, y confiando encontrarnos en Córdoba, le agradecemos su apoyo y le solicitamos que no nos abandone en esta lucha por un futuro mejor.*

*El Director*

---

*Las opiniones vertidas en los trabajos son de exclusiva responsabilidad de los autores.*

# INSTRUCCIONES PARA AUTORES

En atención al procedimiento de arbitraje, se solicita a los autores leer y seguir estrictamente las siguientes instrucciones:

- La versión original, en dos (2) ejemplares, se enviará en papel blanco tamaño A4 (21 x 29,7 cm) y en disquetes o CD, editados en **Microsoft Word**.
- Los trabajos deberán tener una extensión máxima de 20 carillas.
- El título del artículo debe ser conciso, informativo e indicativo del contenido del mismo y escrito sin utilizar abreviaturas; impreso en letra Times New Roman punto 12, mayúscula, negrita y centrado, sin subrayar.
- La dirección postal y electrónica del autor al que se deberá dirigir la correspondencia seguirá a continuación del nombre, separado por una interlínea. Dicho autor deberá ser identificado con un superíndice.
- Es obligatorio el uso del sistema métrico decimal.
- Se debe incorporar, en forma consecutiva, el Resumen de hasta 250 palabras; el Abstract, en inglés, francés o portugués, de hasta 200 palabras y las Palabras Clave en un número entre 3 y 5.
- Todo el texto deberá estar escrito en letra Times New Roman punto 12 a un espacio de interlínea, sin sangrías (ya sea mediante tabulador o espacios) y sin doble espacios entre párrafos. Se conservarán, no obstante, los destacados que el autor considere convenientes, así como los correspondientes a determinados términos científicos o expresiones latinas o extranjeras. Deberá estar escrito en una sola columna. El área de trabajo será de 170 mm de ancho y 247 mm de altura. Es decir, 20 mm de márgenes derecho e izquierdo y márgenes superior e inferior de 25 mm. Se debe usar justificación completa.
- En el caso que el idioma del trabajo no sea español, la primera sección será el abstract, en el idioma del que trate, a continuación el resumen en español y tras ello el desarrollo.
- Cuando una abreviatura aparezca en el texto por primera vez, deberá ser aclarada en forma completa entre paréntesis. No se deben utilizar notas al pie.
- Las expresiones matemáticas deben ser elaboradas con el procesador de texto y formar parte del mismo. Las ecuaciones deben estar centradas y deben estar separadas por una interlínea. Todas las ecuaciones deben estar numeradas consecutivamente, usando numerales en paréntesis alineados al margen derecho. La secuencia de paréntesis deberá ser la usual en Matemática: }}).
- Se incluirán como figuras todas las ilustraciones, mapas, fotografías, etc., presentes en el texto, las que llevarán numeración arábiga correlativa por orden de aparición. Las mismas se ajustarán al tamaño de caja. En el texto se citarán como (Fig.), o (Figs.) en plural.
- En los ejemplares impresos que se remitan para ser sometidos al proceso de arbitraje, se deberá indicar la posición de las figuras en el texto e incluirlas por separado a continuación del mismo. Se deberán limitar, como máximo, a una caja de 15 x 23 cm, debiendo tener en cuenta el espacio ocupado por el epígrafe. No se aceptarán plegables. Las figuras no se deben incluir como parte del archivo de texto. Se deben remitir en un archivo separado formato TIF, JPEG, DWG o EPS.
- En el caso que los autores incluyan mapas y/o gráficos que requieran ser plegables para el tamaño de la revista, los costos derivados de su impresión correrán por cuenta de él o los autores.
- Las tablas deben ser remitidas en páginas separadas, indicando su ubicación dentro del texto.
- En el caso de mapas, los mismos incluirán las coordenadas geográficas, escala gráfica y norte. Deberán tener referencias adecuadas a los símbolos, rastras, etc. utilizados.
- Las fotografías, incluidas como figuras, deberán ser pancromáticas, de buena resolución y contraste debiendo ser enviadas como archivos TIF o JPEG. No se aceptarán fotografías en color. Las fotografías en color serán reproducidas en escala de grises salvo que el o los autores del trabajo se hagan cargo de la diferencia de costos. Los originales deben ser enviados con la versión final del trabajo. Todas las figuras llevarán su correspondiente leyenda, inmediatamente después de la misma. Se usará letra punto 12, a un interlineado. La figura y el número irán en negrita, sin subrayar, seguidas por dos puntos. Se recomienda que las leyendas sean cortas y concisas.
- Las referencias bibliográficas serán incluidas bajo el título de TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO. Las mismas deberán estar ordenadas alfabéticamente.
- La cita de trabajos en el texto estará referida a la lista bibliográfica final, indicando apellido de los autores (en mayúsculas) y año de publicación entre paréntesis, por ejemplo: (Caminos 1975). En caso de ser más de tres autores se usará et al. (en itálica, no subrayado ni negrita). Cuando se cite más de un trabajo del mismo autor se separarán por una coma, por ejemplo: Caminos (1956, 1978). En las citas totalmente entre paréntesis no se usará coma para separar el autor del año (Caminos 1956). En el caso de ubicar varios autores dentro del paréntesis se separarán entre ellos por un punto y coma. Si se citan varios trabajos del mismo autor y del mismo año se agregarán, a continuación del año, letras, de acuerdo al orden de aparición en el texto.  
  
Las citas bibliográficas estarán justificadas a la izquierda y la segunda línea tendrá una sangría especial francesa de 15 puntos ó 0,75 cm.
- Los artículos en publicaciones periódicas se citarán: CARRANZA TORRES, C.M., 1991. Cálculo analítico de redes de filtración. Actas de la Asociación Argentina de Geología Aplicada a la Ingeniería Volumen VI: 250-267.
- Los artículos en textos: MATEOS RUIZ, R.M. Y M. FERRER GIJÓN, 1994. Methodology for landslides hazard map 1:1 0,000 in the area of Monachil (Granada, Spain). En R. Oliveira, L.F. Rodrigues, A.G. Coelho & A.P. Cunha (eds.) 7th International Congress International Association of Engineering Geology, Volume III: 2059-2064, Rotterdam.
- Los libros de textos: DEARMAN, W.R., 1991. Engineering geological mapping. Butterworth-Heinemann Ltd, 387 pp. Oxford.

*El Director y el Editor Asociado no se harán responsables por ilustraciones, tanto figuras como fotografías, que no se ajusten a estas normas o cuya calidad sea deficiente*



# Geología, estructura y caracterización geotécnica del sector de cierre y embalse de la presa Río Grande

## Provincia de San Luis, Argentina

Cuesta, Rubén O.<sup>1</sup> - Massabie, Armando C.<sup>2</sup>

### Resumen

La presa de enrocado sobre el Río Grande en la Sierra de San Luis, de 60 metros de altura y 230 metros de longitud de coronamiento, se halla localizada inmediatamente aguas abajo de la confluencia del arroyo Manantiales. El sitio se ubica a poco más de 47 km al norte de la localidad de Trapiche, ubicada junto al embalse La Florida, en el sector serrano de la cuenca superior del Río Quinto.

Las obras de cierre y el vaso se sitúan sobre formaciones geológicas de edad precámbrica tardía a paleozoica inferior del basamento de las Sierras Pampeanas. Los afloramientos están constituidos por metamorfitas y magmatitas con escasa cubierta coluvial y aluvial cuaternaria.

A la latitud de la presa de Río Grande, la estructura tectónica regional se resuelve en fallamiento activado como consecuencia del levantamiento andino durante el Cenozoico tardío. La morfoestructura en la comarca se halla manifestada en bloques de basamento basculados hacia el naciente, cuyos bordes escarpados occidentales están controlados por fallas contraccionales de alto ángulo de inclinación y rumbo meridiano.

El sector de presa y embalse sobre el Río Grande se ubica alejado de las fallas principales, en la porción central del bloque occidental de la Sierra de San Luis. En esta parte el basamento se halla constituido por gneises, esquistos y anfibolitas con la asociación característica de filones pegmatoides de disposición mayormente concordante. La estructura del basamento, en el sector relevado en detalle, se expresa en plegamiento apretado de planos axiales de fuerte inclinación al poniente hasta subverticales. Los tipos litológicos predominantes en las fundaciones de las obras de cierre, Unidad esquistos y Unidad gneis granitoide, muestran valores promedio de resistencia a la compresión simple de 12 a 25 Mpa y 35 a 50 Mpa, respectivamente. En los sectores correspondientes a las fundaciones de las obras y el embalse se hallan ausentes fallas o zonas de cizalla de importancia, que pudiesen comprometer las condiciones de estabilidad y estanqueidad requeridas por la obra.

### 1. INTRODUCCIÓN

#### Características de la obra

La obra de cierre sobre el Río Grande, en San Luis, está constituida por una presa de enrocado (Nuñez *et al.* 1999) de 60 metros de altura y 230 metros de longitud de coronamiento. El cuerpo de la presa se halla integrado por un núcleo impermeable zoneado, de arcilla y limo, filtros y espaldones de materiales granulares de distintos tamaños con protección de rip-rap en el lado aguas arriba. Por medio de esta presa se

Entregado: 19 de Julio de 2003 ■ Aceptado: 05 de Setiembre de 2003

1. Consultor independiente. Calle 14 n° 743 6° piso departamento C.  
La Plata, Buenos Aires, Argentina. C1900.  
rcuesta@uolsinectis.com.ar

2. Universidad de Buenos Aires. Facultad de Ciencias Exactas  
y Naturales. Departamento de Ciencias Geológicas. Pabellón II.  
Ciudad Universitaria. Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina.  
C1428EHA. armando@gl.fcen.uba.ar



almacenan  $19,4 \text{ Hm}^3$  de agua para consumo humano, riego, control de crecidas y aprovechamiento turístico. El conducto de desvío quedó localizado bajo la presa y dentro del mismo se disponen las tuberías del descargador de fondo y de la toma de riego. Entre las obras complementarias se distinguen una torre de toma de 60 metros de altura anclada al macizo rocoso en la que apoya el último tramo de un puente de acceso de 90 metros de longitud total, y un vertedero capaz de evacuar una crecida milenaria de  $1.170 \text{ m}^3/\text{segundo}$ .

### Localización geográfica y marco geológico

El lugar donde se ubica la presa sobre el Río Grande, en la provincia de San Luis, se localiza a poco más de 47 km al noroeste de la ciudad capital y a unos 7 km al norte de la localidad de Trapiche, ubicada junto al embalse La Florida. El sitio seleccionado para el cierre sobre el Río Grande se halla inmediatamente aguas abajo de la confluencia del arroyo Los Manantiales, de modo tal que el lago determina un ensanchamiento relativo de ambos cauces hasta la cota prevista de embalse máximo normal (1.125 m).

Geológicamente, las obras de cierre y el vaso se implantan sobre terrenos antiguos, pertenecientes al basamento de edad precámbrica a paleozoica inferior de las Sierras Pampeanas, unidad dominante en la Sierra de San Luis (*Yrigoyen, 1981*). Las rocas expuestas en la región corresponden principalmente a metamorfitas y magmatitas con escasa cubierta coluvio-aluvial, esta última limitada en forma saltuaria a los más importantes cursos de agua de la zona aledaña a la obra. En el plano adjunto (Fig. 1) se presenta una ubicación del sector motivo de este estudio en relación con la localización de la ciudad de San Luis, los cursos fluviales más importantes, sobre los que en muchos casos ya existen embalses, y las principales unidades morfoestructurales, sector serrano y llanura periserrana, las cuales definen el paisaje, geología y estructura regionales que enmarca la ubicación geográfica de la obra.

### Objetivo del trabajo y metodología

La finalidad de este trabajo es presentar los resultados de los relevamientos y estudios geológicos llevados a cabo en vinculación con la presa y embalse sobre el Río Grande durante la etapa inicial de las obras. Con ese objetivo se realizó la adquisición de la imagen satelital que incluye la región; se obtuvieron los pares estereoscópicos de fotografías aéreas abarcativos del sector de la presa y embalse, y se efectuó una recopilación bibliográfica y análisis de los trabajos geológicos y geotécnicos de interés. Durante el mes de diciembre de 1994 y febrero de 1995 se desarrollaron los relevamientos de campo. También se realizó la revisión y perfilado geotécnico de los testigos de quince sondeos ejecutados en el sector de fundaciones de la presa, tarea que se efectuó con el propósito de ampliar el conocimiento geológico y unificar la información geológica-geotécnica de superficie y de subsuelo en vinculación con las distintas obras y excavaciones proyectadas, para obtener un conocimiento integrado sobre la composición geológica y estructura del sitio.

En los siguientes apartados se resumen las fuentes consideradas para la recopilación de la información geológica relativa a la obra; la interpretación de la imagen satelitaria abarcativa de la región a escala 1:500.000; la fotointerpretación geológica a escala aproximada 1:20.000 de fotografías aéreas verticales de la zona de presa y embalse, y el relevamiento geológico detallado a escala 1:1.000 con perfiles a la misma escala, del sector de presa y obras complementarias.

### Antecedentes

Con la finalidad de contar con los antecedentes geológicos y geotécnicos de la región donde se localiza la presa de embalse sobre el Río Grande se realizaron consultas de antecedentes éditos e inéditos en diferentes reparticiones, tanto nacionales como provinciales, donde pudieran existir trabajos relacionados con la comarca y zona de influencia, los cuales a su vez han servido de base de referencia para la preparación del trabajo.

Una mención especial merece el estudio geológico preparado por el Ente Provincial de Infraestructura Hídrica durante el año 1993 (EPIH-IDEMSA), el cual constituye el único antecedente directo sobre aspectos geológico-geotécnicos del tramo del Río Grande finalmente seleccionado para la construcción de la presa.

## 2. GEOLOGÍA Y ESTRUCTURA REGIONAL

La caracterización de la geología y estructura regional se apoyan en el estudio monoscópico de la imagen satelital Landsat en falso color compuesto a escala 1: 500.000 de fecha 09/03/85. En esta imagen queda incluida la porción centro y sur de la sierra de San Luis y la llanura periserrana, las cuales constituyen las principales unidades morfoestructurales diferenciadas. Dado el amplio sector abarcado con respecto al lugar donde se encuentra la presa sobre el Río Grande, constituye una documentación de especial utilidad para contar con un adecuado marco de referencia sobre la geología regional, representativo de la geomorfología, litología y estructura tectónica a esa escala. A esto se agrega el conocimiento proporcionado por la bibliografía y los reconocimientos propios de la geología de estas comarcas. Sobre esta base, en el plano adjunto a este apartado (Fig. 1) se sintetiza la información referente a la geología, geomorfología y tectónica de posible incidencia sobre el sector de obras.

Dentro de las características geomorfológicas regionales, la red de avenamiento pone en evidencia un control de su diseño y disposición por la composición general de los terrenos ígneos-metamórficos y la estructura tectónica regional. El avenamiento sobre el sector serrano es de diseño dendrítico, relativamente denso con colectores orientados principalmente en las direcciones nor-noreste, nor-noroeste, noroeste, noreste y este.

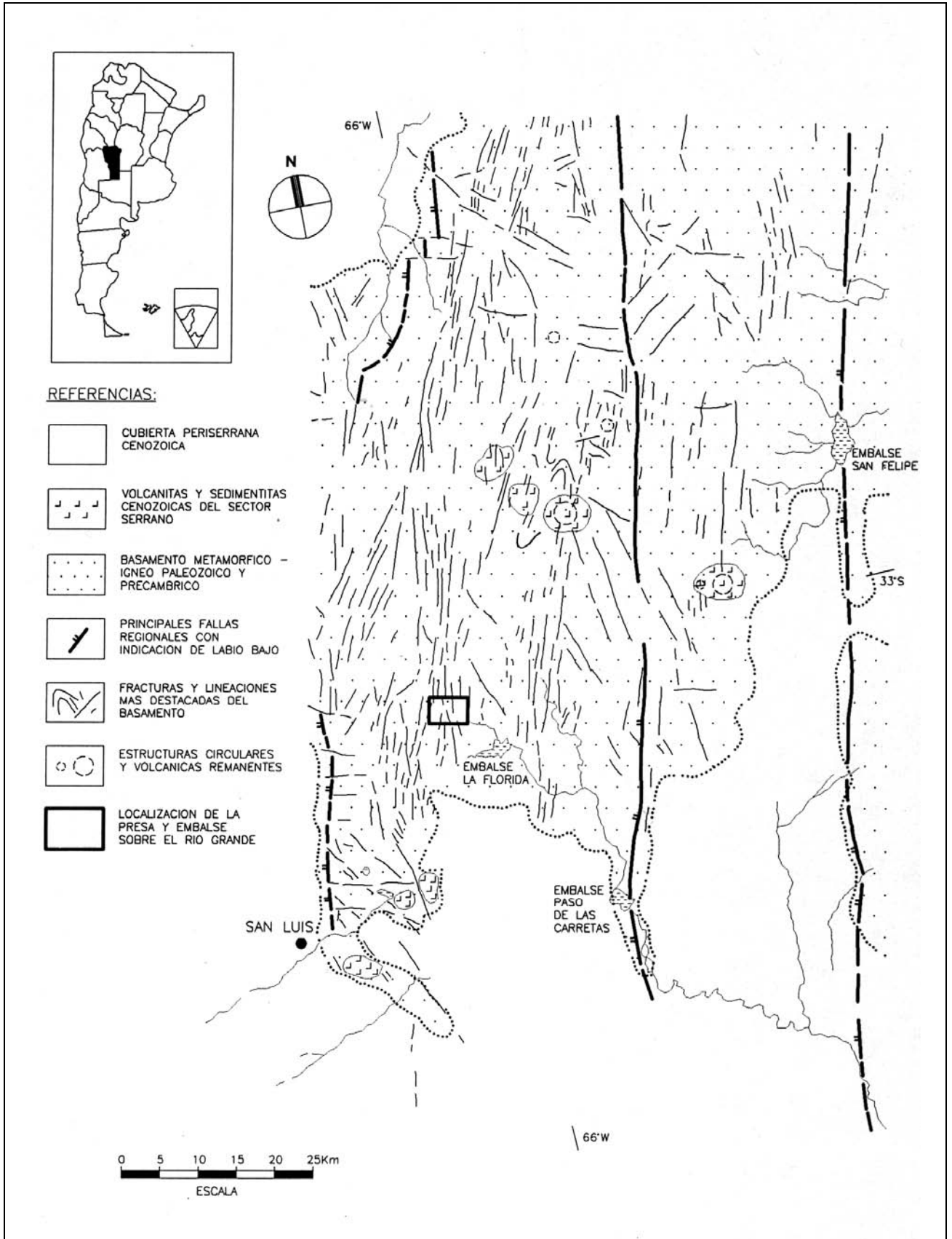
La litología se halla dominada por las metamorfitas y magmatitas del basamento antiguo. Fuera del sector serrano, sobre la llanura periserrana, el avenamiento pasa a estar tipificado por colectores individuales largos, en partes divagantes, algunos de los cuales se insumen en los depósitos sedimentarios modernos a pocos kilómetros de abandonar el sector serrano en el que se localizan sus nacientes.

El curso de agua más importante que se aleja de la porción sur de la Sierra de San Luis con dirección y sentido de escurrimiento hacia el sudeste, es el Río Quinto, el cual, como es sabido, en ocasiones de crecidas excepcionales lleva sus aguas más allá del límite provincial. Sobre su cuenca hídrica actual se localiza el embalse sobre el Río Grande, aguas arriba de los embalses de La Florida y Paso de las Carretas.

Otro aspecto geomorfológico a señalar es que la divisoria de aguas principal, ubicada en la porción central del sector serrano admite, al menos en forma parcial, un control estructural y litológico por los cuerpos de volcanitas traquiandesíticas terciarias elevados sobre el nivel general de la peneplanicie labrada en las rocas del basamento (Fig. 1). Estos afloramientos, de morfología característica, se hallan dispuestos alineados regionalmente en una dirección noroeste.



**FIGURA 1. UBICACIÓN GEOGRÁFICA DEL SECTOR DE ESTUDIOS**  
 Geología y estructura tectónica regional entorno a la presa Río Grande, San Luis



En lo atinente a la composición geológica, sólo se han diferenciado tres unidades en el plano geológico – estructural adjunto (Fig. 1). La unidad más antigua y extensa corresponde al basamento metamórfico – ígneo expuesto en la región serrana, que a su vez incluye un conjunto de subunidades, entre las cuales participan gneises, migmatitas, esquistos, filitas, granitoides, rocas ultramáficas y metabasitas. A aquella unidad se le superponen las volcánicas andesíticas y sedimentitas continentales terciarias, localizadas en la región serrana central y en su extremo sud-sudoeste respectivamente. La unidad más moderna constituye la cubierta de sedimentos cenozoicos (Cuaternario), la cual se halla muy desarrollada en la llanura periserrana.

En la comarca correspondiente al sector de presa y embalse, domina una asociación particular de metamorfitas del basamento cuyas características y relaciones se precisarán en los apartados siguientes.

La estructura tectónica regional responde a fallamiento activado como consecuencia de los movimientos que determinaron simultáneamente el levantamiento cordillerano durante el Cenozoico. Las fallas regionales se disponen longitudinalmente con respecto a los bloques serranos de disposición submeridiana que delimitan morfoestructuralmente, estilo característico de la estructura moderna de las Sierras Pampeanas, del cual también participa la Sierra de San Luis. De este fallamiento, que determina estructuras de alto ángulo de inclinación, participan además fallas oblicuas y transversales que concurren a la compartimentación longitudinal de los cuerpos serranos individuales (Massabie 1987; Massabie et al. 2000).

La estructura tectónica a la latitud de la presa de embalse, se halla expresada en tres bloques de basamento basculados hacia el naciente, progresivamente más elevados y desarrollados hacia el poniente. Sus bordes escarpados occidentales se hallan controlados por fallas activas durante el Cenozoico, inclusive en el Cuaternario. En la espalda tendida del bloque serrano occidental, el cual se halla profundamente grabado por la erosión fluvial consecuente reactivada durante el levantamiento serrano moderno (Orogenia Andina), se ubica el sector de interés, lejos y aproximadamente equidistante de los límites tectónicos correspondientes a la Sierra Grande de San Luis en los que se han obtenido evidencias de actividad neotectónica asociada a las fallas principales (Costa 1987). Principalmente en el bloque serrano occidental se mapean, a partir de la interpretación de la imagen satelitaria, lineaciones secundarias, que para su porción central, donde se ubican las obras, se ha verificado que responden estructuralmente a una deformación dúctil, representada por foliación regional, plegamiento de las metamorfitas y bandas de cizallamiento menores. Se hallan aquí ausentes las evidencias sobre la existencia de fallas que pudiesen eventualmente controlar actividad neotectónica como han sido relevadas también en otros sectores vecinos de las Sierras Pampeanas Orientales (Massabie y Szalafsztein 1991; Massabie et al. 2000).

### 3. GEOLOGÍA DEL SECTOR DE EMBALSE

Estos estudios geológicos tuvieron como base el fotoanálisis estereoscópico de fotografías aéreas verticales pancromáticas de escala aproximada 1: 20.000. La tarea fue orientada a la determinación de las condiciones geológicas y estructurales de los sectores de cierre y vaso, y a la identificación de eventuales inestabilidades que pudiesen detectarse en las laderas aledañas. (Fig. 2)

En el plano adjunto, se han mapeado las unidades litológicas separadas en metamorfitas con la participación, en orden

decreciente de importancia de gneis granitoide, esquistos, filones pegmatoides, gneis milonítico y anfibolitas. La cubierta aluvional es solo mapeable a esta escala en el sector de La Bolsa e inmediatamente aguas abajo del cierre, sobre el lateral interno del meandro atrincherado que forma el Río Grande en ese tramo. En este plano también se han representado las estructuras a partir de la identificación de bancos guía, el rumbo e inclinación de la foliación y la traza de planos axiales. El plegamiento constituye la macroestructura dominante y está integrado por pliegues de charnelas subhorizontales y planos axiales fuertemente inclinados, antiformal y sinformal de geometría apretadas a isoclinal con charnelas agudas (Fleuty 1964; Ramsay 1967). La disposición regional del plegamiento se expresa entonces en ejes de rumbo submeridiano y planos axiales de alta inclinación al poniente.

Sobre la base de la composición litológica de los terrenos y su disposición estructural, sumado a la ausencia de zonas de debilidad (fallas) que vinculen el sector del embalse con porciones inferiores de la cuenca, aguas abajo del cierre, se descarta la posibilidad de filtraciones que se puedan materializar en pérdidas de las aguas del embalse.

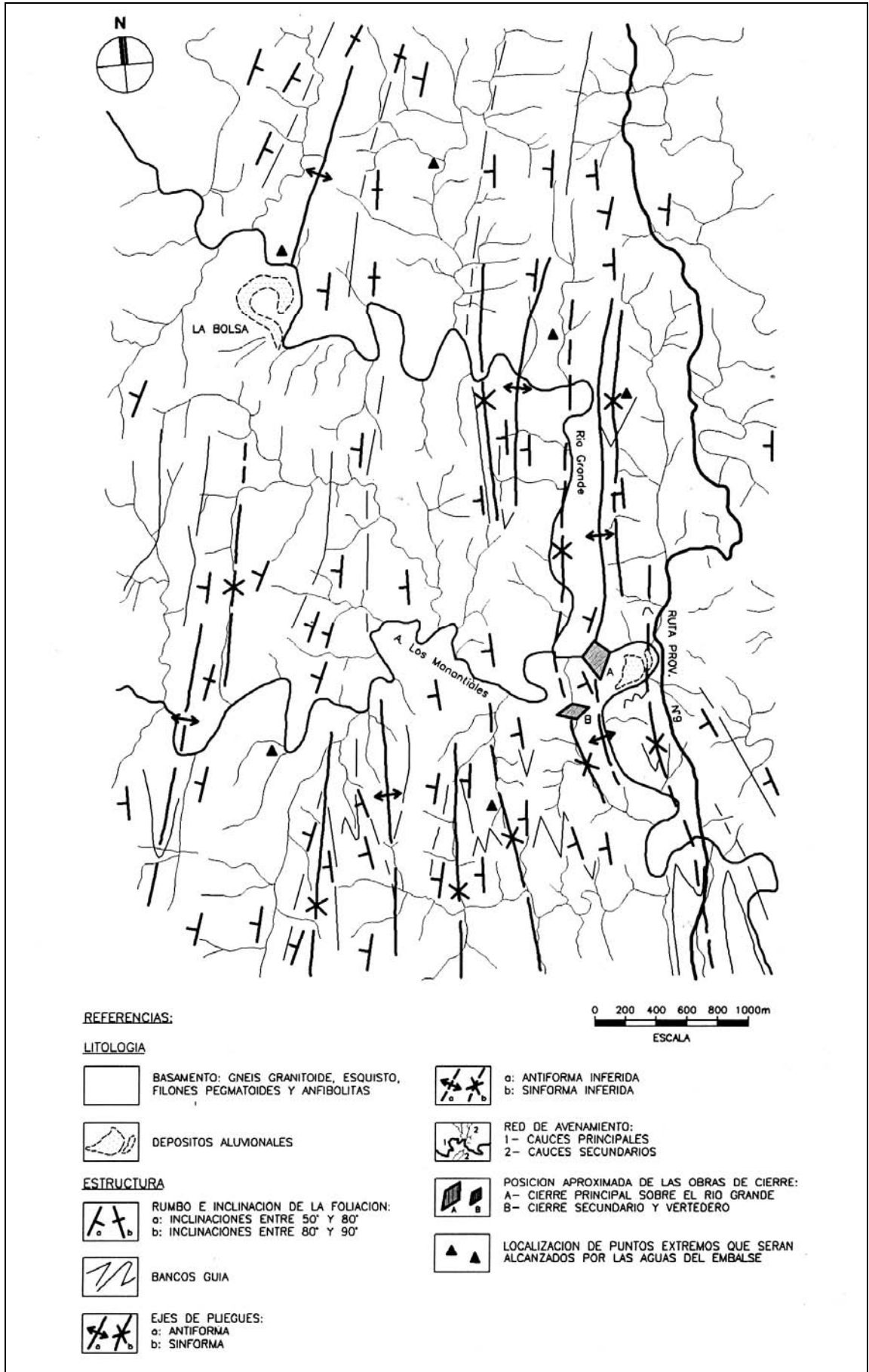
Durante la verificación de campo se observó que los cauces principales, Río Grande y arroyo Los Manantiales, han labrado hasta dos niveles de terrazas erosivas no apareadas por encima del cauce actual, el cual ha profundizado la geometría meandriforme heredada. Esto determina la existencia de tramos en los que las aguas corren en cañones flanqueados por taludes rocosos subverticales con rápidos frecuentes.

La particularidad señalada, sumada a la compartimentación del macizo rocoso controlada por la foliación y el diaclasamiento, con la colaboración de la descompresión y meteorización superficial, ha favorecido la caída de bloques de roca de dimensiones variables, acumulados al pie de los taludes, que en ocasiones superan individualmente el metro cúbico de volumen. Se trata de accidentes naturales locales de escasa magnitud que no se verán especialmente modificados por las aguas del embalse, ya que estas caídas se producen desde las partes superiores de los taludes, alejadas de su influencia. Por otra parte, no se han verificado indicios de inestabilidades generalizadas o locales de laderas (deslizamientos o avalanchas de roca).

### 4. GEOMORFOLOGÍA

El paisaje de la región de emplazamiento de la obra de cierre y embalse se presenta en un estadio de madurez avanzada, lo cual se pone en evidencia por una fuerte adaptación del avenamiento a controles estructurales y litológicos. Los cauces naturales principales, Río Grande y su afluente principal el arroyo Los Manantiales, se presentan como cursos clasificables como antecedentes con relación a los movimientos finales del Cenozoico que determinaron el levantamiento de las sierras hasta la posición actual. Estos cauces fluviales, en particular el Río Grande, tuvieron competencia erosiva suficiente para superar las barreras que determinaba el alzamiento regional de las sierras y grabaron profundamente sus cauces consecuentes con la pendiente general hacia el sudeste en los terrenos del basamento. De esta manera se dieron las condiciones para el desarrollo de meandros atrincherados y la exhumación de terrazas erosivas como las que se observan, entre otros lugares, sobre la margen derecha del tramo del Río Grande en el sector del cierre, en la zona de confluencia del arroyo Los Manantiales, y aguas abajo, donde se ensancha el valle actual del Río Grande, con dos niveles de terrazas erosivas, parcialmente cubiertas por depósitos aluviales de arenas limpias y gravas polimícticas bien redondeadas.

FIGURA 2. GEOLOGÍA Y ESTRUCTURA DEL SECTOR DE PRESA, OBRAS COMPLEMENTARIAS Y EMBALSE



## 5. RELEVAMIENTOS GEOLÓGICOS DEL SECTOR DE PRESAS Y OBRAS COMPLEMENTARIAS

### Introducción

Para el desarrollo de los trabajos de campo se contó como base con el relevamiento cartográfico a escala 1:500 y 1:1000 para las obras de cierre, en la que se volcaron las observaciones y mediciones de campo. Las localizadas más precisas se efectuaron con el apoyo de instrumental, brújula geológica y determinaciones expeditivas de distancias con respecto a puntos fijos identificables en el terreno y en la cartografía disponible. Durante la campaña final se realizaron revisiones y adecuaciones del relevamiento geológico de superficie (Fig. 3).

### Geología

La composición geológica del sector de presas y obras complementarias corresponde a un sector del basamento metamórfico – ígneo de las Sierras Pampeanas de la Provincia de San Luis. Esta litología es netamente predominante en el sector de obras, con la sola presencia adicional de depósitos aluvionales poco desarrollados principalmente sobre el curso actual del Río Grande, particularmente en su tramo de dirección paralela entre la confluencia del arroyo Los Manantiales y el siguiente tramo de dirección meridiana, hacia el sur, aguas abajo del sector de cierre. Las exposiciones directas de las metamorfitas en los faldeos de las serranías locales se hallan parcialmente cubiertas por una capa discontinua de regolito y suelo que da sustento a un tapiz vegetal de monte serrano abierto y pastizales, éstos últimos localizados en los bajos relativos del relieve.

### Litología

Se han identificado unidades litológicas mapeables, de significación geotécnica, a la escala del detalle necesario para la presa y las obras complementarias. La nomenclatura identificatoria de estas unidades se estableció durante los trabajos de campo en los cuales se realizó también el perfilado geológico – geotécnico de los testigos de las perforaciones ejecutadas. Sobre esta base se definió una terminología uniforme esencialmente descriptiva, la cual se resume a continuación y permite asociar los nombres con determinadas propiedades geomecánicas.

- *Unidad Esquisto*. Es la roca con mayor representatividad en los afloramientos del sector de presas y obras complementarias. Es de color gris verdoso y se halla compuesta por folias micáceas con asociación de biotita, moscovita y nódulos de granate de color rojo violáceo, y folias gris blanquecinas, delgadas, feldespático-cuarzosas. Posee una marcada esquistosidad paralela a la foliación que facilita su partición lajosa en los afloramientos de aspecto bandeado, los cuales son de coloraciones verde grisáceas oscuras y se hallan relativamente deprimidos en el relieve local.
- *Unidad Gneis Granitoide*. Es la roca que sigue en orden de importancia en la composición litológica del sector considerado. Es de color gris rosado claro y se halla compuesta por una asociación en textura granosa homogénea de cuarzo y feldespatos, con la característica presencia de granate de color rojo violáceo y bandas delgadas de láminas micáceas oscuras (biotíticas) que definen una foliación persistente, aunque poco evidente, a la que se asocia una esquistosidad grosera. Los afloramientos de esta unidad dan lugar con frecuencia a formas redondeadas de aspecto granítico en los afloramientos, pero también se advierten

geoformas en bancos y lajas gruesas que responden al control ejercido por su anisotropía primaria.

- *Unidad Filones Pegmatoides*. Esta roca forma cuerpos intrusivos de tamaños discretos de hábito filoniano en forma de bancos de espesor centimétrico, decimétrico y más raramente métrico, de forma lenticular y budinada de composición aplopegmatítica. Su color es blanquecino rosado claro. Se halla compuesta por cuarzo y feldespato en textura pegmatóide, raramente en textura aplítica, con la participación de moscovita, escasos nidos de biotita y esporádica fluorita y granate. Se presenta como cuerpos intrusivos menores en las unidades Esquisto y Gneis Granitoide. Tiene disposición predominante concordante con la foliación/esquistosidad, si bien se ha reconocido también la presencia de escasos filones pegmatoides de espesor inferior al metro y subverticales, de disposición transversal a la foliación/esquistosidad local.

### Ensayos geomecánicos sobre testigos de roca

Las unidades litológicas que constituyen las fundaciones de la presa fueron investigadas por medio de quince perforaciones, ejecutadas durante la etapa inicial de los trabajos de construcción de la presa, que alcanzaron profundidades variables entre 15 m y 50 m desde la superficie del terreno natural. Los sondeos se realizaron con el empleo de perforadora rotativa y se obtuvo recuperación continua de testigos de diámetro NX (ø76 mm).

Muestras obtenidas de estos testigos de perforación fueron sometidas a ensayos mecánicos en el Laboratorio de Estudios de Materiales y Estructuras para la Ingeniería Civil (LEMEIC, 1995), los cuales consistieron en: determinaciones de resistencia a la compresión simple, determinación de módulo de elasticidad longitudinal, determinaciones de resistencia a la tracción por compresión diametral y determinaciones de resistencia a la compresión simple mediante ensayo de carga puntual.

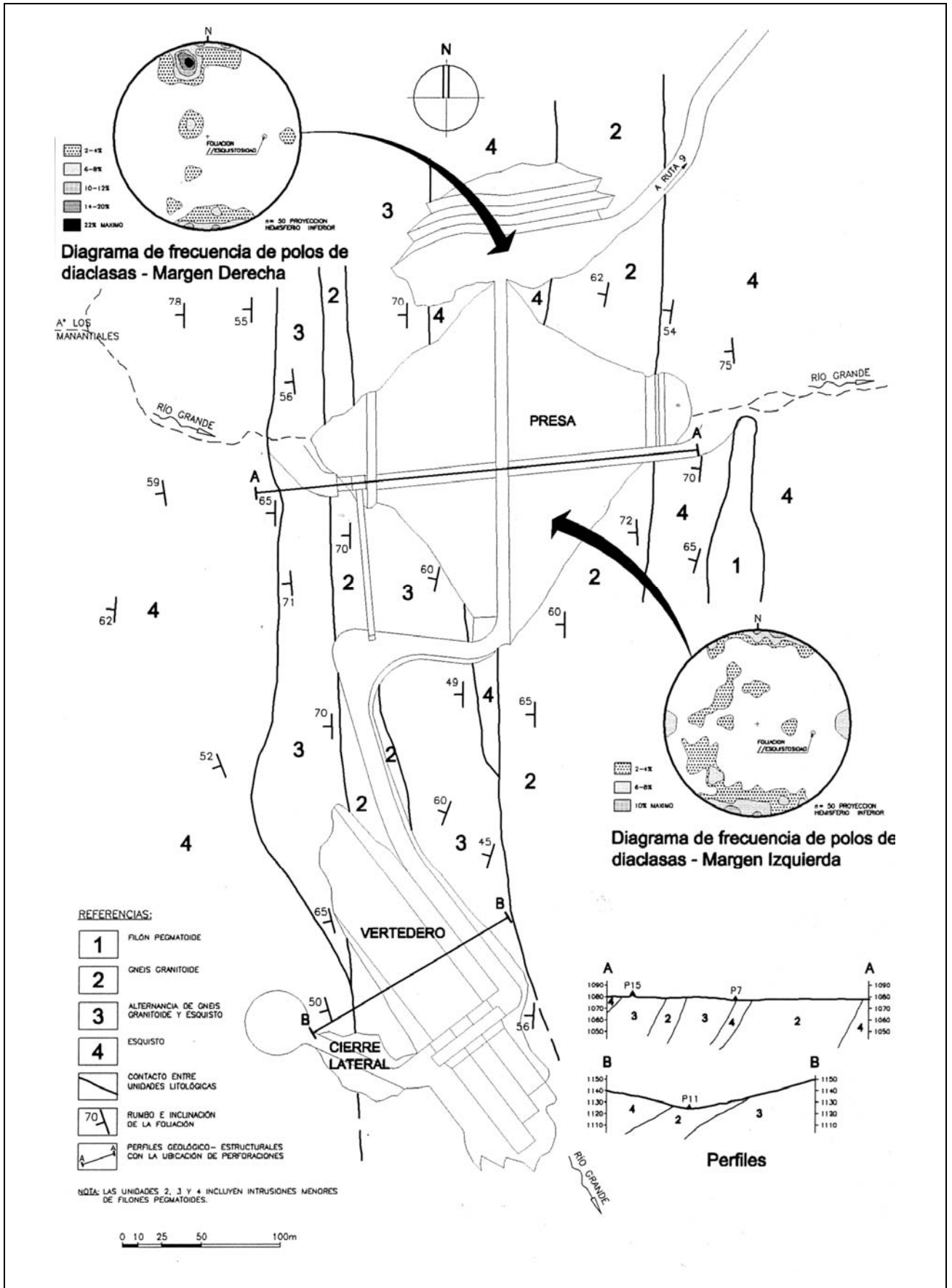
Sobre la base de los resultados obtenidos y su análisis, se pusieron de manifiesto comportamientos geomecánicos característicos para la *Unidad Esquisto* y la *Unidad Gneis Granitoide* que constituyen la parte sustantiva de las fundaciones.

A la *Unidad Esquisto* le corresponden valores medios de resistencia a la compresión simple entre 12 Mpa y 25 Mpa; en tanto que para la *Unidad Gneis Granitoide* se obtuvieron valores medios entre 35 Mpa y 50 Mpa aproximadamente.

Los resultados correspondientes a la tracción por compresión diametral y a compresión por carga puntual coinciden en la diferenciación en el comportamiento geomecánico de las dos unidades principales. Para estos dos últimos tipos de ensayos los valores mayores corresponden a la *Unidad Gneis Granitoide* y los menores a la *Unidad Esquisto*.

Entre los factores que coadyuvan a una menor resistencia de la *Unidad Esquisto* se destaca la participación porcentual elevada de minerales micáceos en su composición y el desarrollo bien definido de foliación y esquistosidad. Estos últimos factores estructurales determinan una fuerte anisotropía planar que favorece la disminución de la resistencia a la rotura de esta roca bajo condiciones no confinadas o de bajo confinamiento (Donath 1964) como son las que corresponden a la porción del macizo rocoso en que se ubican las obras. Por el contrario, en la *Unidad Gneis Granitoide* disminuye la participación de mica, la foliación se torna más débil o es prácticamente inexistente y la roca maciza muestra un aspecto granítico.

FIGURA 3. GEOLOGÍA DEL SECTOR DE EMPLAZAMIENTO DE LAS OBRAS DE CIERRE



## Estructura

La estructura de la comarca en el sector de cierre se halla expresada por la disposición de las unidades metamórfico-magmáticas presentes que conforman una suerte de homoclinal aparente, a escala local, de disposición submeridiana e inclinación empinada al oeste. Los límites mapeados de las distintas unidades litológicas identificadas se reconocen con claridad en el subsuelo a partir de la información brindada por las perforaciones ejecutadas. La integración espacial de la estructura, expresada en los perfiles geológicos adjuntos (Fig.3), ha sido facilitada por el empleo conjunto de los datos medidos de inclinación de la foliación en los testigos de los sondeos, con las mediciones sistemáticas de la disposición de la foliación en superficie durante el mapeo de detalle.

El macizo rocoso responde geomecánicamente a la anisotropía primaria dada por la foliación, la que a su vez concuerda con la disposición estructural regional de la comarca en respuesta a una deformación esencialmente dúctil por plegamiento apretado.

En el sector de las obras no se relevaron evidencias de fallamientos o zonas de cizallamiento de magnitud, aspecto éste que mereció especial consideración debido a antecedentes sobre la presencia de este tipo de estructuras en los terrenos de fundación de la cercana presa Paso de las Carretas (*Rimoldi y Vardé 1981*). En particular, la actual disposición de los tramos del Río Grande en el sector de cierre, de dirección este, e inmediatamente aguas arriba, de dirección submeridiana, se vinculan más estrechamente con la historia geomórfica de este colector principal asociada a controles locales por la estructura deformativa penetrativa de las metamorfitas (plegamiento, foliación), donde carece de sustento plantear la presencia supuesta de fallas controlantes, cuyas evidencias son, también a esta escala de detalle, inexistentes.

Con la finalidad de caracterizar la compartimentación del macizo rocoso en sectores representativos relacionados con las obras, se realizó la medición sistemática de diaclasas en la margen derecha en coincidencia con un tramo del canal de desvío y estribo, y en la margen izquierda, en correspondencia con un sector del estribo. Los resultados se presentan adjuntos en diagramas estereográficos de polos de diaclasas (Fig.3), en los cuales se indica también la posición de la foliación/esquistosidad de las metamorfitas. En ambos diagramas los juegos de diaclasa dominantes son transversales a la foliación y subverticales, aunque también se presentan juegos subhorizontales. Estos últimos con mayor dispersión en la margen izquierda, en la que además se manifiesta un juego subvertical de rumbo norte. Las diaclasas son cerradas, de superficies rugosas y diseño ondulado, sin relleno. Tienen una continuidad que no supera los tres metros, y su frecuencia es de 1 a 3 por metro en la margen derecha y de 3 a 5 en la margen izquierda.

El conjunto de las observaciones y caracterizaciones geológico - geotécnicas conduce a considerar apto, tanto el sitio seleccionado para las obras de cierre ya construidas como también al sector de embalse adyacente.

Los resultados correspondientes a los relevamientos geológicos de superficie se presentan en forma simplificada en la Fig. 3, que contiene un mapa geológico del sector del cierre y zona de obras complementarias a escala original 1:1.000. También se incluyen perfiles geológicos estructurales interpretativos de la geología del subsuelo elaborados originalmente a escala 1:1.000 en correspondencia con sectores sensibles de las obras.

## 6. CONCLUSIONES

Sobre la base de los estudios realizados se destacan los siguientes resultados.

La composición geológica del sector de presa, obras complementarias y futuro embalse corresponde a rocas metamórficas, gneises, esquistos, anfíbolitas, con la asociación característica de filones pegmatoides.

El basamento rocoso de la comarca posee una escasa cubierta de regolito y suelo vegetal.

La cubierta aluvional es también de poco espesor y se halla limitada saltuariamente a los cauces y terrazas adyacentes del Río Grande y el arroyo Los Manantiales.

Durante el mapeo de superficie del sitio se han identificado tres unidades litológicas principales a saber. *Unidad Esquisto*, *Unidad Gneis Granitoide* y *Unidad Filones Pegmatoides*.

Los ensayos geomecánicos realizados ponen de relieve una mayor resistencia a la rotura en ensayos de compresión simple, tracción por compresión diametral y compresión en ensayos de carga puntual, de la *Unidad Gneis Granitoide*. La menor resistencia de la *Unidad Esquisto* se relaciona principalmente con su fuerte anisotropía por foliación (bandeamiento composicional) y esquistosidad paralela.

La estructura tectónica del sitio y su zona de influencia corresponde a un plegamiento apretado de planos axiales subverticales o de alta inclinación hacia el poniente que localmente se presenta como un aparente homoclinal de rumbo submeridiano e inclinaciones entre 50 y 70 grados de la esquistosidad/foliación hacia el oeste.

Sobre la base de los relevamientos efectuados a distintas escalas, se descarta la existencia de fallas o zonas de cizalla de importancia en el sector relevado que pudiesen tener incidencia sobre las condiciones de fundación de las obras o la estanqueidad del embalse.

El Río Grande y el arroyo Los Manantiales constituyen ejemplos de cauces antecedentes al alzamiento final de las Sierras de San Luis durante el Cenozoico tardío, lo cual determinó la formación de meandros atrincherados, cañones y terrazas erosivas con cubierta relictica de aluvión.

Los taludes periféricos al futuro embalse no manifiestan síntomas de inestabilidad vinculables con deslizamientos de ladera u otros procesos de remoción en masa destacables. Sólo localmente se identificaron bloques caídos, desprendidos de las porciones superiores de los taludes.

Sobre la base de los mapeos y estudios realizados en el sector donde se localiza la presa de enrocado sobre el Río Grande, se considera que el sitio posee características geológico - estructurales y geotécnicas adecuadas para la implantación de la obra.

## 7. AGRADECIMIENTOS

Los estudios geológicos y estructurales realizados contribuyen a los objetivos sobre la caracterización del fallamiento fanerozoico en las Sierras Pampeanas que se llevan a cabo en el marco del proyecto X048 UBACYT.

**8. TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO**

- COSTA, C. 1987.  
Neotectónica de la Sierra de Grande de San Luis.  
*X Congreso Geológico Argentino, Actas I : 255-258.*
- DONATH, F., 1964.  
Streight variations and deformation behavior in anisotropic rocks.  
*In Judd, W. R., ed., State of stress in the earth's crust, New York, American Elsvier: 281-297.*
- LEMEIC, 1995.  
Presa Río Grande San Luis. Ensayos mecánicos sobre testigos de roca.  
*Universidad Nacional de La Plata. Facultad de Ingeniería, Departamento de Construcciones. Informe inédito.*
- FLEUTY, M., 1964.  
The description of folds.  
*Proceedings of the Geological Association Volume 75: 461-492.*
- MASSABIE, A., 1987  
Neotectónica y sismicidad en la región de las Sierras Pampeanas Orientales, Sierras de Córdoba, Argentina.  
*Actas Décimo Congreso Geológico Argentino, Volumen I: 271-274.*
- MASSABIE, A. Y SZLAFSZTEIN, C., 1991.  
Condiciones geomecánicas y edad del fallamiento neotectónico en las Sierras Pampeanas Orientales, Córdoba, Argentina.  
*Asociación Argentina de Geología Aplicada a la Ingeniería Actas VI : 154-168.*
- MASSABIE, A. , CEGARRA, M. , IDOYAGA, M. , MUTTI, D. , MESTIERO, O. & SANGUINETTI, A. , 2000.  
Neotectonic faulting zoning in the Eastern Sierras Pampeanas, central Argentina.  
*8th Congress of the International Association for Engineering Geology and the Environment Volume 6: 4231-4238.*
- NUÑEZ, E., HERNÁNDEZ BALAT, V., SUÁREZ, J., BISSIO, F. Y MOSQUERA, G., 1999.  
Presa de enrocado en Río Grande - San Luis-Argentina.  
*XI Panamerican Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering Volume 3: 1157-1164.*
- RAMSAY, J., 1967.  
Folding and fracturing of rocks.  
*MacGraw-Hill 568 pp.*
- RIMOLDI, H Y VARDÉ, O., 1981.  
Tratamiento de la cimentación de algunos elementos de la presa vertedero de Paso de las Carretas- provincia de San Luis.  
*VIII Congreso Geológico Argentino Actas I: 13-27.*
- YRIGOYEN, M., 1981.  
Mapa geológico de la Sierra de San Luis y regiones circunvecinas, República Argentina.  
*VIII Congreso Geológico Argentino.*





## El interés público de la Geología

Di Salvo, Carlos Alberto

*Argentinos a las cosas, Ortega y Gasset, circa 1930*  
*Geólogos, a las cosas..., autor anónimo..., 2002.*

### Resumen

*La comunidad geológica argentina se encuentra una vez más frente a un gran desafío: dar sustento teórico y práctico para que nuestra carrera universitaria de grado sea declarada de "interés público" por el Ministerio de Educación. Esto no tiene solamente un aspecto especulativo, sino que toca hondamente el futuro de la profesión y de la actividad académica. Esta publicación intenta, entonces, aclarar algunos conceptos dentro del marco de la ley de Educación Superior que relaciona el concepto de interés público, la acreditación de las carreras de grado y el ejercicio profesional y también alertar a los colegas que por un caso u otro no estuvieren al tanto de esta problemática.*

### 1. INTRODUCCIÓN

Sería casi imposible hallar colegas geólogos que puedan dudar internamente sobre el interés público que tiene la profesión que han abrazado, seguramente con entusiasmo, y que ha ejercido y ejerce hoy con pasión. Pero sucede que en un mundo complejo y cambiante hay que poder demostrarlo y, sobre todo, que éste sea reconocido por la sociedad que es la que en definitiva ha solventado nuestros estudios y seguramente lo hará en el futuro.

La cuestión arranca en 1994 - más precisamente el 18 de Enero de ese año - con el Decreto del P. E. N. que "reglamenta el perfil, alcances, incumbencias y validez de los títulos universitarios". El decreto en su artículo 3°, expresa: "*a partir de la fecha del presente decreto sólo se fijarán incumbencias a aquellos títulos cuyo ejercicio profesional pudieran comprometer al interés público y únicamente respecto a las actividades que efectivamente lo comprometan*".

Según el texto reglamentario precedente, parece un problema de competencias o incumbencias sólo profesionales, pero en una vuelta de tuerca más, la Ley de Educación

Superior N° 24521/95 dispone que "deberán ser acreditadas periódicamente aquellas carreras cuyos títulos correspondan a profesiones reguladas por el Estado y cuyo ejercicio pudiera comprometer el interés público, poniendo en riesgo de modo directo la salud, la seguridad, los bienes, el derecho o la formación de sus habitantes".

He aquí cómo está planteado el problema, con una doble vertiente 1) la profesional: "sólo se fijarán incumbencias a aquellos títulos cuyo ejercicio profesional pudieran comprometer al interés público" y 2) la académica: "deberán ser acreditadas periódicamente aquellas carreras cuyos títulos correspondan a profesiones cuyo ejercicio pudiera comprometer el interés público". Para este segundo caso, el académico, la Comisión Nacional de Evaluación y Acreditación Universitaria (CONEAU) prevé en su Ordenanza 05/99 que cuando "una carrera que requiera acreditación no la obtuviese, podrá recomendar que se suspenda la inscripción de nuevos alumnos en la misma hasta que se subsanen las deficiencias encontradas".

Esta publicación pretende hacer un aporte al concepto de interés público que tiene la Geología, el cual es un tema central. La ley está promulgada, y no queda más que hacer frente a los desafíos por venir.

### 2. ¿QUÉ ES EL INTERÉS PÚBLICO?

Lo público, según la Real Academia Española, (*Diccionario de la Lengua XX a. Edición, 1992*), es aquello que pertenece a todo el pueblo e *interés*, es la conveniencia o necesidad de carácter colectivo en el orden moral o material. En síntesis: algo que convenga, en este caso materialmente, a todo el pueblo.

Entregado: 30 de Junio de 2003 ■ Aceptado: 16 de Setiembre de 2003

Director del Área de Geotecnia del Departamento de Ingeniería Civil. U.T.N. Regional Bs. As.

Profesor Adjunto del Departamento de Ciencias Geológicas. UBA. Secretario General de AFAG

Consultor independiente. polilla@infovia.com.ar

Esta “materialidad” para la Ley de Educación Superior, se encarna en los conceptos de:

- Riesgo directo hacia la salud de los habitantes.
- Riesgo directo a la seguridad de los habitantes.
- Riesgo directo al derecho de los habitantes.
- Riesgo directo sobre los bienes de los habitantes.
- Riesgo directo hacia la formación de los habitantes.

La gran pregunta es entonces si las Facultades de Geología argentinas forman profesionales con los contenidos y la calidad de los conocimientos necesarios para hacer frente a estos presupuestos

### 3. LOS RIESGOS DIRECTOS

Los geólogos argentinos estamos acostumbrados a tratar con diferentes tipos de “riesgos”: hídrico, sísmico, de contaminación, riesgo volcánico y otros.

Riesgo es la posibilidad o condición potencial de ocurrencia de un accidente y las consecuencias que éste acarrearía. Se parte de la base que los accidentes a los que se hace mención tienen consecuencias sociales y económicas, no son meramente naturales; sino que afectan al hombre. La visión, es entonces, antropocéntrica.

#### 3.1. Los riesgos geológicos

La salud, la seguridad, el derecho y los bienes de los habitantes pueden ser afectados o puestos “en riesgo” por procesos naturales endógenos: vulcanismo, sismos, maremotos, etc. o exógenos: deslizamientos de pendientes, erosión, sedimentación, subsidencia, inundaciones, colapsos y otros. Se trata entonces de riesgos naturales muy bien conocidos por los especialistas y también claramente percibidos por la población.

En este caso, el compromiso de la Geología con la sociedad pasa por llevar a la práctica dos conceptos clave. El primero de ellos es la *previsión*; es decir, la posibilidad de identificar áreas dónde puedan ocurrir accidentes (definición espacial) y establecer las condiciones y circunstancias en las que estos accidentes ocurren. (definición temporal)

El otro concepto que lleva a un compromiso más concreto es la *prevención*, es decir, la posibilidad que se adopten medidas para inhibir la ocurrencia de accidentes o reducir su magnitud y, sobre todo, mitigar los impactos sociales y económicos que los mismos pueden producir.

¿Cómo podrían preverse y prevenirse riesgos naturales sin el aporte de los conocimientos geológicos?; es una pregunta que tiene una sola respuesta: sería imposible.

#### 3.2. Los riesgos inducidos por la acción humana

Estos riesgos devienen de la interacción del hombre con su entorno y tienen que ver con los conceptos más clásicos de la temática medioambiental: los impactos y efectos que las acciones más importantes o significativas del hombre - como construcciones, explotaciones y también sobreexplotaciones - producen sobre el medio físico, en especial el suelo, las rocas, el agua, las interfases correspondientes y también los procesos del medio físico.

De esto se desprende que tanto los recursos naturales como la infraestructura pueden ser afectados, alterados e impactados por las acciones humanas. Por desgracia, los sistemas naturales no siempre se ajustan a los cambios “humanos” de manera previsible. Por lo tanto, una alteración en ellos que se pensara como beneficiosa para la sociedad podría tener el efecto opuesto.

El concepto de recurso natural se refiere a elementos y procesos del medio que cumplen con la doble condición de *utilidad y escasez*; esta última en términos de cantidad y calidad (Gómez Orea, 1999). Los recursos naturales tanto materiales (susceptibles de propiedad privada o pública y de transacciones comerciales) como intangibles (que proporcionan un goce de carácter espiritual ó anímico) tienen mucho que ver con los materiales y los procesos geológicos. Es que éstos forman el verdaderocimiento de la sociedad moderna. ¿o alguien puede creer hoy seriamente que sólo lo es el mercado? Por eso es labor de la Geología contribuir al mantenimiento del suministro de los mismos y evaluar el impacto que su uso o extracción produce, no limitándose solamente al estudio de su génesis y yacencia.

Sería un poco sobreabundante enumerar los recursos naturales que tienen, por así decirlo, naturaleza geológica por lo que los englobamos en distintas categorías como: recursos materiales renovables (puros y fluentes), parcialmente renovables (acuíferos, aguas superficiales) y no renovables (minerales metalíferos, rocas de aplicación, combustibles líquidos y sólidos) o recursos intangibles: (la belleza de un paisaje, arroyos de aguas no contaminadas). ¡Cuánto tiene que ver la historia geológica y los procesos geomórficos que dieron origen a estas cualidades del paisaje!

Los geólogos, por su formación, adquieren una visión que les permite reconocer los riesgos y sus efectos a una escala transgeneracional (esta visión es específica de la profesión). La convergencia de causas y de efectos que generan o pueden generar determinados riesgos y su recurrencia, también constituyen una visión muy particular del ejercicio profesional de la Geología (comunicación verbal del colega Pablo Villate)

El *riesgo directo hacia la salud de los habitantes* es uno de los conceptos que menciona la Ley de Educación Superior, y hace referencia a eventos que puedan poner en peligro la libertad o bien público o particular. Tiene que ver tanto con los riesgos naturales, ya mencionados, como con los de origen antrópico, entre ellos: sismicidad inducida por embalses, fallas en las fundaciones de obras civiles, deslizamientos, contaminación de acuíferos, aguas superficiales y suelos y degradación de áreas naturales o de espargimiento humano, por nombrar algunos.

La *seguridad de los habitantes* está muy ligada a la salud pública y, en consecuencia, con temas que ya han sido mencionados precedentemente. Sin embargo, surge como una acuciante pregunta: ¿puede establecerse un plan de evacuación ante una emergencia o riesgo hídrico, por ejemplo, sin el conocimiento del proceso por el cuál este riesgo se produce? Vemos a diario series documentales sobre la actividad volcánica y “la actividad de los geólogos”; pero, ¿se ha estudiado seriamente la contaminación y la sustentabilidad de los acuíferos y las enfermedades de transmisión hídrica, en nuestro conurbano bonaerense?

En el análisis de los *riesgos directos sobre los bienes de los habitantes* aparece claramente la relación entre la geología y el concepto de externalidad, tomado como “los efectos de un agente socioeconómico sobre otro u otros agentes por cualquier vía que no sea el mercado”. Estas externalidades pueden ser tanto positivas (económicas externas), como la racional explotación de un recurso parcialmente retornable, respetando su tasa de renovación anual, interanual, etc. (¡otra vez la problemática del agua subterránea!) como negativas (deseconomías externas); una mala interpretación geológica que lleve a un atraso considerable en la ejecución de una obra pública ó pública de gestión privada, o peor aún, a un fallo en su diseño. En el primer caso (externalidad positiva) se evitan riesgos, en el segundo se pagarían inocentes - en este caso toda la población - costos de los que no tienen ni ninguna responsabilidad y que están totalmente fuera de su manejo.

Los *derechos de los habitantes* también están también relacionados con los recursos y los riesgos. Bien lo indica la Constitución Nacional, en su artículo 41, cuando expresa que “todos los habitantes gozan del derecho a un ambiente sano, apto para el desarrollo humano y para que las actividades productivas satisfagan las necesidades del presente sin comprometer las de generaciones futuras”.

Un ambiente sano y las actividades productivas están siempre presentes en la actividad geológica como la cantidad de mineral ó combustible que se puede explotar (volúmenes) de un determinado yacimiento, para citar un ejemplo.

El concepto de sustentabilidad de los recursos es un derecho de las generaciones presentes pero también pero también de las futuras, por lo tanto la correcta evaluación de reservas de un yacimiento, la vulnerabilidad de un acuífero, la previsión y prevención de riesgos es una tarea que sin la “especial” visión del geólogo, aparece como poco realista o francamente incompleta.

Los habitantes también tienen derecho a estar plenamente informados acerca del nivel de riesgo que presenta el entorno en el que viven o desarrollan sus actividades.

La apreciación profesional del geólogo en contacto con la sociedad es entonces también fundamental. Salir de los cenáculos en los que “todos ó casi todos estamos de acuerdo” en lo que decimos, es un deber imperativo, el resto de nuestros compatriotas están deseosos de oír voces expertas y que alerten basados en sus conocimientos sobre problemas concretos y tangibles.

#### 4 LA FORMACIÓN DE LOS HABITANTES

Finalmente, reaparece el tema de la educación, de la formación a nivel universitario: si la Geología no fuese acreditada como una carrera de *interés público*, inexorablemente decaería el apego de las futuras generaciones por el estudio de esta ciencia que ha aportado, y tanto aporta, al desarrollo humano. Entonces, ¿quién se dedicaría a la cuantificación y calificación de recursos naturales de origen geológico? ¿cómo detectaríamos fallas geológicas que puedan afectar a una obra hidráulica?, ó bien ¿cómo se registra un riesgo natural de origen volcánico?

Una falta de formación en estos, y tantísimos aspectos más, pondría en riesgo tanto la salud y la seguridad, como los bienes y derechos de muchas poblaciones argentinas. No obstante la olvidada caben consideraciones muy importantes, entre ellas:

- La formación de futuros geólogos debe estar en línea con tamaño responsabilidad, capacitándolos en la previsión y prevención de riesgos, externalidades y otros conceptos enunciados en este trabajo.
- Los planes de estudio deben incluir necesariamente como materias obligatorias a todas aquellas asignaturas que otorguen elementos de trabajo, metodologías, análisis de casos prácticos, etc., que estén relacionadas con los temas anteriormente enunciados.

#### 7 TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

DICCIONARIO DE LA LENGUA ESPAÑOLA. REAL ACADEMIA ESPAÑOLA. 1992.  
*Vigésima Primera Edición, Madrid*

GÓMEZ UREA D. 1999.  
Evaluación del Impacto Ambiental.  
*Ediciones Mundi Prensa, Madrid.*

LEY NACIONAL DE EDUCACIÓN SUPERIOR N° 24521/95.

TARBUCK E. Y LUTGENS F., 2000.  
Ciencias de la Tierra. Una Introducción a la Geología Física.  
*Prentice Hall, Madrid*

- Los planes de estudio deben homogeneizarse en todas las facultades, respetando, claro está, las particularidades de cada facultad y su plantel docente.
- Cada facultad debe enraizarse fuertemente con la problemática de la región a la que pertenece.
- El porcentaje entre materias básicas y aplicadas debe ser cuidadosamente estudiado y, si es necesario, re estudiado periódicamente.

#### 5. A MANERA DE CONCLUSIÓN

“La Tierra alberga unos 100 millones de personas más cada año. Esto significa una demanda creciente de recursos; además, un número cada vez mayor de personas se ve empujada a residir en ambientes con riesgos geológicos”. (*Tarbutck y Lutgens, 1999*)

Asimismo, la administración de estos recursos naturales junto con el desarrollo económico continuo y sostenible es la única política que puede alejarnos de la pobreza en que se encuentra sumido particularmente nuestro país y para satisfacer esta demanda los geólogos argentinos han tenido y tienen indudablemente un papel muy importante que cumplir.

Además, es importante que el título de grado de geólogo sea visualizado y revalorizado por la sociedad quien permite, ya que todas las facultades de Geología son públicas, solventar los estudios de cada alumno y que, al presente, no conoce cabalmente cuál es la acción que los mismos realizan. Los motivos de esta falta de conocimiento, sería muy largo enumerar en este trabajo.

Las incumbencias del ejercicio profesional son indelegables pero debe demostrarse, formación continua mediante, que las mismas tienen valor y que solucionan los problemas concretos de la población. La “pertinencia social” de la Geología es lo que está concretamente en juego y creo que este es el problema central, que las obligaciones emergentes de la ley de Educación Superior nos ha hecho ver con mayor realismo y al que hay dar un respuesta clara y permanente.

En línea con estos conceptos, las Facultades de Geología de todo el país tienen la indelegable función de formar profesionales, académicos, y científicos que puedan satisfacer estas demandas que plantea la Ley de Educación Superior, pero que en realidad son una demanda de toda la sociedad.

#### 6. AGRADECIMIENTOS

A mis entrañables colegas de AFAG (Asociación de Facultades Nacionales con Carrera de Geología) y CAPEG (Consejo Asesor Permanente para el Ejercicio de la Geología) con los que hemos discutido y repasado oportunamente estos conceptos y muy especialmente a mi querida hija María Cristina quien, con paciencia y agudeza, ha tenido a bien corregir este rebelde manuscrito.



# La geología, las ciudades y los proyectos urbanos

## Un abordaje histórico y presente

Di Salvo, Carlos Alberto <sup>1</sup> - Rimoldi, Horacio Víctor <sup>2</sup>

*“Si un constructor edifica una casa y no la levanta con la necesaria solidez, y la casa que ha construido se derrumba y causa la muerte del propietario, se debe condenar a muerte al constructor”*

Párrafo 229 del Código de Hammurabi, hacia 1700 a. de J.C.

### Resumen

*La mayoría de las grandes ciudades del mundo entero no han sido planificadas con criterio geológico. Es así que se encuentran ubicadas en áreas vulnerables y bajo distintos riesgos naturales como antrópicos. Sin embargo existen elementos de gestión - las cartas geotécnicas, fundamentalmente - que permiten introducir criterios geológicos que son imprescindibles para la expansión de la infraestructura, pero que no se limitan sólo este aspecto.*

*En este trabajo se realiza un abordaje histórico de las cartas, se hace un breve comentario acerca de La Carta Geológico Geotécnica de la Ciudad de Buenos Aires (2001) y se exponen algunas de las principales alteraciones que en el ámbito de la Ciudad Autónoma de Buenos Aires pueden inducir las obras superficiales y subterráneas de gran envergadura.*

### 1. INTRODUCCIÓN

El crecimiento demográfico mundial entre la Revolución Neolítica (12.000 años a.J.C.) hasta la actualidad es de unas 1.200 veces. Así:

- Hace 10.000 años la población mundial era de 5 millones de personas.
- En la época del nacimiento de Cristo la misma llegó a 250 millones de habitantes.
- Para 1.650, esta cifra se duplicó a 500 millones.
- En 1930 se llegó a los 2.000 millones y se duplicó en 1975.

Mientras que en 1950 había en el mundo sólo seis ciudades de más de cinco millones de habitantes, hoy son ya más de sesenta, una de ellas Buenos Aires.

Aproximadamente el 25% de la población mundial (unos 6.000 millones) reside en ciudades del Tercer Mundo (Asia, Africa, Latinoamérica). Según la ONU esta era la condición de vida de 2.000 millones de personas en el año 2.000.

Mientras que vegetales y animales nativos fueron desplazados en las ciudades, el suelo y el agua persisten y están permanentemente interactuando como soporte físico, como vectores de residuos y efluentes

Problemas tales como inundaciones, asentamientos, y colapsos del suelo, degradación, agotamiento de los recursos hídricos, degradación de las costas, contaminación ligada a la ubicación de desechos, tanto de aguas, como del suelo mismo, etc., caracterizan hoy a una buena parte de las ciudades del mundo de la que Buenos Aires, y especialmente el conurbano, no son obviamente la excepción. Es entonces en las ciudades donde se decidirá el futuro social y ambiental de la humanidad del Siglo XXI.

Entregado: 30 de Junio de 2003 ■ Aceptado: 12 de Setiembre de 2003

1. Departamento de Geología U.B.A. Ciudad Universitaria Pabellón 2.  
Director del Área de Geotecnia del Departamento  
de Ingeniería Civil UTN. Reg. Bs. As.  
Consultor independiente. polilla@infovia.com.ar

2. Presidente de la Asociación Argentina  
de Geología Aplicada a la Ingeniería.  
Consultor independiente

## 2. LOS PROYECTOS DE INFRAESTRUCTURA EN ÁREAS URBANAS

Los proyectos urbanos representan una parte importante de las inversiones públicas y privadas en el mundo entero, pero también presentan un doble problema o desafío para los proyectistas, urbanistas y especialistas, éstos son:

- Las alteraciones que se producen en el medio natural: suelos y aguas principalmente, y
- Las externalidades que pueden provocarse sobre la infraestructura edilicia y construcciones en general.

En la Ciudad Autónoma de Buenos Aires y en el Área Metropolitana, están planteados y en ejecución pese a la crisis imperante, importantes obras, como:

- Construcciones de subterráneos: prolongación de líneas D, B y nueva línea H.
- Aliviadores de crecientes por aguas pluviales: Holmberg y Cildáñez y almacenamientos subterráneos.
- Río Subterráneo Saavedra - Morón, recientemente finalizado, etc.
- Grandes edificios torre en el área de Puerto Madero.

Esta aceleración de la expansión urbana ha creado problemas originados en la casi completa desconsideración de los factores fisiográficos, ya que esta expansión se realiza casi exclusivamente por razones especulativas del mercado que ignoran las limitaciones de las áreas a ser ocupadas: áreas inundables, áreas contaminadas, sujetas a erosión, zonas rellenadas con materiales inadecuados, áreas con niveles de agua freática rasa, etc.

Desde este punto de vista, las políticas nacionales de conservación y gestión ambiental (si existen) deben incorporar un objetivo extremadamente práctico: la viabilización ambiental de proyectos, obras y emprendimientos. En esta acción, necesariamente interdisciplinar, es necesario destacar el papel que deben desempeñar las geociencias.

## 3. LAS CARTAS GEOTÉCNICAS URBANAS

En este marco descrito, se inserta la realización de Cartas Geotécnicas urbanas como soporte básico para el análisis de estos problemas ligados al medio ambiente físico: agua - aire - suelo.

En este contexto, también toda la sociedad, y en especial las instancias gubernamentales, deberían:

- Optimizar las inversiones y
- Reducir las pérdidas económicas por problemas ligados al medio físico, los que principalmente, son:
  - Erosión y sedimentación
  - Deslizamientos
  - Asentamientos, subsidencias y colapsos
  - Degradación y agotamiento de los recursos hídricos
  - Contaminación por disposición de desechos y efluentes.
  - Fluctuaciones de la capa freática.
  - Degradación de áreas naturales sensibles, etc.

Para la identificación de cada uno de estos riesgos, asociados a determinadas áreas, puede encararse en una carta temática específica.

La cartografía geotécnica urbana típica, congrega métodos y técnicas que procuran establecer unidades territoriales homogéneas en cuanto a problemas manifiestos o potenciales y formula orientaciones técnicas para la ocupación de cada una de esas unidades, *Sanejouand (1972)*.

### 3.1. Una aproximación histórica a las cartas geotécnicas

#### *Las primeras cartas*

Fueron presentadas en la Exposición Técnica de Leipzig, en 1913, indicaban las condiciones de fundación para las ciudades de Altenburg, de Danzig y de Frankfurt sur Odre, entre otras, *Peter (1966)*. Las mismas fueron presentadas por el Profesor Langen y a grandes rasgos se representaban con diferentes colores y otros signos:

- Zonas inundables
- Zonas donde la freática se encontraba a menos de un metro de profundidad
- Zonas donde existían explotaciones mineras, etc.

En un fascículo adjunto se encontraban datos de sondeos geotécnicos o para provisión de agua.

#### *El método de Moldenabuer (1919)*

Existen pocos datos sobre la misma pero si se conoce que el autor dividió los terrenos en diversas zonas en función de la profundidad: 0 - 2 m; 2 - 4 m; 4 - 6 m; 6 - 10 m y presentó dos cartas, una de emplazamientos de sondeos y otra una carta geotécnica sensu estricto de la que no hay datos.

#### *El método de Stemme Ostendorf (1932)*

Por una parte, consta los datos geológicos y por otra parte los geotécnicos.

Cartas geológicas: de piedras y suelos útiles; de aguas subterráneas y de arroyos y de terrenos de construcción, según el esquema de Moldenabuer, y cartas geotécnicas: de capacidad portante, contenidos de agua y posibilidad de deslizamiento.

#### *El método de Muller (1938)*

Fue realizada en la comuna de Marke, y comporta: una carta de suelos aflorantes, otra de terrenos de construcción (carta de interpretación), una carta hidrológica, de tratamiento de suelos para su mejoramiento, una plano de uso de la planificación. La aptitud para la construcción de los diversos terrenos, se ponía en evidencia mediante el uso de diversos colores:

Verde y amarillo corresponde a buenos terrenos de fundación, con tensión admisible mayor ó igual a 2,5 kg / cm<sup>2</sup>; naranja a terrenos de calidad media; naranja hachurado: terrenos a priori poco favorables, con condiciones hidrológicas variables, fundaciones condicionadas; rojo, terrenos malos que necesitan fundaciones difíciles o muy costosas.

#### *Gwinner: Unidades Geotécnicas (1956)*

En éstas se examinan las condiciones de fundación, las posibilidades de tratamiento y las tensiones admisibles del terreno según la norma alemana DIN 1054. Hay una muy buena correlación entre características geológicas y datos físicomecánicos, las que las hace particularmente útiles. Las subdivisiones en zonas que pueden incluir distintos tipos de geomateriales.

Zonas sin asentamientos para fundaciones directas. Arenas y arenas arcillosas.

Rocas bajo 2 m de materiales de cobertura  
Roca en pendiente de 25% - 30%

Zonas donde la consistencia y la compacidad aumentan con la profundidad.

> de 2m de arcilla y loess  
> de 2m de arcilla y loess con agua  
suelos muy húmedos  
arcillas y margas del Keuper.

Zonas donde alternan capas duras y blandas.  
Zonas de posibles deslizamientos  
Zonas sin diferenciación.

#### *Las cartas geotécnicas Polacas (1956)*

Partiendo de la base que, según la complejidad son necesarios de 3 a 5 puntos de observación por km<sup>2</sup>, se normalizaron una serie de tareas: el control de los contactos geológicos y separación de los horizontes estratigráficos en grupos litológicos, la clasificación de rocas según normas nacionales, el análisis de los fenómenos geodinámicos: deslizamientos, fenómenos kársticos, erosión, sedimentación, etc. Las acciones antrópicas como explotaciones mineras, canteras, terraplenes, etc. Estudios geomorfológicos, observaciones hidrológicas e hidrogeológicas. La carta es a escala 1:25.000.

- a) en una *primera carta* se indican las formaciones superficiales hasta los 2 metros de profundidad. Los suelos y rocas se identifican por un color y un símbolo. Las rocas situadas a más de 2 metros de profundidad se indican por un hachurado y coloreado.
- b) En una segunda carta se delimitan zonas de fundación en las que es posible construir según datos de: Mecánica de suelos, fenómenos geodinámicos, profundidad de la 1ª napa de agua subterránea. Se podrían distinguir:

*Condiciones de fundación malas:* tales como capacidad portante menores de 0,5 kg/cm<sup>2</sup> ó de posibles asentamientos por distintos motivos.

*Condiciones de fundación buenas:* las características del terreno son favorables a todo tipo de proyecto, tales como capacidad portante de 3 a 5 kg/cm<sup>2</sup>, superficies topográficas absolutamente planas, superficie freática a más de 20 m de profundidad.

El sistema de representación es un sistema de bandas: los materiales de coberturas como colores continuos, la segunda capa está representada por bandas verticales, la tercera por bandas horizontales, etc. El color de la banda corresponde a la naturaleza del terreno mientras que el ancho de la banda corresponde a su espesor: zonas favorables, zonas aceptables, zonas desfavorables. Una concepción semejante tiene la carta geotécnica de la región de Mons, en el Reino de Bélgica, *Debaille y Ghiste (1969)*.

### 3.2. La Carta Geológico Geotécnica de la Ciudad de Buenos Aires

*Primera parte: Carta Geológica y base de datos de estudios geotécnicos, Rimoldi (2001)*

Bajo la dirección de H. V. Rimoldi y sobre la base del Convenio celebrado por el SEGEMAR, de la Subsecretaría de Industria, Comercio y Minería con la UBA, por intermedio de la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales se llevó a cabo la tarea preliminar de la elaboración de la carta de referencia.

Como tarea inicial se realizó una base de datos de estudios geotécnicos del análisis de más de 1.400 sondeos geotécnicos de longitud variable los que posibilitaron conocer los horizontes atravesados y las litologías reconocibles en función de la Clasificación Unificada de Suelos (SUCS), incluyéndose las densidades relativas, el número de golpes según el ensayo penetrométrico, además en cada sondeo se determinó el nivel freático, cuando este fuera detectado y una vez estabilizado.

En una segunda instancia se elaboró una Carta Geológica, en escala 1: 25.000 del ejido urbano en la que se separaron las Formaciones Geológicas aflorantes con el apoyo de la base de datos geotécnicos mencionada anteriormente. Se elaboraron ocho perfiles con los datos geotécnicos existentes y analizados. Estos perfiles atraviesan la ciudad en distintas direcciones y constituyen un documento geotécnico objetivo, ya que incorporan datos de la clasificación unificada, el número de sondeo representativo y la correlación entre unidades geotécnicas y la Formaciones.

Se han representado también diferentes cartas temáticas, como:

Curvas de nivel referidas al cero del Riachuelo, con equidistancia 5 m y escala gráfica.

Nivel isofreático, equidistancia 2 m. Valores promedio entre 1967 y 1980, referidos al cero del Riachuelo.

Techo del acuífero Puelches, equidistancia 5 m. Cotas referidas al cero del Riachuelo.

Áreas de crecida máxima, referida al 15 de abril de 1945 (+ 4,5 m) y

Áreas inundables por lluvias torrenciales, escala gráfica.

Está previsto en una segunda etapa: actualizar la carta Geológica y Base de Datos de Estudios Geotécnicos de la Ciudad de Buenos Aires a escala 1:25.000. En función de las posibilidades de acceso a la información existente en los archivos del Gobierno de la Ciudad de Buenos Aires, se establecerán los criterios del manejo de la misma para ser incorporada a la Base de Datos del IGRM-DGAA, de acuerdo con el formato de la misma. Elegir o seleccionar un área piloto (preferentemente ubicada en el área Ambientalmente crítica Sur), procesar todos los datos existentes en el área por el GCBA y representar una base topográfica adecuada las relaciones estratigráficas y su correlación con parámetros geotécnicos.

## 4. GEOLOGÍA, GEOTECNIA Y LAS OBRAS DE INFRAESTRUCTURA SUBTERRÁNEAS URBANAS EN LA CIUDAD DE BUENOS AIRES

### 4.1. Alteraciones sobre el suelo y las aguas subterráneas

Durante la etapa constructiva y operativa de estas obras se han identificado los siguientes impactos potenciales sobre geomateriales y procesos del medio físico, *Di Salvo (1999, 2000)*

En obras a cielo abierto (pozos de acceso, maniobras, etc.):

Deslizamientos de taludes  
Erosión hidráulica  
Alteraciones en el escurrimiento de las aguas subterráneas y superficiales

En obras subterráneas (túneles, estaciones, etc.):

Subsistencia  
Deformaciones  
Alteraciones en el escurrimiento de las aguas subterráneas y superficiales

### *Deslizamientos de taludes en excavaciones superficiales*

Durante el período constructivo deben ejecutarse importantes excavaciones a cielo abierto, de profundidad variable, promedio entre 6 y 15 metros. Estos pozos son excavados en forma vertical de manera de mover la menor cantidad de suelo y a su vez no ocupar otros espacios ya construidos (calzadas, autopistas, etc.).

En general los taludes son estables, aún en suelos de la Formación Buenos Aires con cohesiones no drenadas de 0,40 kg/cm<sup>2</sup> y ángulos de fricción interna del orden de 12° a 15°. Sin embargo, cuando en tales excavaciones la presencia de agua es importante, la generación de fuerzas de filtración en la masa adyacente al talud hacia el interior de la excavación, tiene efecto desestabilizante y los ángulos del talud deberían ser menores de 90°.

Es necesaria la depresión de la capa freática con perforaciones exteriores al pozo. Similar es el caso que se presenta cuando sobre el coronamiento del talud se dispone sobrecargas (escombreras, equipos pesados, otros materiales, etc.)

### *Erosión hidráulica*

Muy distinto puede ser el comportamiento de estos taludes cuando las excavaciones permanecen abiertas durante largos períodos (varios meses) y se abaten sobre los mismos lluvias de alta intensidad, por ejemplo más de 30 mm/hora. En estos casos, la erosión laminar del loess pueden desestabilizar el talud.

### *Subsidencia*

El proceso consiste en la deformación o desplazamiento en sentido esencialmente vertical y descendente, que puede verificarse en los cimientos de las fundaciones. Esta puede ser muy importante en áreas urbanas y puede constituir una externalidad no deseada de una obra subterránea. La misma puede producirse por deformación de suelos superficiales afectados por la excavación misma o bien como producto del arrastre de partículas a raíz de un cambio en el gradiente de las aguas subterráneas producido por obras subterráneas como aliviadores pluviales.

### *Deformaciones*

En toda excavación subterránea tienen lugar deformaciones alrededor de la sección de excavación que resultan inherentes al necesario mecanismo de equilibrio, que varía con el tiempo, desde que la deformación crece desde cero hasta alcanzar el valor máximo (estabilización), en forma asintótica.

Durante el transcurso de la obra Aliviador Cildáñez, proyectada por el M.E.S y O.P (Ministerio de Obras y Servicios Públicos) en el sur de la ciudad, se controlaron los desplazamientos o asentamientos, como efecto directo de la excavación de una sección de 5,50 m de diámetro.

Se realizaron mediciones extensométricas en cinco puntos alineados sobre el eje del túnel en una misma sección transversal lo que implica que pueden ser graficados en único diagrama "desplazamientos vs. profundidad". Estas mediciones se realizaron en un área comprendida en la intersección de la calle Pagola y Avenida General Paz, a unos 2 km de Juan Bautista Alberdi y Avenida General Paz, hacia el sur. Las características geológicas y geotécnicas de la misma se observa en el Cuadro N° 1, *Di Salvo y del Río (2001)*.

En el Gráfico N° 2, se observa que los desplazamientos máximos se localizaron en la superficie, y los desplazamientos mínimos sobre la clave del túnel.

Como conclusión de las mediciones realizadas y, contrariamente a lo esperado, la superficie habría descendido en un valor que puede afectar a construcciones civiles que se sitúen directamente por encima de excavaciones subterráneas de estas características, lo que no ha ocurrido en esta obra por tratarse de espacios verdes, sin urbanización.

### *Alteraciones en el escurrimiento de las aguas subterráneas y superficiales*

Las excavaciones de túneles actúan como un dren para las aguas subterráneas, especialmente sobre el nivel freático. Es asimismo importante detectar si este cambio en la dinámica de las aguas subsuperficiales puede producir erosión interna ("pipping") de las partículas más finas del suelo, proceso que está a su vez relacionado con el proceso de subsidencia.

Otro problema que puede presentarse es el ascenso del nivel de agua subterránea agua arriba del túnel, debido a obstáculos (drenaje insuficiente) al escurrimiento en dirección perpendicular al eje. Este ascenso, según *Marinos y Kavvadas (1997)*, puede producir genéricamente los siguientes efectos adversos.

- Reducción de la capacidad portante de las fundaciones superficiales.
- Desarrollo de subpresiones debajo de las losas de fundación.
- Posible ascenso del suelo debido a la reducción de tensiones efectivas causadas por el incremento de la presión de poros.
- Expansión de rellenos bajo fundaciones superficiales.
- Asentamiento de suelos de relleno con baja compactación.
- Erosión interna (pipping) que puede afectar a ductos, obras viales, edificaciones, etc.
- Necesidad de un incremento de drenajes en las excavaciones temporarias.
- Propagación de contaminantes previamente contenidos en las napas superficiales

## 5. CONCLUSIONES

Las conclusiones de esta contribución tienen una doble vertiente; la primera, genérica, está referida a la necesidad e importancia de las cartas geotécnicas como elemento de gestión en la planificación y el desarrollo urbano. Estas se desarrollan en dos secuencias bastante definidas:

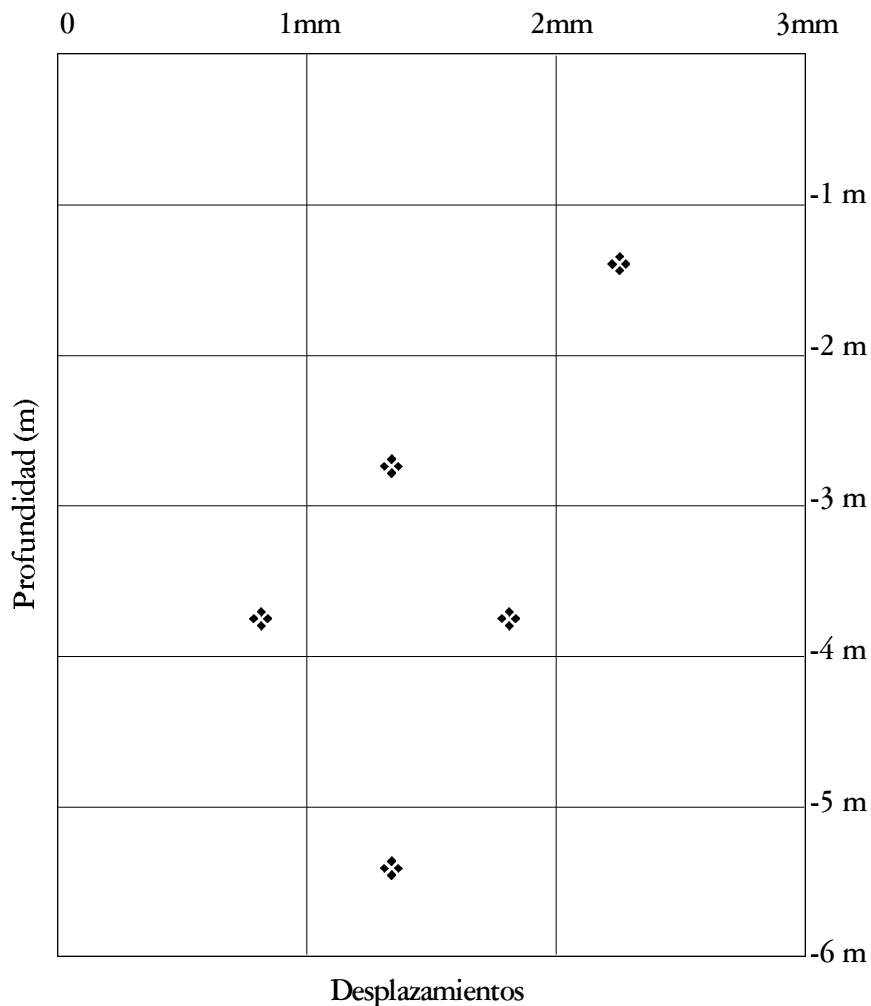
- a) *elaboración de la carta de documentación o de factores*. En la que se explican y documentan los principales factores del medio físico, tales como:
  - los geomateriales existentes
  - la hidrogeología
  - el relieve
  - la geomorfología
  - la geodinámica externa e interna
  - las acciones antrópicas y
- b) *realización de la carta de aptitud* la que mediante zonificaciones, que siempre comienzan por una buena geología y geomorfología de base, *Sanjeouand (op cit.)*, constituyen cartas de riesgo, de susceptibilidad, de atributos, etc. La carta, entonces, debe reunir y sintetizar información, de carácter público y privado *Di Salvo, Tomasini, Cicerone y Sanguinetti (1999)*, en aspectos, como:



CUADRO N° 1. CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS Y GEOTÉCNICAS DEL SECTOR EN ESTUDIO

Progresivas del túnel	100 - 1965
Tapada máxima	6,50
Tapada mínima	3,00
Tapada media	4,76
Tipo de suelo predominante	CL y MH
Formación geológica	Sedimentos pampeanos: limos calcáreos, preconsolidados por desecación, de coloración castaña
Ensayo SPT (N° de golpes) máximo	20
Ensayo SPT (N° de golpes) mínimo	11
(d media en T/m <sup>3</sup> )	1,43
Cu (media) en kg /cm <sup>2</sup>	0,57
u (media) en °	11
Es (obtenido por correlación en T /m <sup>2</sup> )	Sin datos
Prof. Media del nivel freático	3 m

GRÁFICO N° 2. DESPLAZAMIENTOS (mm) VS. PROFUNDIDAD (m) EN TÚNEL ALIVIADOR CILDÁÑEZ



- La aptitud geotécnica, que condiciona la expansión urbana superficial y subterránea (construcciones en sentido amplio, redes de subterráneos, redes viales, entubamientos, etc.),
- Prevención del comportamiento de la interacción entre la ocupación del medio físico y el medio construido o a construirse, como asimismo, los propios conflictos entre las diversas formas del uso territorial,
- Orientar las medidas preventivas y correctivas en el sentido de minimizar las externalidades y/o riesgos en los proyectos que involucren el uso del suelo,
- Identificar sitios contaminados o áreas degradadas, que condicionan o pueden hacerlo, el uso habitacional, comercial y recreativo del mismo (Aptitud de depuración).
- Áreas de captación hídrica y de filtraciones y de aptitud hídrica, en sitios de transporte de contaminantes.
- Relieve y paisaje natural y edificado.
- Monitoreo y cuantificación de los contaminantes químicos, que incluye el desarrollo e implementación de modelos de transporte de contaminantes en suelos.
- Establecimiento, fiscalización y control del cumplimiento de normas de uso del suelo (Ordenamiento Territorial).
- Evaluación del impacto de emprendimientos tanto públicos como particulares sobre el suelo.

La segunda conclusión un tanto más particular, esta referida a las grandes obras subterráneas en la Ciudad de Buenos Aires. Los "sedimentos pampeanos" poseen una elevada compacidad y resistencia, situación ésta que ha llevado a la generalización de que no existen riesgos asociados a la construcción de obras subterráneas, cuando las mismas se desarrollan en estos geomateriales.

La investigación realizada demuestra, no obstante, que deben monitorearse mediante mediciones extensométricas u otras, el asentamiento de los terrenos suprayacentes a la excavación, fenómeno que puede acarrear el riesgo de subsidencia de infraestructuras preexistentes ubicadas encima de obras subterráneas en ejecución.

El ascenso y descenso de niveles freáticos es una complicación a considerar siempre que se construyen obras de infraestructura subterráneas por la variedad, complejidad y gravedad de externalidades que pueden acarrear. En consecuencia, es

necesario medir del ascenso y descenso de éstos, durante la ejecución y explotación de la obra.

La propuesta conceptual, de este trabajo es: que siempre que se planifique la ejecución de una obra subterránea en áreas urbanas, debe instalarse y operarse una red de auscultación de asentamientos y una red de monitoreo de aguas subterráneas en secciones tipo, ejecutable en dos etapas: a) durante la construcción y b) durante la operación de la obra.

La selección de las secciones típicas, debe realizarse sobre la base de dos variables, el medio físico: tipo de suelos existentes (valores mínimos de resistencia a la penetración SPT y Cu, p. ej.), posición inicial del nivel de agua, drenaje superficial, etc. y la importancia del medio construido. Durante la operación de la obra, las mediciones referentes a asentamientos y a la fluctuación (descenso o ascenso) en el nivel de las aguas subterráneas, en las secciones anteriormente señaladas, se extenderán durante un periodo de un año posterior a la finalización de las obras.

Para asegurar su materialización, en la etapa de ejecución de la obra, este aspecto deberá tener una particular y definida indicación en las especificaciones técnicas de los contratos de obra, ya que el monitoreo en la etapa de obra implica una doble ventaja comparativa: permite por una parte verificar las asunciones realizadas en el proyecto y contar con una visión del comportamiento estructural de los geomateriales, y adicionalmente proveer de información durante la construcción para prevenir o afrontar posibles dificultades originadas en deformaciones excesivas que no sólo puedan comprometer la seguridad estructural de las obras sino del medio circundante. Como comentario adicional, las empresas contratistas de la nueva línea H de subterráneos y la que construye la ampliación de la línea D, están implementando un sistema de mediciones durante el periodo constructivo.

## 6. AGRADECIMIENTOS

A la Comisión Directiva del XV Congreso Geológico Argentino (Geología y Sociedad) que ha permitido la exposición de estos temas en nuestro lejano y bellissimo Calafate, en el mes de abril del 2002.

## 7. RECORDATORIO

A nuestro gran amigo Juan Carlos del Río, excelente ingeniero en construcciones, que tanta importancia supo darle a la intervención del geólogo en las obras subterráneas. Con él delineamos la esencia de este trabajo, y que tanto lamentamos el haberlo perdido tan prematuramente.

## 8. TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

DEBAILLE G. Y GHISTE S., 1969.

Carte géotechnique de la région de Mons.  
*Institute Reine Astrid. Mons, Bélgica.*

DI SALVO C. A., 2000.

Alteración de geomateriales (suelos y rocas) por acción de las construcciones civiles en el Aliviador Cildáñez.  
*Universidad de Buenos Aires. Programación Científica 1998 - 2000. Informe parcial N° 1. Inédito pp. 70. Buenos Aires.*

DI SALVO C. A., 1999.

Geología aplicada a la ingeniería y al ambiente en el en el proyecto aliviador de aguas pluviales Cildáñez.  
Ciudad de Buenos Aires.  
*Revista de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente. N° 13. Pág. 17 - 32. Buenos Aires.*

DI SALVO C. A., TOMASINI D., CICERONE D. Y SANGUINETTI A., 1999.

La ciudad invita a pensar. Encuentro sobre sociedad ciencia y tecnología. Problemas ambientales y calidad de vida.  
*Subcomisión Suelo. Eudeba, 222 pp. Buenos Aires.*

- DI SALVO C. A. Y DEL RÍO J. C., 2001.  
Riesgos geotécnicos debido a la construcción de túneles en la Ciudad de Buenos Aires.  
*IIª Reunión Nacional y Iª del Mercosur de Geología Ambiental y Ordenación del Territorio. Mar del Plata.*
- MARINOS P. G. KAVVADAS M. J., 1997.  
Effects of shallows tunnels on the groundwater table levels.  
*Boletín IAEG N° 56, Paris.*
- M. E.O y S. P., 1994.  
Red de Accesos a la Ciudad de Buenos Aires Obras de desagües pluviales. Aliviador del A° Cildáñez.  
*Informe Final; Anexo 2, Vol. 1 Memoria de Cálculo Hidráulico. Inédito, Buenos Aires.*
- PETER A., 1966.  
Principes de réalisations des cartes géotechniques.  
*Etude bibliographique. B. R. G. M. Paris.*
- RIMOLDI H. V., 2001.  
Carta Geológico Geotécnica de la Ciudad de Buenos Aires. Primera parte: Carta Geológica y base de datos de estudios geotécnicos.  
*Tomo I. SEGEMAR. Serie de Contribuciones Técnicas. Buenos Aires.*
- SANEJOUAND R., 1972.  
La cartographie géotechnique en France.  
*Ministere de l'équipement et du logement, Paris.*



## Deslizamiento de ladera sobre la Ruta Provincial N° 9 Localidad de Nogolí - Provincia de San Luis

Gardini, Carlos E. <sup>1,2</sup> - Sales, Daniel A. <sup>1</sup> - Ricci, Walter R. <sup>1</sup>

### Resumen

*El deslizamiento reconocido en la nueva Ruta Provincial N° 9 fue ocasionado por un incremento inusual de precipitaciones registradas entre Enero del año 2000 y Abril de 2001, que actuaron sobre fuertes pendientes, generando grietas de tracción que afectaron a los depósitos coluviales de ladera. El material se acumuló pendiente abajo por encima de las rocas del basamento, lo que comprometió la estabilidad del macizo rocoso ante el desarrollo de la obra vial.*

*Las sucesivas lluvias incrementaron el desplazamiento del material con una velocidad promedio de 3 centímetros por día y registrándose a los siete meses un desplazamiento total de 7 metros y un rechazo vertical de 4,8 metros.*

### 1. INTRODUCCIÓN

El presente estudio tuvo como objetivo determinar las características del deslizamiento de ladera ocurrido entre la progresiva 33 + 880 y 33 + 700 de la nueva traza vial (coordenadas Gauss-Kruger 3.478.347 - 6.351.277 y 3.478.424 - 6.351.130).

El área de estudio se ubica a 45 km al Norte de la Ciudad de San Luis y a 11 km al Este de la localidad de Nogolí (Fig. 1).

El área afectada coincide con el sector de intensa deformación frágil que participa en la estructuración del frente occidental de la Sierra Grande de San Luis (Costa, 1996), a lo largo del cual tuvo lugar el alzamiento de la sierra por efecto de un sistema de fallas inversas.

Dichas fallas produjeron la fragmentación de las rocas, facilitando a los ríos y arroyos la elaboración de valles muy profundos con pendientes de elevada inclinación, propensas a una constante desestabilización por efecto de fenómenos naturales o antrópicos.

### 2. SITUACIÓN DEL SECTOR

El contexto climático de la región muestra que el sector pertenece a una región árida a semiárida, donde las lluvias se generan en la época estival y en la cual son comunes las precipitaciones torrenciales. A pesar de ello, y de haberse incrementado el promedio anual pluviométrico, las estadísticas de los últimos años indican una baja frecuencia, lo que permitió mantener una relación de equilibrio.

Como consecuencia del incremento en cantidad e intensidad de las precipitaciones pluviales, principalmente en dos fechas claves, la primera el 16 y 17 de Enero de 2000 y la segunda el 13 de Abril de 2001, hubo un substancial cambio en las condiciones climáticas que y afectó la estabilidad de las laderas (Fig. 2).

El 14 de noviembre de 2000 cuando se realizaba la apertura del camino, se reconoció en el sector una pequeña grieta que mostraba un deslizamiento de 40 centímetros, producto de la acumulación de agua en los sedimentos que conforman la pendiente.

El 13 de Abril de 2001 se producen en la sierra de San Luis nuevas precipitaciones pluviales que provocaron derrumbes y deslizamientos. Las grietas de tracción formadas en la ladera, permitieron que la masa del terreno siguiera trabajando por la acción

Entregado: 16 de Julio de 2003 ■ Aceptado: 04 de Setiembre de 2003

1. Universidad Nacional de San Luis, Departamento de Geología,  
Chacabuco 917, 5700, San Luis, e-mail:cgardini@unsl.edu.ar

2. CONICET

FIGURA 1. MAPA GEOLÓGICO Y DE UBICACIÓN

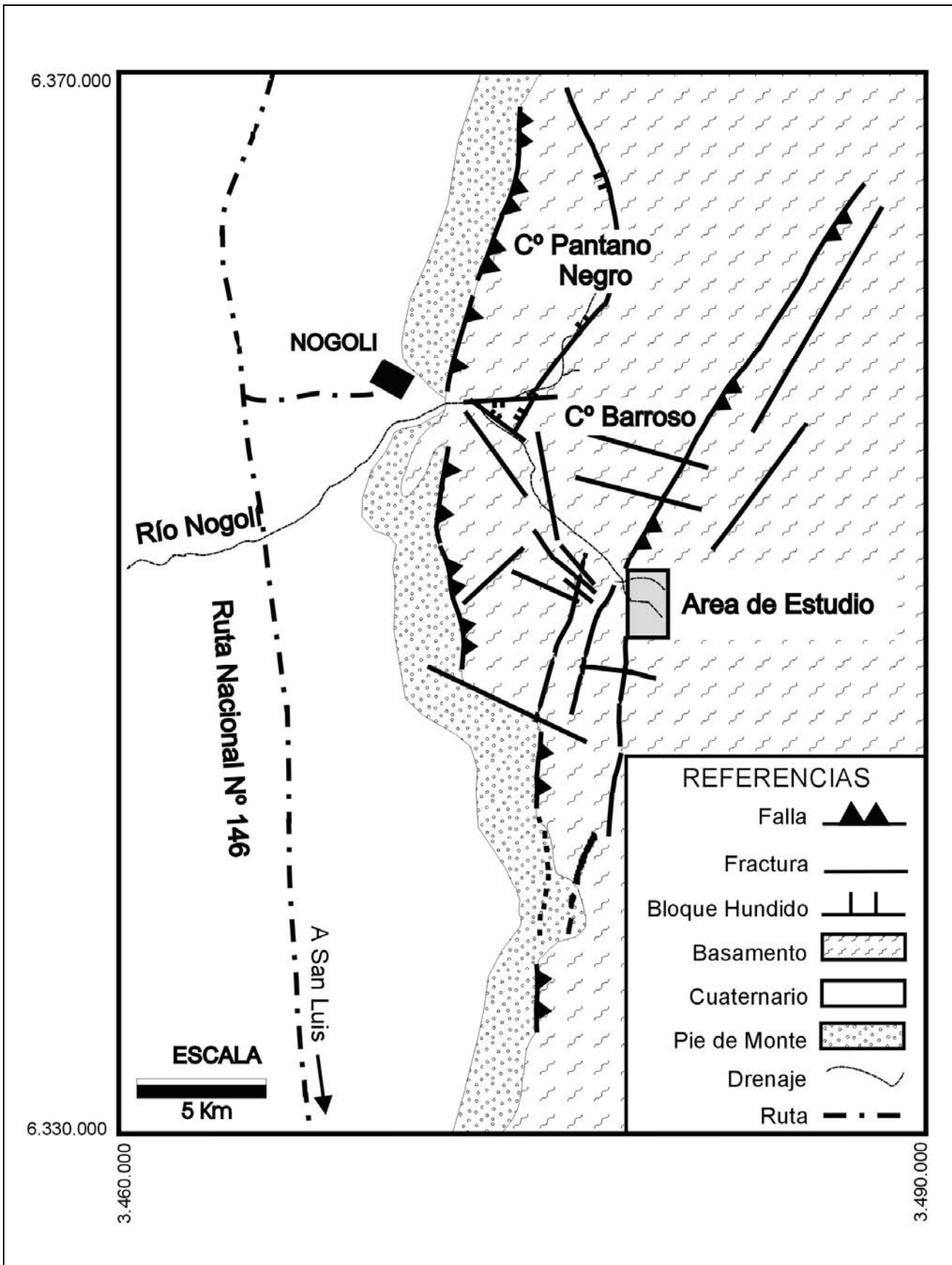


FIGURA 2. VISTA PANORÁMICA HACIA EL SUR DEL DESLIZAMIENTO QUE AFECTA LA NUEVA TRAZA VIAL



de la gravedad hasta alcanzar una longitud máxima deslizada de 7 metros en Junio de 2001 (*Gardini et al. 2001*) (Figs. 3a y 3b).

El deslizamiento de ladera comprometió al sector superior de las rocas del basamento que comenzaron a flexurarse pendiente abajo por efecto de creep.

### 3. RASGOS GEOLÓGICOS Y GEOMORFOLÓGICOS

Las rocas que componen el talud son principalmente esquistos cuarzo-micáceos, con intercalaciones de bancos de cuarcitas de hasta 30 cm de espesor de color gris y foliación gruesa, e inyecciones pegmatíticas de color rosado claro. En general son concordantes con la estructura de la roca, y presentan con frecuencia diseños irregulares con estructuras de cuello y engrosamiento que generan un aspecto veteadado.

La geología se completa con los depósitos de ladera (coluvio) integrado por una asociación de bloques, gravas, limos, arenas y suelo en un ordenamiento caótico propio del relleno en sectores de fuertes pendientes. Normalmente se desarrollan como mantos en cuña desde los sectores más elevados pendiente abajo incrementándose como consecuencia el espesor con forma similar al caso del área analizada, donde la irregularidad del basamento forma un abovedamiento hacia arriba que favoreció la generación de un depósito de mayor espesor que el habitual (ver perfil de la Fig. 3b).

El deslizamiento de ladera se halla ubicado en el sector interno del basamento y está dominado por elevadas pendientes,

ya que el mismo constituye parte del alzamiento principal de la sierra por lo que los ríos logran un gran entalle vertical favorecido por elevadas pendientes, que generan laderas mayores a 25° de inclinación. La disposición y distribución de pendientes y ríos está muy controlada por la estructura interna de la roca, a la que su condición metamórfica y geometría planar le confiere una heterogeneidad singular. A su disposición submeridiana se le suma la deformación frágil que provoca fallas y zonas de cizalla con elevada rotura de la roca, desagregación y consecuente desestabilización de las laderas.

El principal curso del área es el río Nogolí y está formado por la unión de los ríos del Molle y Chico, este último se eleva hacia la sierra y a pocos kilómetros aguas arriba se separa un tributario importante que es seguido por la traza del camino en construcción. Ambas cuencas se extienden en sentido NNW-SSE, debido a que la estructura ejerce un control importante en varios tramos de su recorrido.

### 4. RASGOS ESTRUCTURALES Y GEOMECÁNICOS

La foliación o estructura interna de la roca del basamento está dispuesta en fajas o capas subparalelas con rumbo submeridiano (30° a 350°) e inclinaciones elevadas (60° a 75°) al Este y al Oeste.

En adyacencia al sector deslizado (Progresiva 33 + 450) se preserva la geometría descrita, conforme se asciende en el talud se comienza a notar el efecto gravitatorio y los bancos se deslizan en forma de abanico, hacia el Este y hacia el Oeste.

FIGURA 3a. VISTA DETALLADA DEL SECTOR DE ARRANQUE

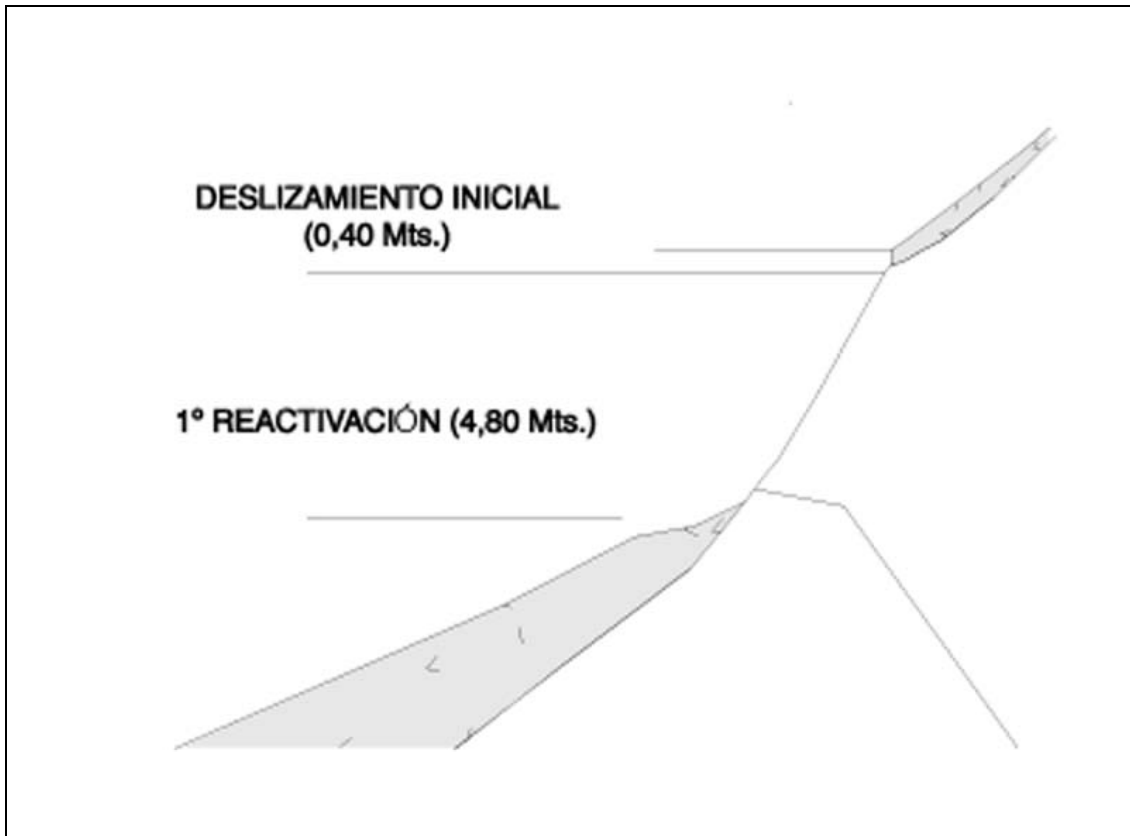
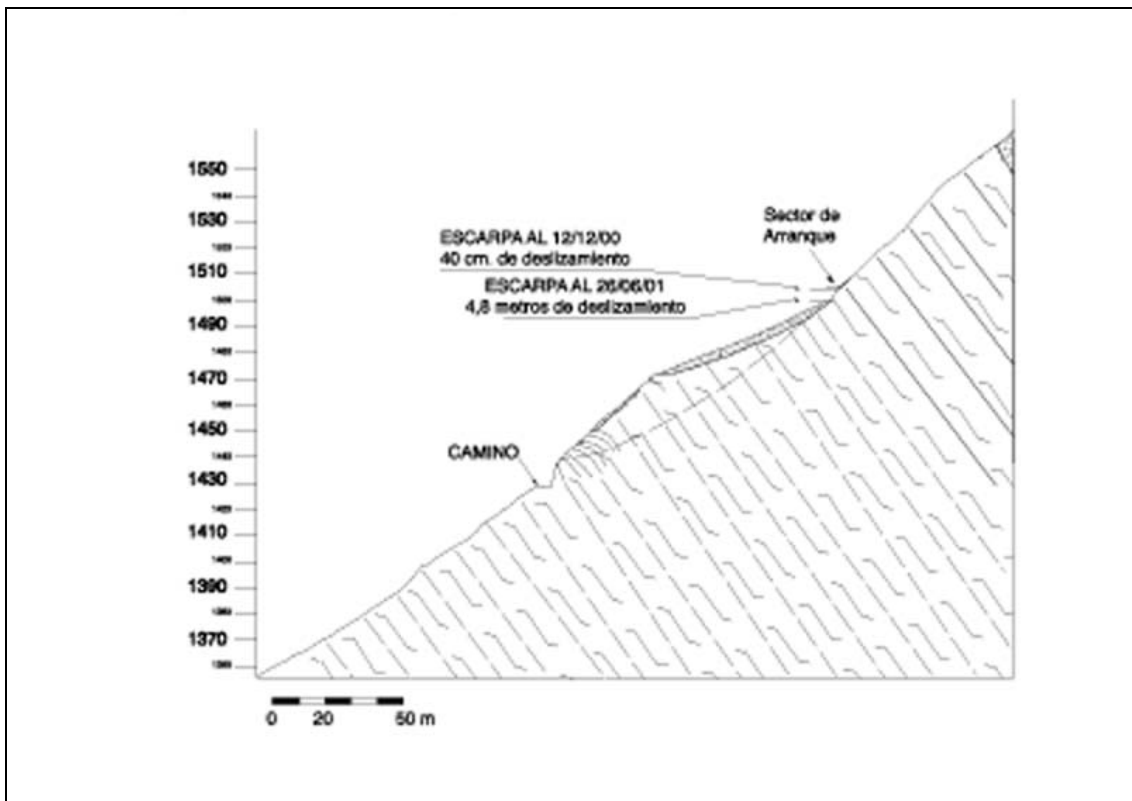


FIGURA 3b. PERFIL TRANSVERSAL AL SECTOR PRINCIPAL DEL DESLIZAMIENTO, en el sector izquierdo del mismo se observa la traza del camino





En la zona de estudio, se observan fallas inversas con rumbos generales NNW-SSE ( $350^{\circ}$  -  $320^{\circ}$ ) con planos inclinados hacia el oriente de  $50^{\circ}$  a  $70^{\circ}$  en relación con las fallas principales que elevaron la sierra durante la tectónica andina. Su acción genera zonas de rocas muy fragmentadas y arcillas, de fácil extracción pero que generalmente provocan derrumbes locales. En asociación a estas fallas se reconocen otros tipos de fracturas oblicuas y con disposiciones subverticales, algunas de las cuales poseen rellenos de óxidos y cuarzo. Todas estas estructuras favorecen la generación de derrumbes de talud, posteriormente erosionados y transportados por los ríos.

## 5. DESCRIPCIÓN DEL DESLIZAMIENTO

A los fines del seguimiento de la descripción morfológica del sector problema, la Figura 4 muestra el deslizamiento analizado en relación con la estructura del basamento.

La morfología de la ladera afectada presenta una forma cóncava hacia arriba que interrumpe la pendiente normal. Este cambio de inclinación está evidenciado por el afloramiento del

basamento que genera discontinuidad del depósito de ladera, produciendo un aumento del espesor del material coluvial encima de los afloramientos. A partir de aquí continúa ladera abajo como una delgada capa de 40 a 50 cm.

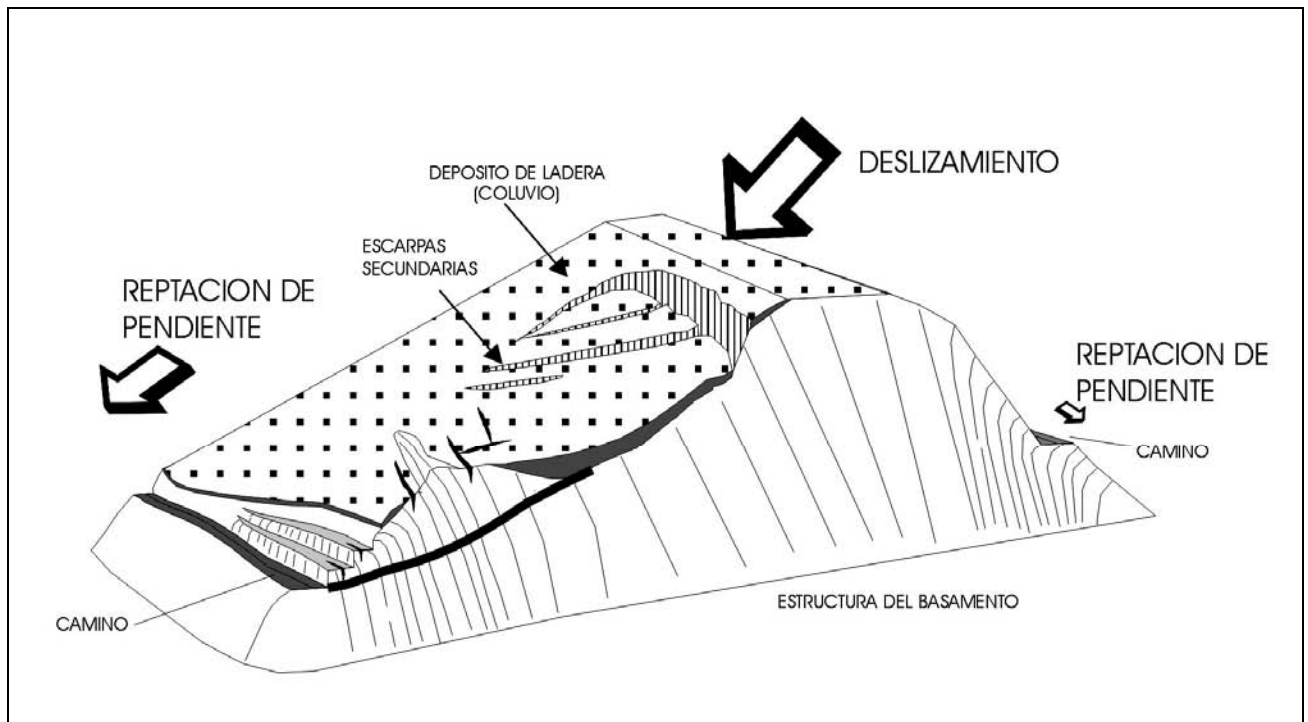
Esta acumulación inusual presenta un continuo y acelerado proceso de deslizamiento que afectó principalmente al material coluvial depositado por encima del macizo rocoso y comprometió la estabilidad de las rocas ladera abajo.

El deslizamiento se reactivó alcanzando mayor magnitud, hasta un máximo de 5 m en el sector central. Posteriormente fue afectado por, al menos, dos reactivaciones posteriores a las lluvias caídas en el mes de Abril de 2001.

En el mapa topográfico realizado el 26 de Junio de 2001 se observó una geometría compleja donde se define la cabecera, con un rumbo de  $26^{\circ}$  y una longitud de 53 metros. Se reconoció un flanco derecho (hacia el norte) de 35 metros de largo bien expuesto, mientras que el flanco izquierdo se presentaba sinuoso con rumbo Este-Oeste proyectado ladera abajo, con un largo similar a la cabecera (véase Fig. 4).

### FIGURA 4. BLOCK DIAGRAMA QUE MUESTRA LAS CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS DEL DESLIZAMIENTO

Se observan las grietas y escarpas secundarias sobre el flanco derecho. Las estructuras del basamento muestran un importante reptaje de pendiente que se incrementa por el peso del coluvio deslizado



El análisis geométrico de la zona de arranque indica un claro deslizamiento del material coluvial sobre el basamento, donde se observa material calcáreo depositado en la superficie de contacto, lo que indica la circulación de aguas carbonatadas previas al deslizamiento, ya que las estrías están impresas en el mismo. La posición del plano y de las estrías indican movimientos extensivos ladera abajo en dirección  $280^{\circ}$  promedio (Fig. 5) con planos de deslizamiento con rumbo  $10^{\circ}$  a  $20^{\circ}$  (Fig. 6) que inclinan entre  $50^{\circ}$  y  $60^{\circ}$  al Noroeste (Fig. 7) y generan un deslizamiento tipo rotacional.

Estos planos permiten definir en el terreno una longitud deslizada máxima incluyendo las reactivaciones producidas a Junio de 2001 de 7 m., que es la diferencia entre el punto más alto y bajo de la escarpa, lo que genera un desnivel máximo de 4,9 m (Figs. 3a y 8).

El tipo de deslizamiento generado provocó el descenso de las rocas involucradas hacia el oeste, lo que descompensó la posición del flanco derecho, que por su mayor altitud e inclinación es el sector donde se generaron las escarpas secundarias (véase Fig. 4).

FIGURA N° 5. REPRESENTACIÓN ESTEREOGRÁFICA DE LOS PLANOS DE FALLA IDENTIFICADOS EN EL SECTOR PRINCIPAL DEL DESLIZAMIENTO

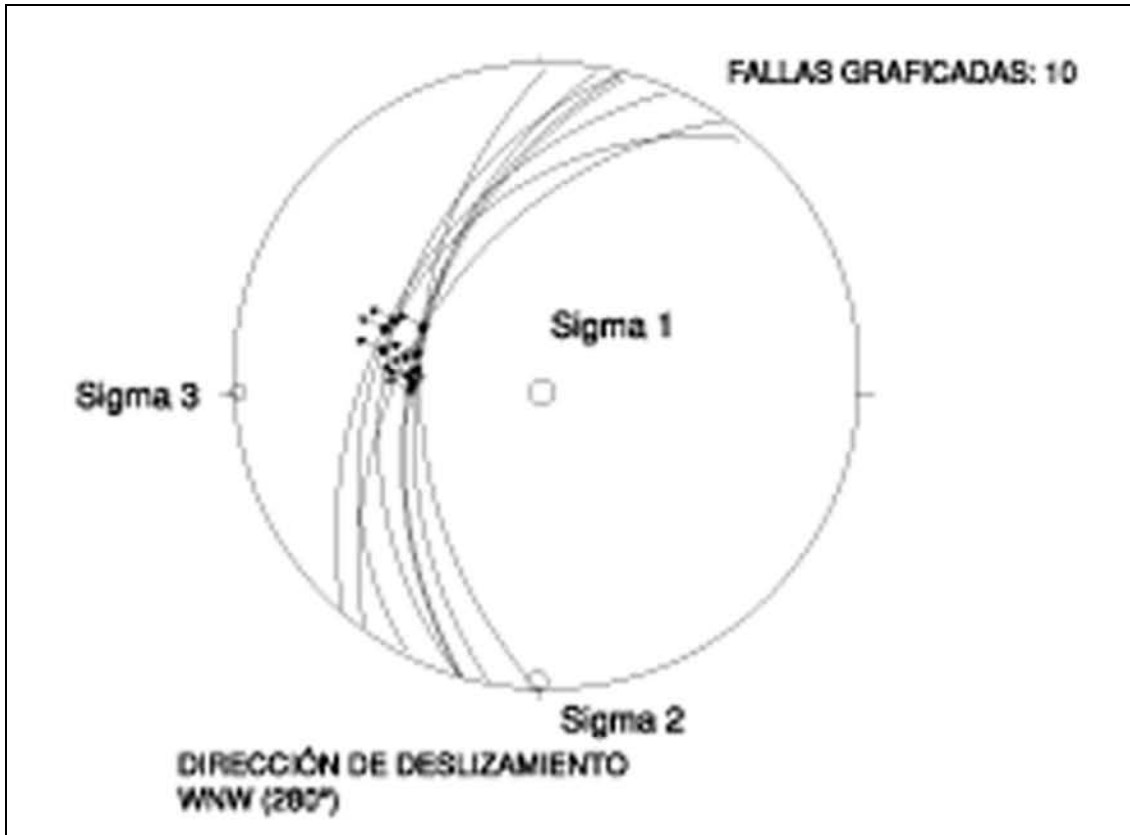
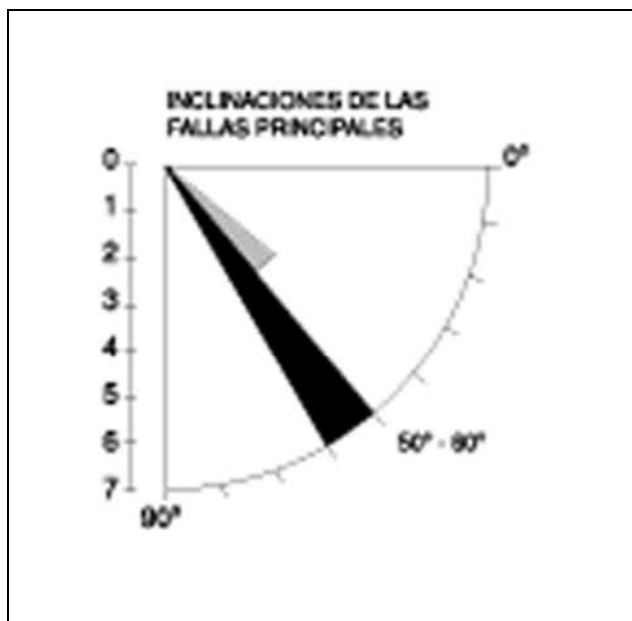


FIGURA N° 6. REPRESENTACIÓN ESTADÍSTICA DE LOS RUMBOS DOMINANTES EN LOS PLANOS DE DESLIZAMIENTO



FIGURA N° 7. REPRESENTACIÓN ESTADÍSTICA DE LOS BUZAMIENTOS DOMINANTES EN LOS PLANOS DE DESLIZAMIENTO



**FIGURA 8. FOTO DEL ÁREA SUPERIOR DEL DESLIZAMIENTO, se puede observar el plano principal de deslizamiento**



En asociación a la actividad del deslizamiento se generaron grietas de tracción y algunas de ellas se han activado como fallas normales, principalmente en la parte superior y base del deslizamiento donde se encuentra involucrado el basamento. Este tipo de actividad probablemente ha condicionado la variación del flanco izquierdo que ha seguido una posición más recta con estas fallas de rumbo Este - Oeste.

Según se han podido mensurar y mapear, las grietas de tracción presentan diferentes orientaciones, pero la mayoría están ubicadas con rumbos NE-SO (dirección perpendicular al deslizamiento) y NO - SE (paralelas a los flancos).

Poseen longitudes que llegan hasta los 36 m y apertura de hasta 30 cm, con profundidad máxima de 2 m, involucrando por consiguiente a las rocas del basamento y por lo tanto indica que es una pendiente con una alta inestabilidad. El material deslizado es parcial y momentáneamente retenido por los afloramientos del basamento pendiente abajo, el cual presenta variaciones en su inclinación, cambiando de subvertical hasta llegar a 17° en la base inferior. Esto indica que a pesar de existir una reptación de pendiente, el exceso de masa generado por sobre el macizo rocoso está provocando una aceleración en la rotación de los bancos. Consecuentemente con ello, la generación de bermas en la intención de estabilizar el talud provocó la generación de nuevas grietas. La presencia de grietas en la superficie deslizada, produjo un aumento considerable de la filtración de

agua y como consecuencia, la inestabilidad de un talud altamente fracturado, con una cizalla subparalela al plano de deslizamiento. Esto favoreció la descompensación del talud y el deslizamiento hacia el camino.

## 6. CONCLUSIONES

La existencia del deslizamiento es producto de las elevadas pendientes que fueron desestabilizadas por un régimen de lluvias inusual.

El trabajo de construcción del camino incorpora una nueva variable de desestabilización del talud y acelera la generación de grietas de tracción, ingreso de agua al macizo y la consecuente descompensación de las rocas de basamento sobre las que apoya el material coluvial.

Las mediciones realizadas durante el trabajo de campo y la información de los datos previos permiten a priori determinar una velocidad media de deslizamiento del material. Se partió de la base de un desplazamiento inicial de 40 cm el 14 de Noviembre de 2000 y un desplazamiento total medido el 26 de Junio de 2001 de 7 m ( 224 días después), esto indica que la masa rocosa se estuvo desplazando a un promedio de 2.9 cm por día.

Se estima que la inestabilidad del conjunto roca-suelo, alcanza una profundidad estimada de 11 m, lo que indica un volumen total movilizado de aproximadamente 88.000 a 100.000 m<sup>3</sup>.

## 8. TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

COSTA, C., 1996.

Análisis neotectónico en las sierras de San Luis y Comechingones: Problemas y métodos.  
*XIII Congreso Geológico Argentino y II Congreso de Exploración de Hidrocarburos, Actas II: 285-300*

GARDINI, C., SALES, D. Y RICCI, W., 2001.

Estudio del deslizamiento sobre la traza de la ruta Río Grande - Nogolí, Tramo: R.P.N° 9 (Río Grande - Dique Nogolí)  
(Progresiva 33 + 700), Sierra Grande de San Luis, Prov. de San Luis.  
(*Inédito*). 46 págs.



# Deslizamientos y rasgos asociados producidos en el año 2001 en un sector de las sierras septentrionales

Provincia de Buenos Aires

Gentile, Rodolfo Osvaldo <sup>1</sup> - Villalba, Horacio Alejo <sup>2</sup>

## Resumen

*Se caracterizan e interpretan procesos de remoción en masa y rasgos asociados, reconocidos en un sector de las Sierras Septentrionales de la Provincia de Buenos Aires, ubicado hacia el extremo sur del Partido de Tandil, distante unos 40 km en línea recta, al sur de la ciudad homónima.*

*Los procesos, que tuvieron lugar entre finales de Agosto y comienzos de Septiembre del año 2001, generaron un conjunto de rasgos, entre los que se destacan, escarpas de variado desarrollo, bloques deslizados, deslizamientos de detritos y fracturas. El movimiento principal correspondió a un deslizamiento, específicamente de tipo desmoronamiento, que originó una escarpa principal de hasta unos 2 m de altura y unos 285 m aproximadamente de longitud y bloques deslizados con pendientes invertidas. Una escarpa de menor jerarquía se formó a unos 15 metros de la anterior, con una longitud de aproximadamente 80 m y una altura de unos 0,7 m como máximo. Como consecuencia de los movimientos, se produjeron además, deslizamientos de detritos de escasa magnitud y un conjunto de fracturas de variadas dimensiones, aquellos y parte de estas afectaron rasgos originados por procesos de remoción en masa, los que tuvieron lugar, en otros momentos de la evolución del paisaje.*

*El sector estudiado presenta características geológicas y geomorfológicas, que bajo determinadas condiciones resultan favorables para la generación de movimientos gravitacionales. Estas se habrían potenciado como consecuencia de valores elevados de precipitaciones registrados en el mes de Agosto del año 2001, las que habrían actuado como probables factores desencadenantes de los movimientos. El reconocimiento de geoformas y elementos asociados más antiguos que los aquí estudiados y también producto de remoción en masa, indica que el área que consideramos ha estado sometida a estos procesos durante su desarrollo.*

Entregado: 17 de Diciembre de 2002 ■ Aceptado: 16 de Abril de 2003

1. Calle 45 N° 888 (entre 44 y 45), cuarto piso Dto. "A". La Plata (1900),  
Provincia de Buenos Aires. E-mail: ogentile@way.com.ar  
Cátedra de Geomorfología, Facultad de Ciencias Naturales y Museo  
(Universidad Nacional de La Plata y Cátedra de Geomorfología  
y Geología del Cuaternario, Facultad de Ciencias Sociales,  
Universidad Nacional del Centro (Provincia de Buenos Aires).

2. Cátedra de Geomorfología y Geología del Cuaternario,  
Facultad de Ciencias Sociales, Universidad Nacional del Centro  
(Provincia de Buenos Aires).

## 1. INTRODUCCIÓN

Los movimientos gravitacionales representan una parte importante de los procesos exógenos que intervienen en el modelado de la superficie terrestre en general y de las cuencas de drenaje en particular. Grandes cantidades de materiales son desplazadas por acción de la gravedad anualmente a lo largo de laderas de valles, para finalmente ser tomadas por cursos de agua y transportadas fuera de las cuencas hacia el mar. Tienen una activa participación en la evolución de los valles, desarrollo de pendientes y generación de formas de relieve. Estos procesos son responsables del desplazamiento de importantes cantidades de detritos de rocas hacia el pie de las pendientes (*Bloom 1991*). Además de su influencia como proceso destructivo, su desarrollo ha sido en ocasiones responsable, no sólo de grandes perjuicios a obras producidas por el hombre sino también a las personas. Aunque estos procesos se desarrollan de manera más espectacular en sectores con elevados potenciales morfogenéticos, su acción no es desconocida en regiones de relieve más exiguo (*Bertolini 1982*).

Las citas bibliográficas en la Provincia de Buenos Aires con respecto a procesos vinculados al desplazamiento gravitacional de materiales, son sumamente escasas e involucran movimientos de tipo deslizamiento y flujo. Entre otras; *Keidel (1916)* en el cordón serrano de Ventania, diferencia depósitos originados por estos procesos, los que fueron posteriormente interpretados por *Corte y Rodríguez (1971)* como correspondientes a lóbulos de soliflucción. *De Francesco (1992)* para el mismo ámbito caracteriza depósitos originados por movimientos gravitacionales no encauzados, de corto recorrido, similares a los flujos de tierra. Más recientemente, *Martínez (2001)* en el área de las Sierras de Balcarce en el cordón de Tandilia, diferencia distintos procesos de remoción en masa, tales como caídas, soliflucción, deslizamientos, flujos y reptación.

El objetivo del trabajo es la descripción, caracterización e interpretación de procesos de remoción en masa y rasgos asociados vinculados a deslizamientos, desarrollados en un sector (Localidad 1) de las Sierras Septentrionales de la Provincia de Buenos Aires (*Harrington 1956*) entre finales de agosto y comienzos de septiembre del año 2001. Dicho sector, se ubica hacia el extremo sur del Partido de Tandil, distante unos 40 km en línea recta al sur de la ciudad homónima, en terrenos pertenecientes a la Estancia Santa Rosa (Fig. 1). El área, presenta además de las generadas en el año 2001, un conjunto de antiguas geoformas producto de remoción en masa, desarrolladas en otros momentos de la evolución del paisaje.

A partir del análisis de fotografías aéreas del 18/08/81 se pudo establecer que las geoformas antiguas en la Localidad 1, son anteriores a dicha fecha y considerando además, los datos aportados por el propietario de la estancia mencionada, lomadas con aspecto de lóbulos ya estaban desarrolladas hacia 1950-1952.

Durante el desarrollo del trabajo se utilizaron los mapas topográficos del IGM, Tandil (3760) en escala 1:500.000 y Almacén La Numancia (3760-35-2) y Estancia La Pacífica (3760-29-4) confeccionados en escala 1:50.000. Para un análisis de mayor detalle se utilizaron las fotografías aéreas en escala 1:40.000 (C01-24 y C01-25, CFI) del 23/12/1988 y en escala 1:20.000 (C1075-22 y C1075-23, U27) del 18/08/1981. El relevamiento planialtimétrico de las escarpas originadas durante el año 2001 como asimismo los perfiles topográficos presentados fueron realizados con teodolito. La representación inicial de los datos de campo (cotas, distancias y ángulos) fue realizado con el software SDR MAP. Los datos de precipitaciones que se

presentaron fueron obtenidos con un pluviómetro propiedad de la Estancia Santa Rosa e instalado en terrenos pertenecientes a la misma, distante unos 2,5 km al noroeste del sector donde se produjeron los movimientos que consideramos. La información acerca de los movimientos del año 2001 y previos, fue suministrada a unos de los autores (VHA) en el mes de Mayo del año 2002 y los trabajos de campo fueron realizados durante los meses de Mayo, Julio y Septiembre del mismo año. El análisis e interpretación de los procesos generados se vinculan con geoformas desarrolladas en la Localidad 1, haciéndose solamente referencias a geoformas y procesos antiguos reconocidos en la Localidad 2 (Fig. 1).

## 2. GEOMORFOLOGÍA

Dentro del área en la cual se encuentra el sector considerado, predominan cerros de aspecto tabular, elongados, con cimas relativamente planas, los que conforman en ocasiones típicas mesas.

Dichos cerros, que se desarrollan en rocas sedimentarias clásticas, estratificadas horizontalmente, presentan en general hacia la parte superior frentes escarpados de unos 1-5 m de altura, con pendientes verticales o muy cercanas a ellas. Ladera abajo dan paso a pendientes dominadas por procesos de remoción en masa y escurrimiento superficial del agua.

Específicamente la Localidad 1 donde fueron reconocidas las evidencias geomórficas de los procesos gravitacionales que se consideran, forma parte de las cabeceras de una cuenca de drenaje de orden menor tributaria del Arroyo Quequén Chico, el que drena sus aguas hacia el Río Quequén Grande a través de la Pampa Interserrana (*Frenguelli 1950*). Los procesos erosivos actuando en las rocas clásticas mencionadas, han labrado una forma con aspecto de anfiteatro cuya parte cóncava mira hacia el oeste y además un conjunto de frentes escarpados ubicados en distintos niveles topográficos, los que continúan hacia abajo en taludes de distinta jerarquía. La altura relativa a partir de la base del nivel de los frentes escarpados topográficamente más bajos es de unos 58 metros. Desde allí y hasta unos 380-400 m pendiente abajo, se desarrolla el talud principal, que conforma una pendiente colectora de aguas (*Troeb 1965*), (Figs. 2 y 3). Las pendientes observadas a partir de los perfiles topográficos realizados (Fig. 4) a lo largo del talud, muestran en algunos de ellos (Perfil A-B) o en parte de ellos (Perfil C-B y Perfil C-D) y pendiente arriba de la escarpa originada en el año 2001, formas suavemente cóncavas a ligeramente rectas. La pendiente general obtenida a lo largo del Perfil A-B es de unos 12°, mientras que, determinada por sectores adquiere valores de 3,05° hacia la parte terminal y distal más baja, donde se desarrollan depósitos eólicos (loess), 11,6° en el sector medio y 16° para los últimos 75-80 m en la parte más elevada hasta los afloramientos cuarcíticos. A lo largo de la traza del Perfil C-B y pendiente arriba de la escarpa mencionada, el valor de la pendiente es de aproximadamente 12,5° mientras que en similar sector a lo largo del Perfil C-D es de unos 12°. No obstante, el carácter general señalado, hacia la mitad norte del anfiteatro, en las pendientes que miran al sur y suroeste y hacia la margen derecha de un curso colector de orden menor, en dos sectores diferenciados como Zona A y Zona B, se desarrollan a partir de unos 130 - 150 m de la base de los frentes escarpados topográficamente más bajos, lomadas y depresiones (algunas ocupadas por cuerpos de agua) que modifican las características de la pendiente tanto en forma como en gradiente (Figs. 2, 3 y 4).

FIGURA 1. MAPA DE UBICACIÓN

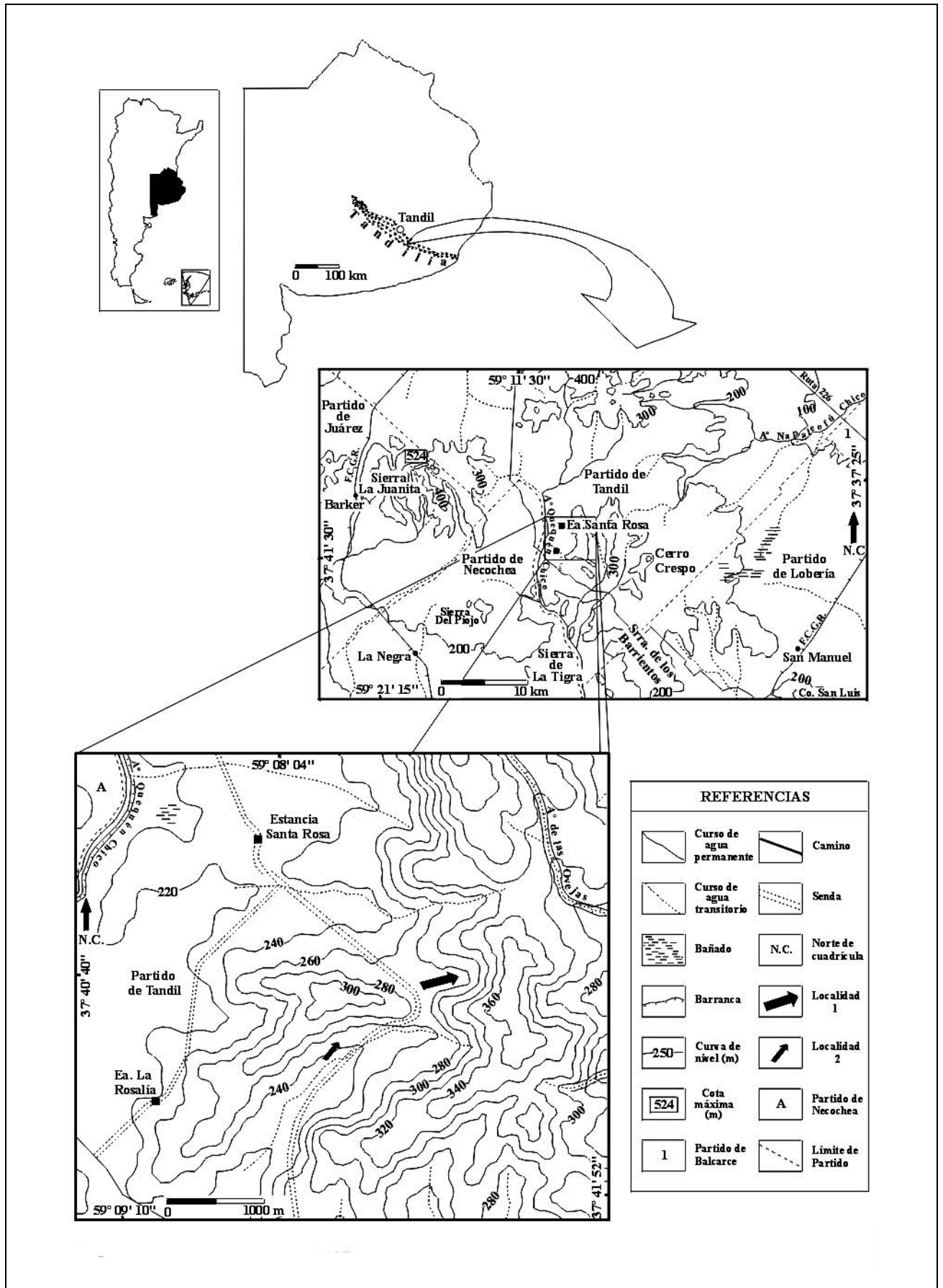
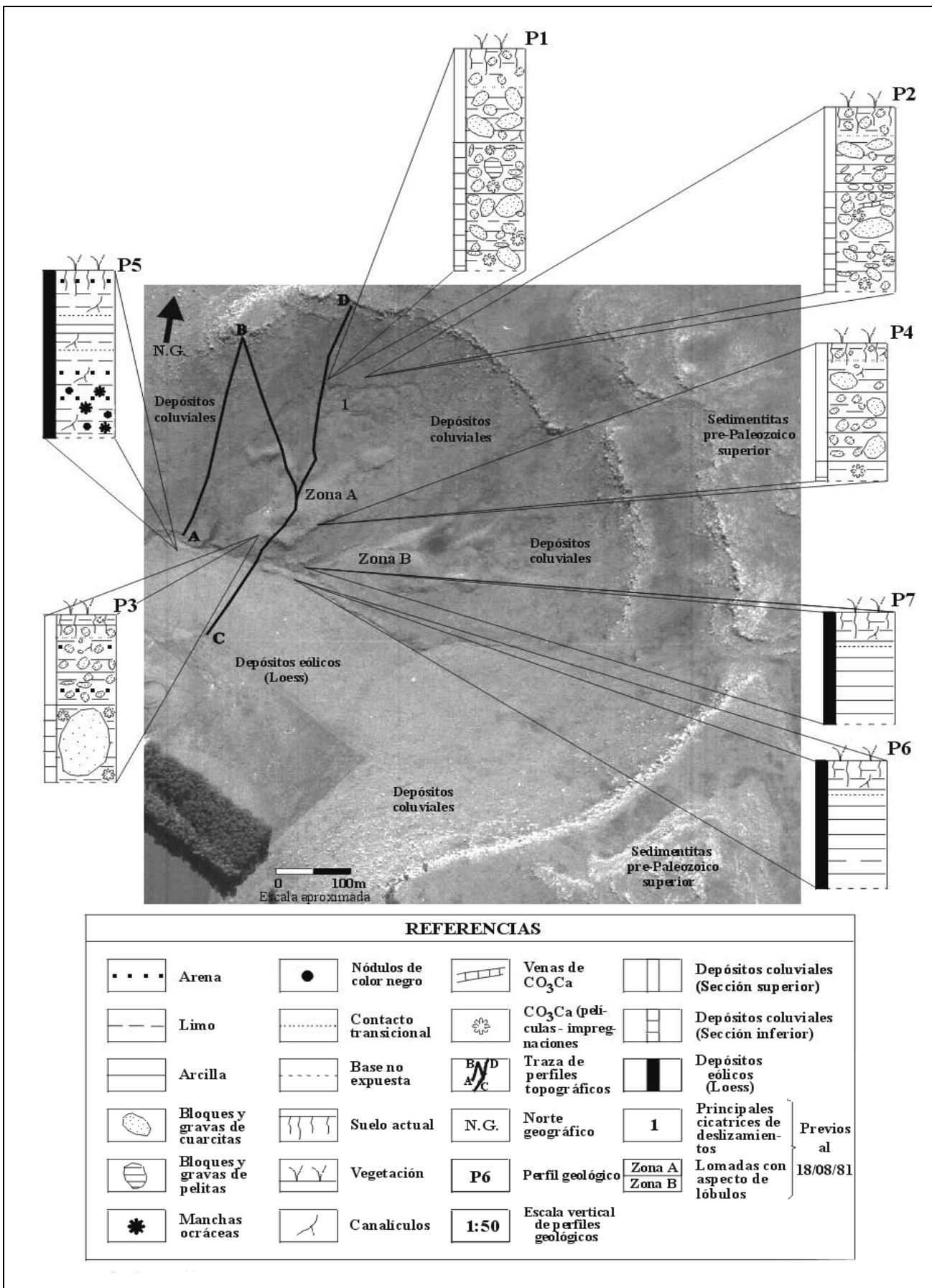
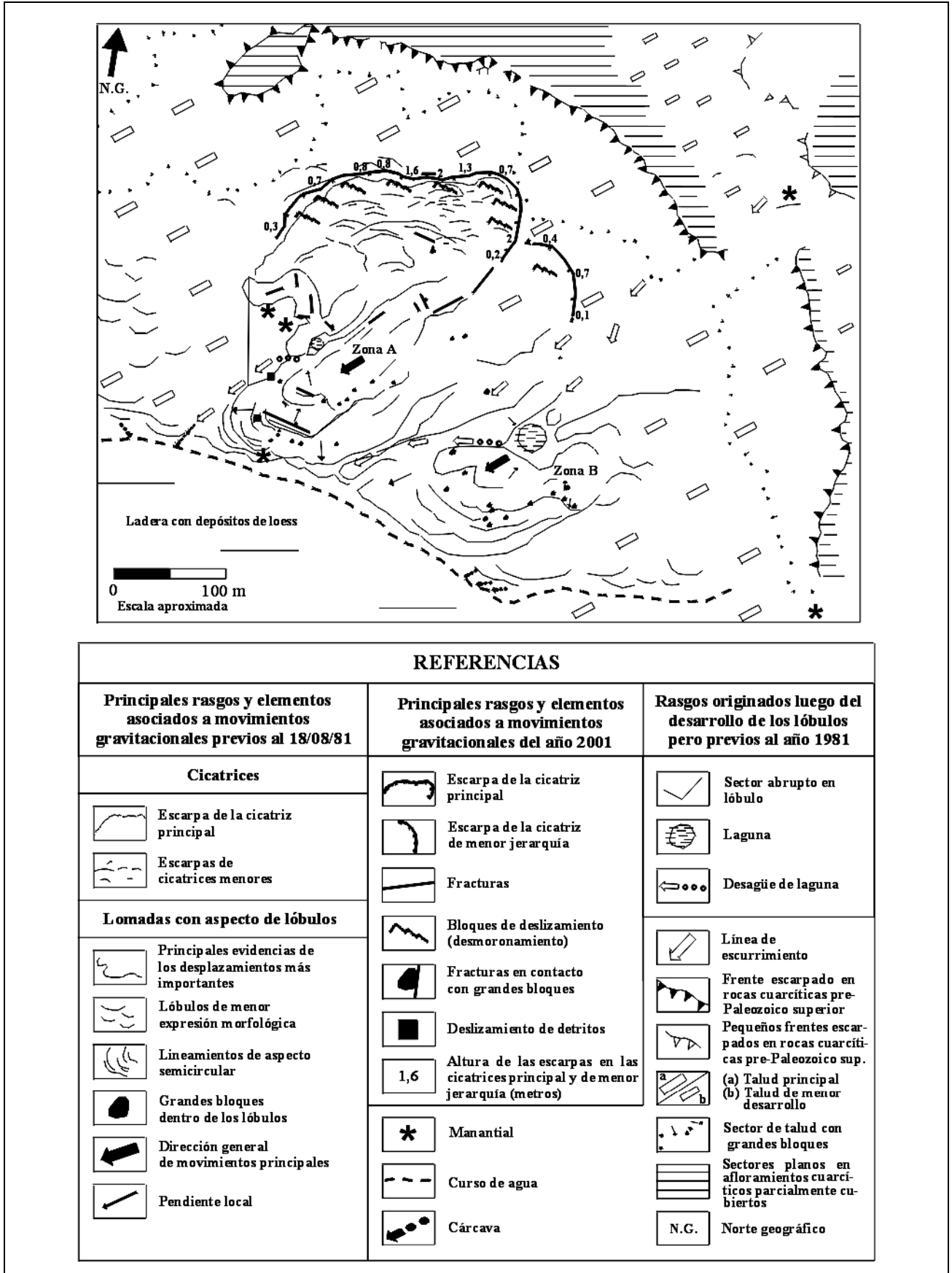


FIGURA 2. LOCALIDAD 1. LA IMAGEN CORRESPONDE A UNA FOTOGRAFÍA AÉREA DEL 18/08/81





**FIGURA 3. PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS MORFOLÓGICAS DE LA LOCALIDAD 1**  
(mapeadas sobre fotografía aérea de 18/08/81)



Los manantiales son comunes en distintos sectores, principalmente vinculados con los depósitos coluviales que se desarrollan en los taludes, generándose a partir de algunos de ellos líneas de escurrimiento, las que se caracterizan por la presencia de grandes clastos fundamentalmente de cuarcitas, prácticamente sin materiales finos. Hacia la parte media y más deprimida del anfiteatro el escurrimiento superficial del agua ha elaborado un cauce al pie de la pendiente, que representa el principal colector del sector que consideramos (Fig. 3). Este curso que se desarrolla a través de depósitos coluviales en su parte proximal, presenta barrancas de unos 2-3 m de potencia hacia la parte media y distal, labradas preferentemente en depósitos de la Formación Las Animas (*Rabassa 1973*).

### 3. GEOLOGÍA

La geología superficial del sector representado en la Fig. 2 puede ser agrupada en dos secuencias claramente diferenciables: 1. Cubierta Sedimentaria pre - Paleozoico superior y 2. Cobertura Sedimentaria del Cenozoico superior.

La primera está integrada por una sucesión preferentemente cuarcítica, con niveles pelíticos intercalados mientras que la restante está constituida por depósitos coluviales, eólicos, en ocasiones con presencia de un suelo enterrado y acumulaciones originadas por escurrimiento superficial del agua.

Los depósitos coluviales, se ubican en los taludes que se desarrollan a partir del pie de los frentes escarpados elaborados en la secuencia sedimentaria pre - Paleozoico superior. En el talud donde se identificaron las evidencias geomórficas de los movimientos que se consideran y además de antiguos procesos de remoción en masa, los depósitos coluviales que lo integran son los de mayor desarrollo. Estos, que se han generado como consecuencia de la acción de procesos de meteorización, erosión y movimiento gravitacional de materiales, principalmente de rocas cuarcíticas, conjuntamente con el aporte de sedimentos eólicos (loess), se extienden a través de unos 380-400 m a lo largo del citado talud.

Los perfiles geológicos P1 y P2 (Fig. 2) realizados en la escarpa de la cicatriz principal originada como consecuencia de los movimientos del año 2001, permitieron diferenciar una secuencia de unos 2 m de espesor sin base expuesta en la cual pudieron ser reconocidas dos secciones. Una inferior, que alcanzó en algunos perfiles una potencia de unos 1,15 m, integrada por clastos autóctonos mayoritariamente de cuarcitas y escasísimas pelitas, cuyas dimensiones pueden alcanzar los 0,50 m de eje mayor, aunque en las partes más elevadas del talud, en las cercanías de los afloramientos cuarcíticos algunos presentan unos 3 m de eje mayor. La matriz es de granometría limo arcilloso, incrementándose localmente, en algunos sectores el contenido de la fracción arcilla. Todo el depósito presenta manifestaciones de carbonato de calcio, lo que le otorga un color castaño amarillento a blanquecino. La sección superior, presentó en todos los casos un menor espesor, del orden de los 0,85 m. La granometría está representada en la base por sedimentos arcillo limosos a limos arcillosos de carácter plástico, que constituyen un Hz B de suelo y gradan hacia arriba a un Hz A de suelo integrado por sedimentos limosos color castaño negruzco. Ambos tipos de sedimentos representan además la matriz dentro de la cual se diferencian clastos autóctonos con similares dimensiones y tipos litológicos a los mencionados previamente. Secuencias similares a las descritas fueron diferenciadas en los frentes (P3) y costados (P4) de las antiguas lomadas generadas por procesos de remoción en masa antes citadas (Fig. 2).

Las acumulaciones eólicas, de amplia distribución en el área hacia las partes distales bajas más allá de los coluvios, cubren en el sector considerado, una parte de la ladera opuesta ubicada en el margen izquierda del colector principal y una angosta faja en algunos lugares a lo largo de la margen derecha del mismo, gradando e intercalándose con los detritos autóctonos que integran el cuerpo principal de los depósitos coluviales. Del mismo modo se desarrollan en algunos sectores planos en las cimas de los cerros cuarcíticos aunque con mucho menor desarrollo. Están representadas por depósitos de loess, agrupados en el área como Formación Las Animas (*Rabassa 1973*) e integrados (P5, P6, P7; Fig. 2) por limos arenosos y arenas limosas con arcilla subordinada. Inmersos en la masa, suelen diferenciarse clastos psefíticos (gravas a bloques) preferentemente correspondientes a la secuencia cuarcítica. La unidad es homogénea de color castaño amarillento - anaranjado constituyendo el material a partir del cual se desarrollan los principales suelos del área. En distintos lugares en las cercanías, aunque ya fuera del sector aquí considerado se diferenciaron suelos erosionados y enterrados por depósitos de loess más recientes.

El escurrimiento superficial del agua en manto ha generado acumulaciones de materiales en distintos sectores de la ladera opuesta, sepultando en parte un suelo que se ha desarrollado en la Formación Las Animas. Escasos depósitos fluviales se diferencian en el cauce del colector principal que se desarrolla al pie de la pendiente. En el lecho del curso, se integran por clastos de cuarcitas, casi exclusivamente psefitas cuyas dimensiones oscilan entre unos 5-8 mm a 0,50 m de eje mayor, angulosos a subangulosos, movilizados de los coluvios adyacentes. En algunos bancos se han depositado además, limos y arenas con clastos inmersos en la masa.

### 4. PRINCIPALES RASGOS GENERADOS POR LOS MOVIMIENTOS DEL AÑO 2001

Las observaciones realizadas en la Localidad 1, durante los meses de Mayo, Julio y Septiembre del año 2002, permitieron el reconocimiento de un conjunto de rasgos asociados a movimientos gravitacionales. Los más notorios, están representados en la zona proximal por una escarpa principal y otra de jerarquía menor, bloques deslizados y fracturas de variadas dimensiones, las que se vinculan en ocasiones con grandes bloques. Distalmente se diferencian, además, fracturas de características similares a las mencionadas y deslizamiento de detritos.

Las escarpas, que representan las cicatrices generadas como consecuencia de las fracturas y desplazamientos de los materiales se ubican hacia el norte y noreste, en el sector de cabeceras. La principal (Figs. 3, 4, 5, 6, 7) es la más importante de las geoformas desarrolladas y presenta un aspecto general cóncavo hacia el suroeste, acompañando en parte la forma, también cóncava del relieve originado a partir de la cubierta sedimentaria de edad pre-Paleozoico superior. No obstante, una observación más detallada permite diferenciar que el aspecto cóncavo general se resuelve en parte mediante la integración de sectores cóncavos parciales. Se ubica topográficamente por arriba de otra escarpa principal originada previamente al 18/08/81, a distancias variables comprendidas entre unos 5 a 15-20 m siendo la menor distancia que la separa del frente serrano de unos 83 metros. Presenta una longitud total de unos 285 m y se resuelve a partir del extremo oeste, a través de unos 59 m con una dirección aproximada NE-SO, alrededor de 165 m E-O y los restantes 61 m con dirección NNE-SSO. Sus mayores alturas fueron identificadas hacia los sectores central y este, donde alcanza en algunos lugares unos 2 m, estas alturas van disminuyendo hacia ambos

FIGURA 4. PERFILES TOPOGRÁFICOS

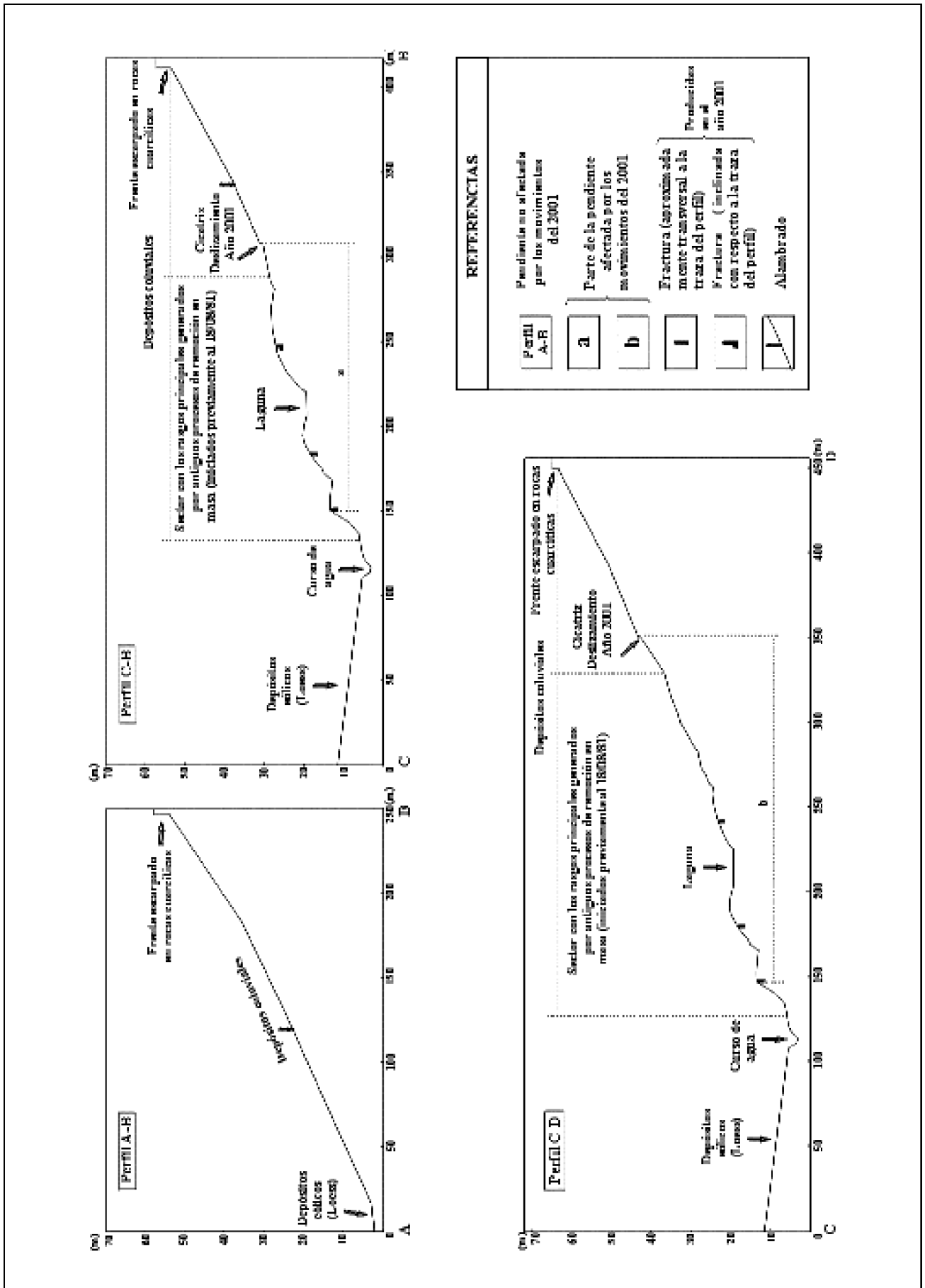


FIGURA 5. PARTE DEL SECTOR AFECTADO POR LOS MOVIMIENTOS DEL AÑO 2001

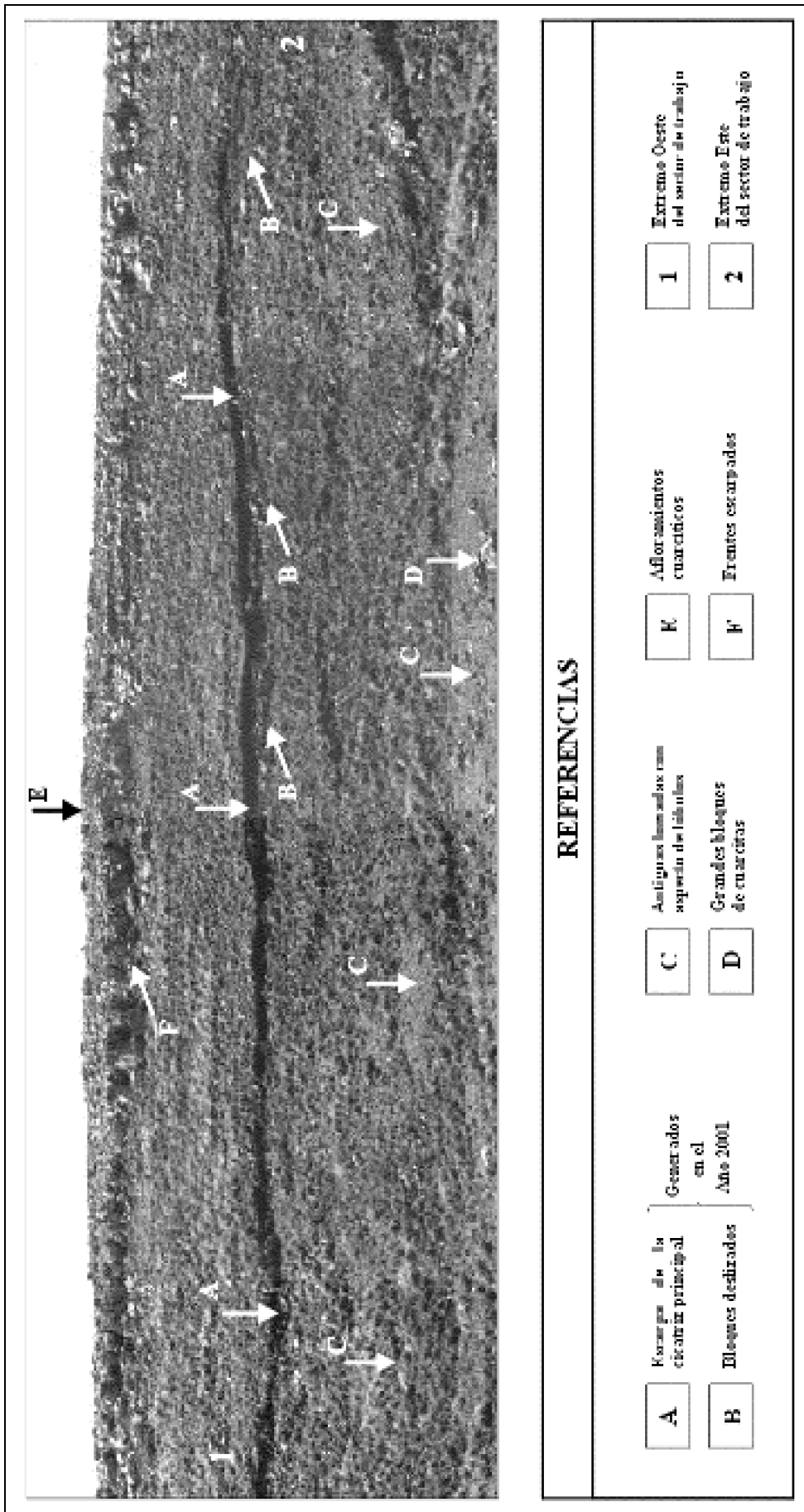




FIGURA 6. (A) ESCARPA DE LA CICATRIZ PRINCIPAL.

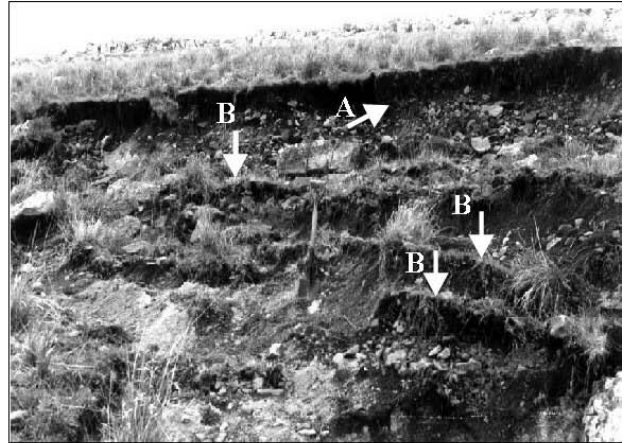


FIGURA 7. DESMORONAMIENTO. (A) ESCARPA DE LA CICATRIZ PRINCIPAL. (B) BLOQUES DESLIZADOS CON PENDIENTES INVERTIDAS.

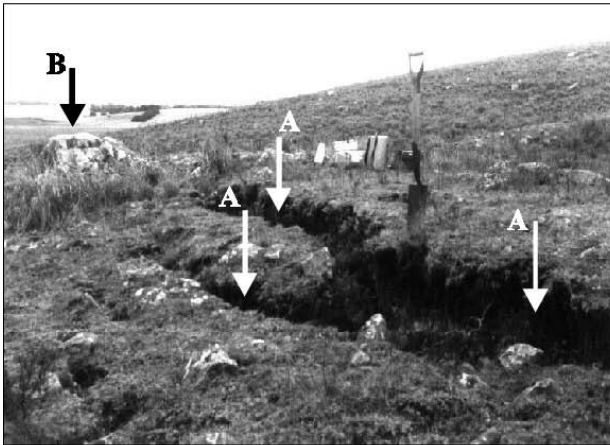


FIGURA 8. (A) FRACTURAS. (B) BLOQUE DE CUARCITA, UN DETALLE DE LAS FRACTURAS QUE LO AFECTAN SE MUESTRA EN LA FIGURA 10.

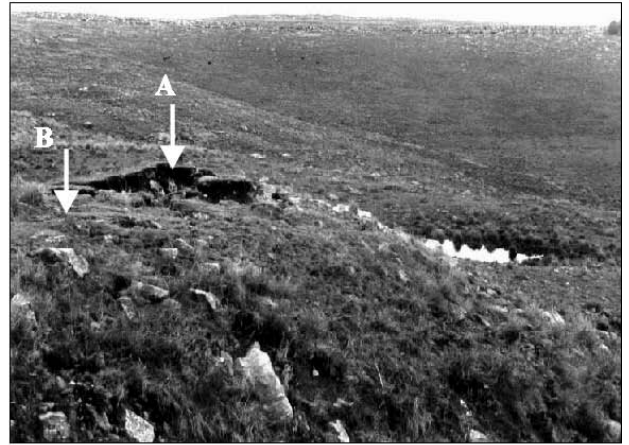


FIGURA 9. (A) FRACTURA SOBRE UNA LOMADA CON ASPECTO DE LÓBULO (B) GENERADA EN EL PASADO POR PROCESOS DE REMOCIÓN DE MASA.

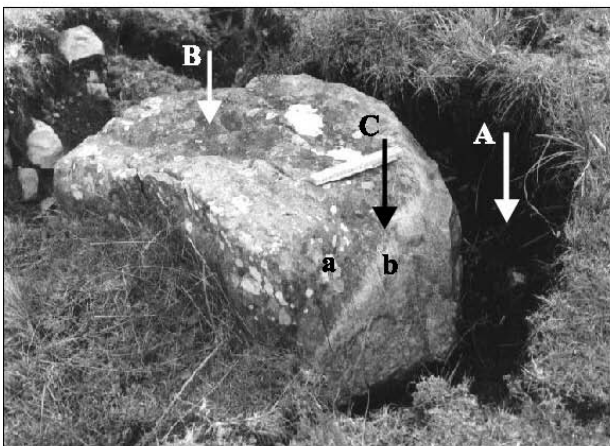


FIGURA 10. (A) FRACTURA EN CONTACTO CON UN GRAN BLOQUE DE CUARCITA (B). (C) LÍMITE ENTRE LAS PARTES QUE ESTUVIERON POR ARRIBA (a) Y POR DEBAJO (b) DE LA SUPERFICIE, PREVIO A LOS MOVIMIENTOS DEL AÑO 2001.

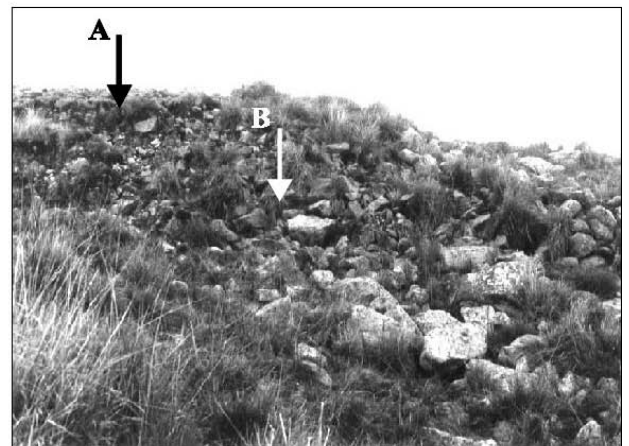


FIGURA 11. DESLIZAMIENTO DE DETRITOS. (A) CICATRIZ EN EL SECTOR A PARTIR DEL CUAL SE PRODUJO EL MOVIMIENTO. (B) MATERIALES DESPLAZADOS.

extremos hasta perderse paulatinamente en el terreno adyacente. Las pendientes son cercanas a la vertical, de  $75^\circ$  a mayores, en general recta y en ocasiones escasamente cóncava hacia arriba. Es un rasgo sumamente visible no solo por el quiebre de pendiente con el relieve circundante, sino además por la ausencia de vegetación que contrasta con la desarrollada en el resto del sector.

Una escarpa de menor desarrollo se ubica a unos 15 m al este de la principal aunque sin conectarse con ella y a 110 m aproximadamente como mínimo, del frente serrano. Su aspecto general es cóncavo hacia el suroeste y al igual que la anterior se integra por semiarcos parciales. Presenta unos 80 m de longitud, resolviéndose a partir del oeste y a través de unos 17 m con dirección E-O, 36 m NO-SE y unos 27 m con dirección N-S. La mayor altura, de unos 0,7 m fue registrada hacia el sector central, disminuyendo hacia los extremos para perderse en el terreno circundante.

En distintos sectores a lo largo de la escarpa principal, se diferencian a partir de la base de la misma y hasta unos 15 a 20 m aproximadamente como máximo, bloques deslizados (Figs. 5, 7), aproximadamente paralelos a subparalelos entre sí y a la escarpa principal. Estos presentan dimensiones de unos 2 a 8 m de largo por 0,50 a 0,70 m de alto y 0,50 a 1,50 m de ancho, en muchas ocasiones con la parte superior o tope inclinado hacia la escarpa citada (Fig. 7) y en dirección opuesta a la pendiente general en ese sector específico, o bien con una pendiente menor a la del terreno no afectado por estos movimientos.

Un conjunto de fracturas o grietas (Figs. 8, 9, 10) fueron diferenciadas en distintos sectores del área que consideramos, reconociéndose algunas (Fig. 8) a unos 280-290 m a partir de la escarpa principal de cabeceras. Sus dimensiones oscilan entre unos 0,10 m a 1 m de ancho y longitudes de hasta 30 m con aberturas visibles hasta unos 2 m a partir de la superficie y presentan direcciones aproximadas NE-SO, NO-SE y algunas N-S. Se desarrollan en ocasiones en las cercanías de la escarpa principal como en la de menor jerarquía generadas durante Agosto-Septiembre del 2001. Allí, ambas escarpas se continúan en sus extremos con fracturas de variadas dimensiones. En pocos sectores y pendiente arriba de la escarpa principal se reconocieron algunas fracturas aunque a escasos metros de la misma. Otras veces los bloques deslizados se continúan pendiente abajo con fracturas paralelas a subparalelas entre sí y a la escarpa principal. En otras oportunidades afectan lomadas con aspecto de lóbulos generados por movimientos gravitacionales producidos en otros momentos de la evolución del paisaje. En este último caso se ubican con preferencia en la parte terminal (Figs. 8, 9) o hacia los costados de las mismas, en las cercanías de pendientes pronunciadas. Es una característica bastante frecuente, el desarrollo de fracturas que afectan en parte de su recorrido a grandes clastos de rocas cuarcíticas (Fig. 10).

En algunos lugares se produjo deslizamiento de detritos (Fig. 11), preferentemente en las cercanías de los límites de las lomadas mencionadas. Presentan una escarpa en la cabeceras y un desplazamiento de clastos de dimensiones variadas a lo largo de unos 10 m a partir de la escarpa. El reconocimiento de estos movimientos se ve además facilitado por la presencia en los clastos movilizados de dos zonas con límites muy marcados, producto de cortezas superficiales muy contrastantes, una con desarrollo de colonias de líquenes, que evidencia la parte del clasto que estuvo sobre la superficie y otra carente de estas colonias, correspondiente a la parte que estuvo por debajo. Esta situación también se observa en el contacto entre fracturas y grandes clastos (Fig. 10).

## 5. EVIDENCIAS DE ANTIGUOS MOVIMIENTOS GRAVITACIONALES

En la Localidad 1, como fuera mencionado oportunamente, se diferencian otros rasgos producto de procesos de remoción en masa generados en el pasado, representados por lomadas con aspecto de lóbulos no tratadas en este trabajo y un conjunto de cicatrices de variado desarrollo. Estas formas, fueron generadas previamente al 18/08/81 de acuerdo a las fotografías aéreas de esa fecha y en el caso de las lomadas con aspecto de lóbulos considerando los datos aportados por el propietario del establecimiento Santa Rosa, ya estaban presentes hacia 1950-1952.

Como se observa en la Fig. 2, hacia las partes superiores del talud en esta localidad, específicamente al norte y noroeste de la Zona A, se visualiza una cicatriz principal (evidencia de antiguos deslizamientos) que presenta un desarrollo en términos generales similar a la cicatriz principal producida en el año 2001. No obstante, aquella presenta un mayor desarrollo que esta hacia el extremo oeste y por el contrario uno menor hacia el este (Fig. 3). Está integrada por la unión de arcos cóncavos hacia las menores alturas, los que originan un arco mayor general cóncavo hacia el sur y suroeste, acompañando en parte el rasgo, de similar aspecto originado a partir de la cubierta sedimentaria de edad pre - Paleozoico superior y de la escarpa del año 2001.

La menor distancia que la separa del nivel de frentes escarpados topográficamente más bajos es de alrededor de 90 m, desarrollándose a lo largo de unos 272 m, para perderse en el terreno circundante. El mapeo de la escarpa de la cicatriz principal desarrollada en el año 2001 sobre las fotografías aéreas de 18/08/81, permitió establecer que se ubica a unos 5 a 15-20 m de distancia, pendiente arriba de la antigua cicatriz principal generada previamente a la fecha mencionada.

Las cicatrices menores se diferencian mayoritariamente entre la cicatriz principal y el inicio de las lomadas con aspecto de lóbulos en la Zona A y en mucha menor proporción pendiente arriba de la cicatriz principal y también vinculadas a taludes de menor desarrollo ubicados por sobre los frentes escarpados topográficamente más bajos desarrollados a partir de las rocas de la Cubierta sedimentaria de edad pre - Paleozoico superior (Fig. 3). Al igual que la principal presentan aspecto cóncavo en dirección a las menores alturas y longitudes comprendidas entre unos 15 a 80 m en términos generales.

El desarrollo de deslizamientos en el área considerada, no es exclusivo de la Localidad 1. A partir de las observaciones realizadas en la fotografía 1974-81 del 18/08/81, fueron diferenciadas formas similares a las aquí descritas en la Localidad 2, a unos 1000 m al suroeste de la Localidad 1 (Fig. 1), fuera del área representada en la Fig. 2. Allí, las evidencias están representadas por una escarpa de cicatriz principal de aspecto cóncavo hacia el sur, de unos 45 m de largo y unos 1,20 m de alto. El movimiento se resuelve hacia las menores alturas con forma de un lóbulo ensanchado fuera del área de la escarpa por unos 27 metros, que podría corresponderse con un movimiento de tipo flujo. Una menor expresión topográfica y la presencia de vegetación en todo su desarrollo dificulta en parte su reconocimiento en el terreno a diferencia de las desarrolladas en la Localidad 1. De acuerdo a la información suministrada por el propietario de la Estancia Santa Rosa, fue colocado un alambrado sobre el lóbulo ensanchado hacia 1946/1950 indicando de esta manera que los procesos generadores son previos a dicha fecha.

## 6. DISCUSIÓN E INTERPRETACIÓN

*Sharpe (1932)* reconoce un conjunto de procesos de remoción en masa, a los que agrupa, de acuerdo al tipo de movimiento en dos categorías: flujos y deslizamientos. Los deslizamientos se producen cuando el material se mantiene bastante coherente y se mueve a lo largo de una superficie bien definida (*Tarbutck y Lutgens 1999*). Dentro de los deslizamientos, el slump (*Bloom 1991*), desmoronamiento (*Thornbury 1960*) o desplome (*Tarbutck y Lutgens 1999*) involucra, típicamente una rotación hacia atrás de la masa o masas en cuestión, como resultado de la cual la superficie de la masa desmoronada muestra a menudo un declive inverso (*Thornbury 1960*). La superficie a través de la cual se produce el movimiento ubicada por debajo de un bloque desplomado tiene forma o aspecto de cuchara cóncava hacia arriba o hacia afuera (*Bloom 1991*). Con frecuencia el desmoronamiento se produce como varias unidades pequeñas e independientes; el resultado es que la superficie de la masa desmoronada tiene una cantidad de terracitas similares a escalones (*Thornbury 1960*). Además y como consecuencia de la rotación hacia atrás de las masas involucradas, estos movimientos han sido referidos como deslizamientos rotacionales (*Savage 1968; Pereyra y González Díaz, 1993; Espizua et al, 1993; Lapido y Pereyra 1999; Escosteguy et al, 2000*).

El desarrollo de escarpas con aspecto de luna creciente, cóncavas hacia las menores alturas en sectores de cabeceras de movimientos gravitacionales, asociada además a la presencia de bloques deslizados, cuyas partes superiores se presentan inclinadas hacia la escarpa principal de cabeceras, caracteriza deslizamientos de tipo slump (*Savage 1968*). Dichas escarpas, que representan las muescas de "arranque" (*Pereyra y González Díaz, 1993*), cicatrices de arranque (*Marín, 2001*) o zonas de arranque (*Escosteguy et al, 2000*) son uno de los rasgos más notorios en el sector que consideramos.

Las fracturas o grietas, que acompañan a estos movimientos son comunes en procesos de este tipo y han sido señaladas por distintos autores (*Prez et al. 1995; Hirtz y Blachakis 2000*). En nuestro caso en particular en ocasiones se presentan escalonadas, las que han sido referidas a slumps (*Savage 1968*). En ocasiones, afectan formas relictuales representadas por lóbulos o lenguas generadas por antiguos procesos de remoción en masa.

Existe un consenso general respecto a que un conjunto de factores actúa favorablemente para la producción de procesos de remoción en masa, como consecuencia de la generación de condiciones que posibilitan superar el umbral de estabilidad de los materiales constituyentes de las pendientes. Estos agrupan características geológicas - geomorfológicas (factores internos) propias de un área a las que se suman, entre otras; precipitaciones, vibraciones del suelo debido a terremotos y actividad antrópica (factores externos). La presencia del agua provocando por un lado una carga adicional sobre los depósitos y por otro aumentando las presiones generadas por los flujos de agua subterránea tiene gran influencia en la inestabilidad de las pendientes y los procesos de remoción en masa (*Bloom 1991*). En el sector de estudio parte de esta agua puede aflorar superficialmente constituyendo manantiales, los que se visualizan en distintas posiciones del talud, vinculados con los depósitos coluviales.

El sector considerado en la Localidad 1 presenta un conjunto de características geológico-geomorfológicas que bajo determinadas condiciones facilitarían el desarrollo de movimientos gravitacionales. A estas, propias del sector se le sumarían factores externos vinculados a precipitaciones inusuales. Algunos de

estos factores actúan posibilitando la disponibilidad de agua en el sector y otros están relacionados con la baja calidad de los materiales originales. No obstante, en conjunto favorecen la inestabilidad de las pendientes en el área que tratamos.

La estructura de los depósitos preferentemente cuarcíticos que afloran en las zonas de cabeceras más elevadas se caracteriza por secuencias preferentemente horizontales, con un desarrollo importante de diaclasas. El agua producto de las precipitaciones puede circular a través de estas estructuras y parte de ella, pasar a los depósitos coluviales ubicados en posiciones topográficas más bajas.

Los depósitos coluviales se presentan prácticamente inconsolidados y están integrados por materiales gruesos (bloques, gravas), de naturaleza autóctona, integrados mayoritariamente por clastos de cuarcitas y por sedimentos granométricamente finos (arenas muy finas, limos) de origen alóctono, constituidos por loess. Una fracción fina, producto de meteorización, completa los principales componentes de los materiales coluviales.

Las pendientes en la Localidad 1 son, en cuanto a su forma, típicamente concentradoras de agua (*Troeb 1965*) lo que favorece una mayor disponibilidad de agua respecto a otros tipos. Los valores determinados a lo largo de las trazas de los perfiles topográficos C-B y C-D pendiente arriba de la escarpa de la cicatriz principal generada durante el año 2001 son de 12,5° y 12° respectivamente. Al respecto, los deslizamientos rotacionales (slumps) pueden tener lugar con pendientes empinadas como suaves (6-8°) (*Simonett 1968*).

Al pie de la pendiente afectada por los movimientos, hacia las partes distales bajas del talud se desarrolla un curso de orden menor que actúa como colector de las aguas de escurrimiento (Fig. 3). La erosión que ha provocado en depósitos preferentemente eólicos (loess), con el desarrollo de barrancas en sectores de unos 2-3 m de potencia, actúa como un factor desestabilizante de los depósitos que se desarrollan pendiente arriba.

Para los deslizamientos generados en el año 2001, las precipitaciones podrían haber actuado como mecanismo disparador de los procesos. Al respecto, los datos de las lluvias obtenidos en la Estancia Santa Rosa, señalan un incremento en los valores anuales, para los últimos años (Tabla 1). Así, el registro para el año 1999 fue de 823 mm, para el 2000 de 956 mm y de 1220 mm para el año 2001, mientras que, las lluvias acumuladas hasta el 30/11/02 alcanzaron los 1276 mm, ya mayores a las registradas en el año 2001, sin contar las probables precipitaciones del mes de Diciembre.

Asimismo, el análisis de las lluvias ocurridas en el mes de Agosto del año 2001 indica valores muy importantes (159 mm) comparados con los del año 2000 (42 mm) y 1999 (51 mm). La media de estos dos últimos años es de 46,5 mm, los que, comparados con los del mismo mes para el año 2001 indican que estos últimos, representan un incremento en un factor de 3,4 en las lluvias precipitadas para el área considerada. Este último factor, vuelve a aumentar hasta un valor de 3,9 si comparamos el registro de 159 mm con la media del mes de Agosto para un registro de 28 años (período 1972/1999) que fue de 41 mm de acuerdo al registro de la Estancia Santa Rosa. El valor de 159 mm discriminado (Tabla 2) muestra que en nueve días (18 al 26) las precipitaciones alcanzaron 106 milímetros. No obstante, en los taludes que se desarrollan al pie de los frentes escarpados de cerros inmediatamente adyacentes a la Localidad 1, no se registraron deslizamientos. Esto estaría indicando que probablemente,

factores internos geológico-geomorfológicos en esos sectores generaron una distinta respuesta a las precipitaciones.

Por su parte, las precipitaciones correspondientes al mes de Agosto del año 2002 (Tabla 3) fueron de 150 mm, ligeramente menores a las del mismo mes registradas en el año 2001, aunque alcanzaron el día 18 los 121 mm, mayores a los 106 mm de Agosto del 2001 precipitados en nueve días. Con todo la respuesta de los taludes en los sectores que consideramos, a aquellas precipitaciones, no provocó deslizamientos.

Un deslizamiento similar al aquí analizado, generado en el mes de Abril de 1998, en la vertiente este de la Sierra La Brava (Martínez 2001) fue vinculado con precipitaciones excepcionales, las que alcanzaron en el día 13 de dicho mes para la Estación Balcarce, 138 mm (Martínez 2001). Allí, las características de los depósitos coluviales son en general similares a los que se desarrollan en el sector por nosotros estudiado. No obstante, los valores de pendiente son del orden de los 32° (Martínez 2001), ostensiblemente mayores a los obtenidos (12,5° y 12°) pendiente arriba de la escarpa de la cicatriz principal originada en el año 2001 en el sector aquí estudiado y además, se requirieron precipitaciones del orden de los 138 mm en un día (Martínez, 2001), mientras que en la Localidad 1 alcanzaron 106 mm en nueve días. En esta localidad, los menores valores de pendiente pudieron haber minimizado el escurrimiento superficial favoreciéndose la infiltración y de esta manera la adición de agua al subsuelo habría desestabilizado las pendientes por adición de peso al material que la compone, incrementando la presión de fluidos y reduciendo la fricción entre los granos, favoreciéndose los movimientos, con valores menores de precipitación.

La escarpa principal desarrollada durante finales de Agosto y comienzos de Septiembre del año 2001, se ubica a una distancia variable en general de unos 5 a 15-20 m pendiente arriba de otra escarpa principal correspondiente a una antigua cicatriz, detectada a partir de fotografías aéreas del 18/08/81 (Fig. 3). El desarrollo de los bloques deslizados, alcanza distancias similares a partir del pie de la escarpa, lo que es coincidente con la

distancia entre la escarpa principal desarrollada previamente el 18/08/81 y la posición de la escarpa generada en el año 2001 (Fig. 3).

En el sector de estudio, la Zona A, ha resultado la más propicia para los movimientos gravitacionales de tipo deslizamiento, los que fueron activos en momentos previos a 1981 y reactivados durante el año 2001. Las escarpas de cicatrices menores, que se desarrollaron topográficamente por debajo de escarpa principal (aquellas y esta, previas al año 1981), no fueron detectadas durante los trabajos de campo del año 2001, indicando la dinámica de los procesos destructivos que modificaron las características de las pendientes, específicamente en dicho sector, durante el transcurso de, al menos los últimos 21 años.

Las fracturas, aisladas o vinculadas a bloques deslizados y la escarpa de la cicatriz principal originados durante los procesos del año 2001, constituyen elementos potencialmente favorables para la generación de nuevos movimientos en el futuro. Las fracturas en su conjunto representan sectores de debilidad estructural y además facilitan la entrada y acumulación de agua en el subsuelo cercano, generando cargas adicionales a los materiales del talud. Adicionalmente, el agua a través de las fracturas puede fluir con turbulencia, provocando erosión y ampliación de ellas y otros macroporos presentes en los depósitos coluviales, facilitando de esta manera la circulación y además la acumulación de agua generando desestabilidad y sobrecarga. La escarpa de la cicatriz principal, ha modificado las características de la pendiente del talud, provocando un sobreempinamiento o exceso de pendiente, constituyéndose en un elemento de inestabilidad que la convierte en un sector de importancia, al menos localmente, para el desarrollo de procesos de remoción en masa.

Los deslizamientos producidos durante el año 2001 en la Localidad 1 y las evidencias registradas en esta misma localidad y la Localidad 2 de otros deslizamientos ocurridos en el pasado indican que estos procesos han funcionado, y además son activos en el modelado del paisaje en el área considerada. Estos, sumados a las evidencias de cicatrices de deslizamientos

**TABLA 1. PRECIPITACIONES REGISTRADAS EN LA ESTANCIA SANTA ROSA**

Año	Meses												Anual
	Enero	Febr.	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Sept.	Octub.	Nov.	Dic.	
1999	78	12	170	24	99,5	19	119	51	73	63	38,5	76	823
2000	73	173	194	92	24,5	43	17	42	80	123	52	43	956
2001	131	111	150	68	67	53	17	159	62	152	172	78	1220
2002	72	155	140	70	192	13	39	150	88	208	144	—	—

**TABLA 2. DÍAS CON PRECIPITACIONES EN EL MES DE AGOSTO DEL AÑO 2001 EN LA ESTANCIA SANTA ROSA**

Mes	Agosto 2001							Mensual
	Día	6	12	18	26	30	31	
Lluvia (mm)	31	7	59	47	8	7	159	
			106					

**TABLA 3. DÍAS CON PRECIPITACIONES EN EL MES DE AGOSTO DEL AÑO 2002 EN LA ESTANCIA SANTA ROSA**

Mes	Agosto 2002							Mensual
	Día	8	18	28	29	30	31	
Lluvia (mm)	1	121	19	3	4	2	150	



antiguas reconocidas en la vertiente sur de la Sierra del Volcán (Martínez, 2001), como, asimismo, evidencias de un deslizamiento en la vertiente este de la Sierra de La Brava, probablemente producido durante el año 1994 (Martínez, 2001), el que fuera reactivado durante el mes de abril de 1998, señalan para el conjunto de zonas mencionadas una actividad pasada y reciente de procesos de deslizamiento, aunque de acuerdo a los escasos datos que disponemos, con distinta recurrencia en ambas zonas.

## 7. CONCLUSIONES

El proceso más importante desarrollado hacia finales de agosto y comienzos de Septiembre del año 2001, en la Localidad 1, correspondió a un movimiento gravitacional de tipo deslizamiento, específicamente desmoronamiento. Los rasgos resultantes están representados por una escarpa principal, bloques deslizados algunos con pendientes opuestas a la primitiva previa al desplazamiento de los materiales y fracturas en distintos sectores del talud. Como consecuencia de estos movimientos se generó además otra escarpa de menor jerarquía y deslizamientos de detritos de escasa magnitud.

Considerando las caracterizaciones e interpretaciones realizadas, el sector presenta características geológicas-geomorfológicas que bajo determinadas condiciones lo hacen propenso al desplazamiento gravitacional de materiales. Depósitos prácticamente inconsolidados y forma de las pendientes del talud, sumados a la presencia de un curso de agua en la base de la pendiente son elementos que, considerados en conjunto representan factores intrínsecos potencialmente favorables para el desarrollo de estos procesos.

Con respecto a los deslizamientos y rasgos asociados en el año 2001, los elevados e inusuales valores de precipitaciones (159 mm) correspondientes al mes de agosto de aquel año, de los cuales 106 mm se produjeron entre el 18 y el 26 de dicho mes, habrían actuado como un probable factor desencadenante de los movimientos registrados. No obstante, estas fueron insuficientes para provocar similares procesos en taludes de cerros inmediatamente adyacentes, indicando una respuesta distinta en esos sectores, quizás como consecuencia de características internas diferentes, al menos localmente, a aquellas de la Localidad 1.

Las fracturas, ubicadas aisladamente como asimismo asociadas a bloques deslizados constituyen elementos potencialmente favorables para la producción de nuevos movimientos en el futuro. Ambos representan sectores de debilidad estructural y además favorecen la entrada de agua hacia el subsuelo cercano favoreciendo el incremento de la sobrecarga por adición de agua y además la erosión debido a la generación de flujos turbulentos. De esta manera, se pueden generar futuras inestabilidades y movimientos adicionales. La formación de la escarpa principal ha modificado localmente las características de las pendientes tanto en forma como en gradiente y constituye un elemento de inestabilidad en el talud, susceptible de ser afectado por nuevos movimientos.

Los movimientos del año 2001 y las antiguas cicatrices diferenciadas a partir de fotografías aéreas en el sector e interpretadas como correspondientes a deslizamientos generados en el pasado, previos al 18/08/1981, sumado a las evidencias de deslizamientos anteriores a 1946/1950 obtenidas en la Localidad 2 nos indican que los procesos de remoción en masa de este tipo son y fueron activos en el modelado del paisaje en el sector específico de estudio.

El reconocimiento de rasgos vinculados a deslizamientos en otras áreas de las Sierras Septentrionales (Martínez, 2001) los que fueron originados según el autor citado en el año 1994 y reactivados en 1998, sumados a las evidencias de cicatrices de deslizamientos antiguas reconocidas en la vertiente sur de la Sierra del Volcán (Martínez, 2001), sugiere, conjuntamente con los desarrollados en la Localidad 1, en el año 2001 y previos al 18/08/81 en la misma localidad, como aquellos anteriores a 1946-1950 reconocidos en la Localidad 2, la participación de los deslizamientos en la evolución de las pendientes de estas áreas del paisaje serrano.

## 8. AGRADECIMIENTOS

A los señores Leonardo Herrera Vegas y Diego Lorda, propietario y encargado respectivamente de la Estancia Santa Rosa, por las facilidades brindadas durante los trabajos de campo y los datos suministrados. Hacemos extensivo nuestro agradecimiento, al agrimensor Jorge Salinas, quien facilitó el teodolito para la confección del relevamiento planialtimétrico de una parte del sector.

## 9. TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

BERTOLINI, J. C., 1982.

Descripción y clasificación de los movimientos de masa en las barrancas entrerrianas del Río Paraná, República Argentina. *Actas Quinto Congreso Latinoamericano de Geología, Volumen IX:37-52. Argentina. Buenos Aires.*

BLOOM, A. L., 1991.

A systematic analysis of late Cenozoic landforms. *Prentice Hall, 532 pp. New York.*

CORTE, A. E. Y N. R. RODRIGUEZ. 1971.

Mediciones de transporte en masa en taludes. Parte I: Sierra de la Ventana. *Actas Reunión sobre la Geología de las Sierras Australes Bonaerenses, Bahía Blanca. CIC de la Provincia de Buenos Aires, pp: 97 - 101. La Plata.*

DE FRANCESCO, F. O. 1992.

Formación Del Aguila: depósitos pedemontanos en el sector occidental de Sierras Australes. Provincia de Buenos Aires. *Actas Terceras Jornadas Geológicas Bonaerenses. Actas, pp: 13-16. La Plata.*

ESCOSTEGUY, L. D., GEUNA, S. E. Y FAUQUÉ L., 1999.

La avalancha de rocas del Moncol, Cordillera Principal, Neuquen. *XIV Congreso Geológico Argentino, Actas II, pp: 67-70. Salta.*

- ESPIZUA, L. E., BENGOCHEA, J. D Y AGUADO, C. J., 1993.  
Mapa de Riesgo de remoción en masa en el valle del Río Mendoza.  
*XII Congreso Geológico Argentino y II Congreso de Exploración de Hidrocarburos. Actas Tomo VI: 323-332. Mendoza.*
- FRENGUELLI, J., 1950.  
Rasgos generales de la morfología y la geología de la Provincia de Buenos Aires.  
*LEMIT, Serie II, N° 33, 72 pp. La Plata.*
- HARRINGTON, H., 1956.  
Argentina.  
*En W. F. Jenks (Ed.), Handbook of South American geology. Geol. Soc. Amer., Memoir 65: 129-165. New York.*
- HIRTZ, N. Y BLACHAKIS, A., 2000.  
Deslizamientos en una franja costera de la ciudad de Comodoro Rivadavia. Chubut, Argentina.  
*Revista de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente. Buenos Aires. N° 15, pp: 41-55.*
- KEIDEL, J. 1916.  
Geología de las Sierras de la Provincia de Buenos Aires y sus relaciones con las montañas de Sud Africa y Los Andes.  
*An. Min. de Agric. y Gan. Minas, Geol. E Hid. (XI), N° 3, 78 pp.*
- LAPIDO, O. Y PEREYRA, F. X., 1999.  
Cuaternario de la Patagonia Extraandina.  
*En Geología Argentina. Anales N° 29. ISSN 0328-2325. Subsecretaría de Minería de la Nación. Servicio Geol. Minero Arg. Instituto de Geol. y Recursos Minerales. Editor R. Caminos. Cap. 23, pp: 704-709.*
- MARTINEZ, G. A., 2001.  
Geomorfología y geología del Cenozoico superior de las cuencas de los arroyos Los Cueros y Seco, vertiente nororiental de las Sierras Septentrionales, provincia de Buenos Aires.  
*Tesis Doctoral, 348 pp. Universidad Nacional de Mar del Plata.*
- PEREYRA, F. X. Y GONZÁLEZ DÍAZ, E. F., 1993.  
Reinterpretación geomórfica de la llamada Morena de Los Horcones, Puente del Inca, Provincia de Mendoza.  
*XII Congreso Geológico Argentino y II Congreso de Exploración de Hidrocarburos. Actas Tomo VI: 73 - 79. Mendoza.*
- PREZ, H., GONZÁLEZ, M. A. Y LAPIDO, O. R., 1995.  
Situación del faldeo este del Cerro Chenque en Comodoro Rivadavia, Provincia de Chubut.  
*Geotemas (Revista del Consejo Superior Profesional de Geología). N° 12, pp: 4-9.*
- RABASSA, J., 1973.  
Geología superficial en la Hoja " Sierras de Tandil ".  
*LEMIT, anales 3-1973, pp: 115-160. La Plata.*
- SAVAGE, C.N., 1968.  
Mass Wasting.  
*En The Encyclopedia of Geomorphology. Encyclopedia of Earth Sciences Series, Vol. III. Editado por R. W. Fairbridge. Reinhold Book Corpor., pp: 696-700. New York.*
- SHARPE, C. F. S., 1938.  
Landslides and related phenomena.  
*Pageant Books, Inc., Paterson, (reimp. 1960). 137 pp. New York.*
- SIMONETT, D.S., 1968.  
Landslides.  
*En The Encyclopedia of Geomorphology. Encyclopedia of Earth Sciences Series, Vol. III. Editado por R. W. Fairbridge. Reinhold Book Corpor., pp:639-641. New York.*
- TARBUCK, E.J. Y LUTGENS, F.K., 1999.  
Ciencias de la Tierra. Una introducción a la Geología Física.  
*Sexta edición. Prentice Hall. 616 pp. Madrid.*
- THORNBURY, W. D., 1960.  
Principios de Geomorfología.  
*Editorial Kapelustz, 627 pp. Buenos Aires.*
- TROEH, F. R., 1965.  
Landform equations fitted to contour maps.  
*Am. Jour. Sci. Vol. 263, pp: 616-627.*



## Cartografía de peligrosidad geológica en la zona de San Martín de los Andes, Neuquén

Lara, Jorge <sup>1</sup> - Pereyra, Fernando X. <sup>2</sup>

### Resumen

*La evaluación y zonificación de la peligrosidad geológica en el área de San Martín de los Andes, motivo del presente trabajo, resulta de la combinación cualitativa y ponderada de una serie de mapas temáticos realizados para tal fin, sumado a la información acerca del clima y tipos y usos del suelo y al inventario de procesos naturales activos. El área bajo estudio se encuentra en el denominado "Corredor de los Lagos" entre los 40° 05' y 40° 15'S y 71° 10' y 71° 25'W, departamentos Lacar y Huiliches (Neuquén) e incluye la localidad de San Martín de los Andes. La región muestra un marcado gradiente en sentido oeste-este, en lo que respecta principalmente a los aspectos topográficos, climáticos, de vegetación y de tipos de suelos entre otros. Se realizaron dos mapas de peligrosidad, uno referido al proceso de remoción en masa y el otro al proceso fluvial, identificándose cuatro clases en cada uno de ellos.*

### 1. INTRODUCCIÓN

La realización del presente trabajo muestra los diferentes grados de peligrosidad geológica en la zona aledaña a la localidad de San Martín de los Andes. El área de estudio se halla ubicada en el sector central de la Cordillera Neuquina, al sudoeste de la provincia del Neuquén en el Departamento Lacar. Se extiende aproximadamente entre los 40° 05' y 40° 15' de latitud sur y entre los 71° 10' y 71° 25' longitud oeste. (Fig. 1). El área en cuestión está enmarcada en el denominado "Corredor de los Lagos" y comprende la totalidad del Ejido Municipal de San Martín de los Andes (14.000 ha, aproximadamente), y sectores donde se planea ampliar la jurisdicción municipal. La ciudad de San Martín de los Andes es el centro urbano más importante que se reconoce en el sector. A partir de la década del '80 se verifica en la zona un aumento en la población permanente y un incremento en el flujo de turistas, tanto en invierno como en verano. De acuerdo a estimaciones realizadas por la Municipalidad de

San Martín de los Andes la población actual asciende a 26.000 habitantes los que en su totalidad están concentrados en el área urbana, llegando a los 32.000 en las temporadas altas del turismo. Esto se traduce en que los procesos de urbanización espontáneos o pautados se realizaran sobre sectores poco propicios para tal fin, como las planicies aluviales de los arroyos de la zona y sobre los faldeos de elevaciones cercanas al Casco Central de la ciudad.

El objetivo del presente trabajo consiste en la evaluación y zonificación de la Peligrosidad Geológica en el área antes señalada. Para llevar a cabo esta tarea se han evaluado los distintos procesos naturales que puedan constituir potenciales peligros para la ocupación humana y sus actividades y se han volcado los resultados en una cartografía de peligrosidad geológica. Esta división del espacio físico es cualitativa y para ello se han confeccionado una serie de cartas temáticas (mapas litológico, geomorfológico y de procesos activos, de suelos, de vegetación, de pendientes y exposición) todos a escala 1:50000, que se han combinan con datos meteorológicos, sísmicos y de ocupación y usos del suelo para la realización de los mapas finales de integración (uno donde se analiza la peligrosidad asociada a la Remoción en masa y otro en el que se analiza el Proceso fluvial). Por un problema de extensión de la presente contribución, solo se adjuntan los mapas litológico, geomorfológico, de suelos

Entregado: 13 de Mayo de 2002 ■ Aceptado: 31 de Octubre de 2003

1. Dirección Municipal de Catastro, San Martín de los Andes, Provincia de Neuquén.

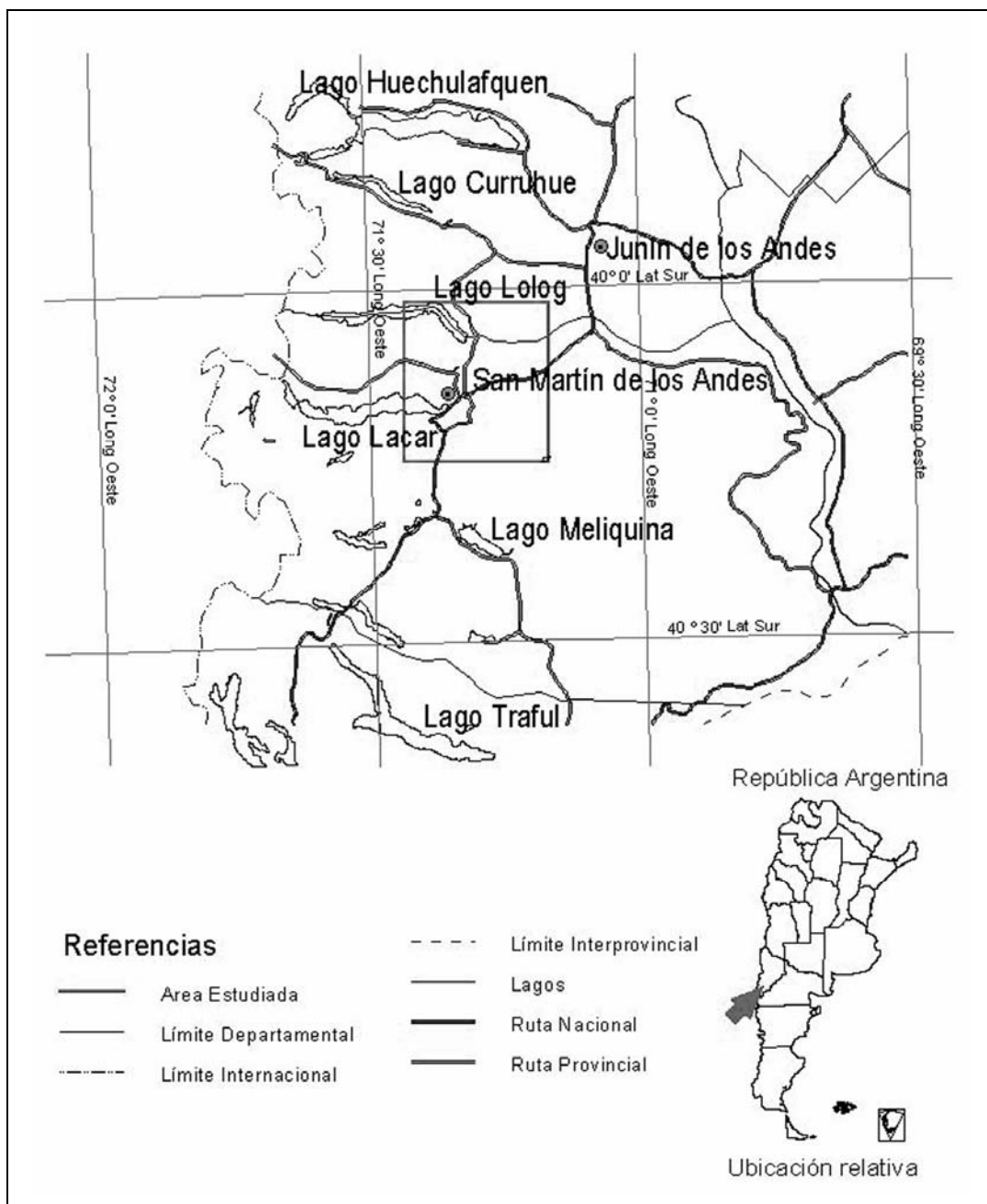
2. Dpto. de Ciencias. Geológicas, FCEyN-UBA y SEGEMAR, C. Universitaria, Pab. II, 1428 Buenos Aires.  
e-mail: fpx@gl.fcen.uba.ar

y los dos mapas de integración. Este estudio intenta brindar pautas acerca del ordenamiento del territorio sobre la base del conocimiento del medio natural, sobre todo en un área que presenta un crecimiento demográfico importante con la consecuente expansión de nuevos núcleos poblacionales, hacia sectores poco propicios, representados generalmente por planicies aluviales o por faldeos de cercanas elevaciones.

Si bien los conceptos de peligrosidad y riesgo geológico están estrechamente relacionados, no son sinónimos. El concepto de peligrosidad se refiere a la evaluación del proceso natural en si a partir de su tipificación y de la estimación cualitativa de la posibilidad o probabilidad de su ocurrencia independientemente de las consecuencias que pudiera ocasionar. Por otro lado,

el concepto de riesgo implica la valoración de los daños y pérdidas económicas y humanas que un proceso natural puede ocasionar. En la confección de las cartas temáticas se ha utilizado la base cartográfica del IGM a escala 1:50000, fotos aéreas (fotogramas OJ.106.7828/30 y OJ.107.7840/42) a escala 1:60.000 y 1:20.000 aproximadamente, obtenidas a través del SEGEMAR y de la Dirección Provincial del Catastro e Información Territorial del Neuquén e imágenes satelitarias de los mismos. Se digitalizó la carta topográfica del Instituto Geográfico Militar a escala 1:50.000 que cubre el área de análisis, para realizar el mapa topográfico en formato digital, de la que posteriormente surgen los mapas morfométricos y los mapas temáticos finales fueron georeferenciados al sistema de coordenadas oficial de la Provincia del Neuquén.

FIGURA 1. MAPA DE UBICACIÓN



## 2. CLIMA

Según la clasificación de Köppen, el clima del área es templado húmedo (Cbf), que se desarrolla entre los 40° y 60° de latitud sur y carece de estación seca propiamente dicha con un mínimo estival, existiendo variaciones sensibles hacia el interior del continente. Las temperaturas en verano varían entre los 20°C y 30°C durante el día, para descender por la noche a valores comprendidos entre los 0°C y 5°C. En invierno las temperaturas se mantienen por encima de los 0°C durante el día llegando en algunas ocasiones a -20°C por la noche. La amplitud térmica es importante sobre todo en los meses del verano alcanzando los 30°C. La temperatura media anual es de alrededor de 10°C, con temperaturas medias para los meses más cálidos del orden de los 15°C a 17°C (Enero-Febrero) y para los meses más fríos del orden de los 3°C a 4°C (Junio-Julio), con un período libre de heladas de 90 días. La humedad relativa media anual es del 70%.

Las precipitaciones son más copiosas (lluvia y nieve) en el oeste disminuyendo hacia el este, con registros medios para la zona próxima al límite internacional (Hua-Hum) de 2800 mm, en la ciudad de San Martín de los Andes 1400 mm y en las cercanías de la confluencia del río Quilquihue con el río Chimehuín 700 mm (Ea. Cerros Los Pinos), lo que determina un gradiente de precipitaciones de 50 mm / km aproximadamente, que en conjunto con el efecto orográfico y la exposición de las laderas dan como resultado las diferentes asociaciones vegetales que se tratarán más adelante. Los mayores volúmenes se registran en los meses de "invierno" (mayo/septiembre), donde se llegan a acumular casi el 70% de las precipitaciones del año. El balance hídrico es positivo para todos los sectores dentro del área de estudio con valores que van desde 1400 mm en la Ea. Quechuquina a 200 mm en la Ea. Cerro Los Pinos, dando de esta manera al igual que con las precipitaciones un importante gradiente en sentido oeste-este. En algunas oportunidades se producen lluvias de tipo torrencial (grandes volúmenes en poco tiempo), con el consiguiente aumento del escurrimiento superficial que trae aparejado anegamientos en las regiones bajas y probables deslizamientos en los faldeos con mayor pendiente. El origen de las precipitaciones se asocia principalmente a tormentas provenientes del oeste, sin embargo en algunas oportunidades se producen lluvias por ascenso orográfico con viento del cuadrante este.

## 3. CARTOGRAFÍA TEMÁTICA

### Geología y Mapa litológico

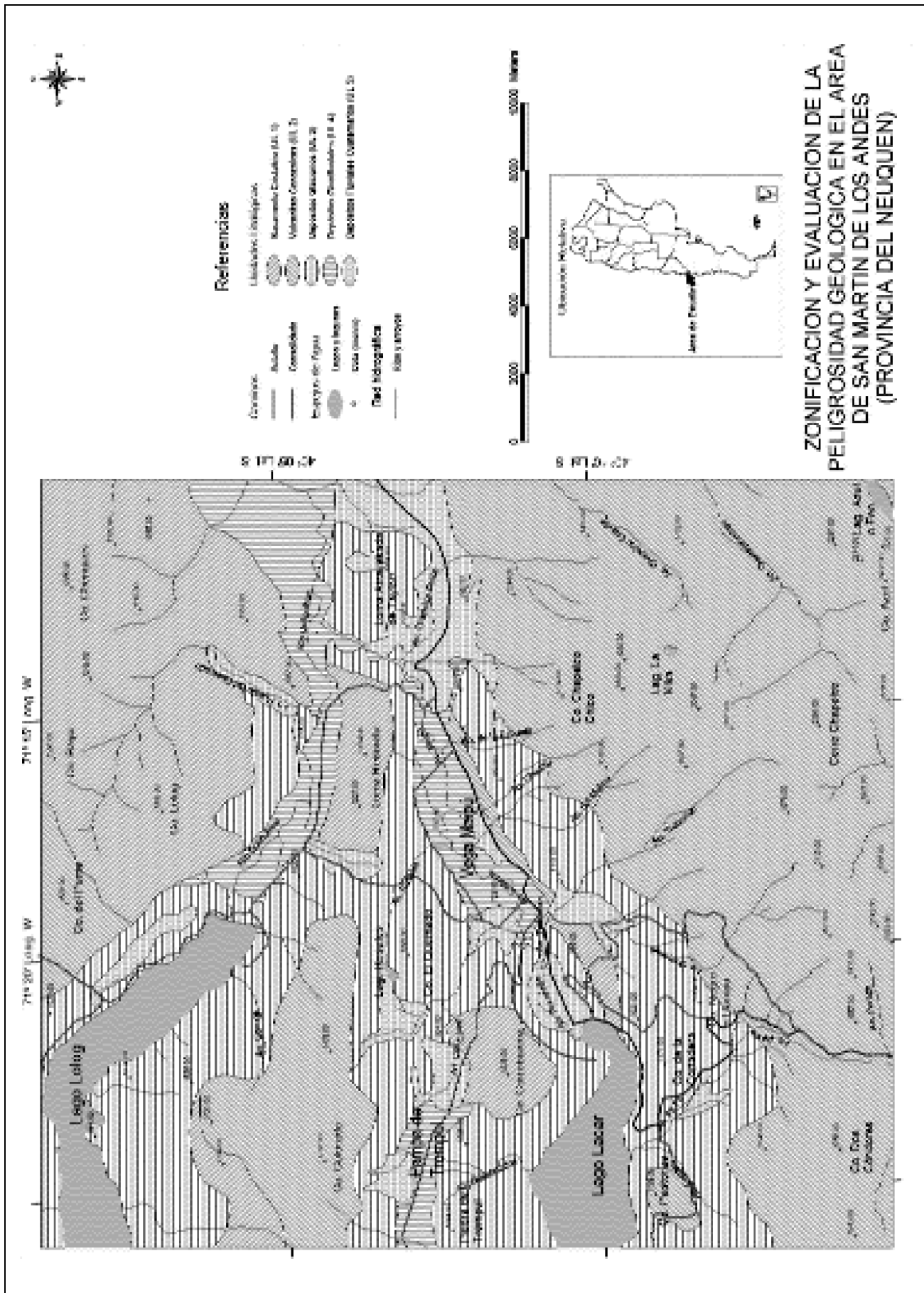
La secuencia estratigráfica, siguiendo los lineamientos regionales establecidos por *González Díaz y Nullo (1980)* y además por *Dalla Salda y otros (1999)* y *Ramos (1999)*, comienza con las metamorfitas de la *Formación Colobuincul*, de edad dudosa, aunque existe la tendencia de asignarlas al Paleozoico inferior, estas han sido invadidas y modificadas (migmatización) por rocas graníticas de la *Formación Huechulafquen*, de no menos incierta asignación temporal, si bien son consideradas como pertenecientes al Paleozoico superior. Este complejo ígneo-metamórfico que constituye el "basamento cristalino" de la región ha sido afectado por varios eventos distróficos. Sobre este complejo se depositaron las vulcanitas de la *Formación Aluminé*, de amplia distribución en el norte y noreste de la región. Al sur, con posterioridad al plutonismo se acumularon los elementos que dan lugar al *Grupo Huemul* (Jurásico medio a superior?), integrado por un complejo volcánico-clástico marino. La parte inferior de este grupo está asociado a un evento volcánico (*Formación Huemul*),

mientras que la porción superior (*Formación Millaqueo*) está caracterizada por depósitos clásticos marinos. Un importante plutonismo del Mesozoico, principalmente del Cretácico superior, está representado por la *Formación Los Machis*, que abarcan amplias zonas de la Cordillera Patagónica (*González Díaz, 1976 y 1982*). El Paleógeno (Paleoceno-Eoceno), corresponde a una asociación volcánico-sedimentario, denominada *Grupo Nabuel Huapi*, integrado por la *Formación Ventana* (vulcanitas con intercalaciones de sedimentos marinos) y la *Formación Niribauau* (depósitos continentales). Para la zona norte, aflora la casi exclusivamente la facies volcánica llamada en la zona *Formación Auca Pan*, sin embargo existen pequeños asomos de depósitos continentales (denominados *Formación Lolog*). Cabe destacar que rocas volcánicas de composición ácida afloran principalmente en el sector del cerro Quemado y al norte del puesto "Los Bayos". El Cuaternario se caracteriza por acumulaciones de drift, vinculadas al englazamiento del Pleistoceno (*Formación Los Helechos*). En el Holoceno predominan las emisiones de piroclastos de la *Formación Río Pireco* y las coladas basálticas de la *Formación Lanín*. Se reconocen depósitos de till y de outwash, los primeros están bien representados y corresponderían morenas laterales que se ubican en los flancos del valle de la Vega Maipú, de la Vega del Lolog y en la zona de la Pampa del Trompul, mientras que próximo a la Loma Atravesada de Taylor se encontrarían los depósitos de la morena terminal. Los sedimentos glaciafluviales y glacialacustres adquieren su máximo desarrollo en las cercanías en la Cuesta de Pío Protto donde se apoyan sobre las vulcanitas de la *Formación Ventana*. Estos depósitos están constituidos por una alternancia de arena media a gruesa hasta grava con importantes cantidades de bloques de rocas volcánicas y graníticas. La *Formación Río Pireco (Laya 1977)* está constituida por piroclastos de composición básica y mesosilíceas que cubren amplios sectores de la cordillera patagónica sobre todo en la denominada "Región de Los Lagos", siendo su límite este las cabeceras de los extensos cuerpos de agua de origen glacial. Sus espesores disminuyen hacia el este al igual que el tamaño de los clastos. Depósitos modernos, generalmente gruesos, caracterizados por los depósitos de abanicos aluviales, los que están restringidos a la red fluvial actual y los asociados a procesos de remoción en masa cubren parcialmente a los anteriores.

Respecto a la estructura, en la comarca se observan dos lineamientos principales que afectan tanto a rocas del "basamento cristalino" como al complejo volcánico del Terciario. El más importante es el que con dirección noroeste-sudeste se reconoce desde el cordón Chapelco hasta el lago Lolog, afectando el flanco oriental del cerro Colorado. En el sector próximo al puesto "Los Bayos" se observa a las rocas del "Basamento Cristalino" por encima de las vulcanitas de la *Formación Ventana*. El segundo lineamiento de importancia con dirección noreste-suroeste se inicia en el flanco oriental del cerro Quemado atraviesa la Vega del Lolog y afecta las rocas del cerro Lolog al norte de la región estudiada. Por otro lado los lineamientos de dirección este-oeste afectan principalmente a las rocas del basamento cristalino. Este presenta un fracturamiento en bloques que produce importantes resaltos topográficos como los observados en el límite norte y sur de la ciudad de San Martín de los Andes y a lo largo de la Vega Maipú.

Se ha realizado un Mapa Litológico (figura 2), el cual resulta del agrupamiento de las formaciones geológicas que afloran en la zona sobre la base del mapa geológico que forma parte del presente trabajo, para ello se ha adoptado un criterio de integración de las diferentes formaciones de acuerdo a su litología dominante, edad, los distintos comportamientos mecánicos

FIGURA 2. MAPA LITOLÓGICO



y la mayor o menor susceptibilidad a experimentar procesos geológicos potencialmente riesgosos. De esta forma se han reconocido para el sector cinco Unidades Litológicas (UL). La Unidad Litológica 1 (UL1) "Basamento Cristalino", incluye variadas litologías ígneas y metamórficas, destacándose los granitos, granodioritas y tonalitas entre las ígneas y los gneisses, micacitas y migmatitas entre las metamórficas (*formaciones Colobuincul y Huechulafquen*). Los materiales que conforman las rocas de las formaciones antes descritas, salvo las facies esquistosas de escaso desarrollo en el área, son pocos friables. En algunos sectores presentan un elevado grado de diaclasamiento y en otros están atravesadas por diques de composición cuarzo-feldespática. La meteorización física es el proceso más destacado sobre las rocas de esta unidad, las que en varios sectores se encuentran cubiertas por depósitos de *till*. Esta unidad se ubica principalmente al norte y sur de la cabecera del lago Lacar, por el norte del citado lago se extiende hasta las proximidades del curso medio del arroyo Cull-rani, hacia el este lo hacen hasta el límite este de la ciudad de San Martín de los Andes, hacia el sur hasta las inmediaciones del cerro Negro. Otros asomos de importancia son los que se observan sobre la margen sur del lago Lolog y en el flanco norte de la Loma Redonda.

En la Unidad Litológica 2 (UL 2) "Vulcanitas Cenozoicas", se agrupan a las rocas de origen volcánico que corresponden a los extensos afloramientos de la *Formación Ventana* (Paleoceno medio-Eoceno medio a superior) y al pequeño asomo correspondiente a la *Formación Lanín* del vulcanismo Holoceno. Los basaltos y riolitas, principalmente, presentan un importante grado de diaclasamiento. En varios afloramientos se observan estructuras columnares. La meteorización química afecta a las rocas de estas características, afectando en primer término a plagioclasas, piroxenos y olivinos. Los afloramientos están constituidos en su gran mayoría por basaltos, andesitas, brechas y tobas asociadas. También son frecuentes las dacitas y riolitas. Estas rocas tienen gran distribución areal cubriendo amplias zonas del sector analizado, se observan en el cordón y cerro Chapelco, en el área de la Piedra de Trompul, en las vertientes sur del cerro Colorado y la Loma Redonda y en la Loma Atravesada de Taylor. Al igual que en la unidad anteriormente descrita cubierta por depósitos de *till*. La Unidad Litológica 3 (UL 3) "Depósitos Glaciares", corresponde a los depósitos de morenas terminales, laterales

y de fondo, ampliamente distribuidos en el área de estudio y agrupados en la *Formación Los Helechos*. Se encuentra en los flancos de los valles del río Quilquihue, el arroyo Chapelco Chico-Maipú y del arroyo Cull-rani. En general estas acumulaciones están caracterizadas por la falta de estratificación y la fracción gruesa está constituida principalmente por clastos subredondeados a redondeados de rocas de composición graníticas y en menor proporción por rocas volcánicas que indicarían un transporte prolongado. Por su parte los depósitos de la Unidad Litológica 4 (UL 4) "Depósitos Glacifluviales", tapizan los fondos de los amplios valles que surcan la región y corresponden a acumulaciones de *outwash*, que están ligadas a depósitos ácuos de alta energía y se encuentran dispuestas generalmente por sobre los depósitos de la UL 3. La Unidad Litológica 5 (UL 5) "Depósitos Fluviales Cuaternarios", se asocian a los cursos fluviales actuales, conformando los depósitos de las planicies aluviales, terrazas fluviales y abanicos aluviales. Los primeros son de materiales clásticos de granulometría mediana a fina, producto del retransporte de los depósitos glaciares y glacifluviales. Las mayores extensiones se asocian a los cursos de los arroyos Chapelco Chico-Maipú y Cull-rani, como así también al río Quilquihue.

#### Morfodinámica y mapa geomorfológico

La región se caracteriza por poseer un paisaje labrado esencialmente por la acción glaciaria y glacifluvial asociada, a las que con posterioridad se sobrepuso la acción fluvial. La remoción en masa es importante y se encuentra generalizada. El proceso eólico ha sido comparativamente menos importante desde el punto de vista del modelado, si bien, la participación de material eólico (cenizas retransportadas y arenas) como material originario de los suelos, es fundamental. La acción eólica sólo se expresa como una serie de dunas de pequeñas dimensiones ubicadas en las terrazas, planicies fluvio-glaciares y en los abanicos aluviales. En los fondos de los valles están dominados los procesos de agradación fluvial y glaciaria, en los laterales los procesos de remoción en masa son los más frecuentes, como así también en las partes altas donde la acción de la erosión glaciaria es todavía evidente. De acuerdo a este esquema se ha reconocido siete Unidades Geomorfológicas (UG). Las principales características de estas unidades son resumidas en la Tabla 1.

TABLA 1. CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LA PRINCIPALES UNIDADES GEOMORFOLÓGICAS

Unidad Geomorfológica	Geología			Morfodinámica	Pendiente	Vegetación	
	Litología	Estructura	Resistencia			Tipo	Cobertura
Relieve Poligénico Rocoso	Vulcanitas y granitos	Masivo, columnar	Alta	Caídas, reptaje	Alta	Estepa arbustiva	Escasa
Pendientes Coluviales	Bloques, grava y arena	Suelto	Baja	Flujos densos, avalancha rocas	Intermedia	Bosque ralo	Moderada
Rocas Aborregadas con Till	Vulcanitas, granitos con till	Diaclasado y suelto	Media a baja	Reptaje, flujos densos	Intermedia	Bosque mixto	Moderada
Morenas	Till	Suelto	Media	Avalancha de rocas	Intermedia	Bosque mixto	Abundante
Planicie y Terraza Glacifluvial	Till	Suelto	Media	Inundaciones, erosión hídrica	Baja	Estepa gramínea	Abundante
Abanicos Aluviales	Grava, arena y limos	Suelto	Baja	Flujos densos, inundaciones	Intermedia arbustiva	Estepa	Abundante
Planicie y Terraza Fluvial	Grava, arena y limos	Suelto	Baja	Inundaciones, erosión hídrica	Baja	Estepa gramínea	Abundante
Mallines	Arena y limos	Suelto	Baja	Inundaciones, erosión hídrica	Baja	hidrófitas	Abundante

En el sector sudeste en las serranías del cordón Chapelco es donde se observan las mayores elevaciones destacándose el cerro Azul (2437 m) y el cerro Chapelco (2394 m), mientras que el nivel de base del lago Lacar (640 m) es la menor altitud. En la parte central un cordón montañoso separa las cuencas de los lagos Lacar y Lolog, alcanzando en el cerro Colorado (1778 m) la máxima altura, descendiendo hacia el este tal como se observa en la Loma Redonda (1227 m) y la Loma Atravesada de Taylor (1004 m). Al norte de estas serranías se desarrolla la cubeta que contiene al lago Lolog y el valle del río Quilquihue, y al sur el valle del arroyo Calbuco que conforma el colector de una amplia red de drenaje (Vega Maipú). Finalmente, queda por destacar grupo serrano ubicado al suroeste, cercano al límite del área en estudio que corresponden a los cerros Dos Cóndores (1756 m) y Pastoriza (1367 m). La red fluvioacustre está bien desarrollada existiendo dos cuencas principales de drenaje bien definida, la del lago Lacar y la del lago Lolog, ambas presentan un diseño del tipo subdendrítico, con tendencia a ser paralela en sectores donde la pendiente del terreno es más elevada. El lago Lacar en su porción oriental tiene como colector principal al arroyo Calbuco, con sus nacientes en extremo norte del cordón Chapelco en el arroyo Chapelco Chico, formando un amplio valle denominado Vega Maipú. El lago Lolog colecta las aguas de varios arroyos que drenan el faldeo norte del cerro Colorado y las descarga en el río Quilquihue que, a lo largo de su recorrido recibe por su margen izquierda al arroyo Puesto Quemado que tiene sus nacientes en el cerro Lolog y sobre la margen derecha ingresa un pequeño curso de agua que drena de la Vega del Lolog.

Las características generales de la acción glaciaria en Neuquén fueron establecidos por *Fidalgo y Porro (1978)*. La última glaciación habría tenido lugar entre los 40.000 y los 14.000 años AP aproximadamente. *Flint y Fidalgo (1964)* denominaron Nahuel Huapí a la última glaciación para la zona de Patagonia Norte. A su vez, *Rabassa et al. (1987)* diferenciaron dos posiciones dentro de esta última, a las que llamaron Nahuel Huapí I y II (más vieja y más nueva respectivamente). Estas morenas serían anteriores a 13000 años AP, por lo que pueden ser correlacionadas adecuadamente con las morenas de Chile. *Rabassa et al. (1990)*, en la zona del río Malleo, denominaron Mamuil Malal a los depósitos morénicos correspondientes a la última glaciación, diferenciando dos sistemas separados por un interstadial: Mamuil Malal I y II (coincidentes con Nahuel Huapí I y II, respectivamente). Si bien la altura que alcanzó la línea de ELA (línea de nevé) varía grandemente según la latitud considerada, durante el último máximo glaciario, a la latitud de Neuquén, podría haberse encontrado 600 m por debajo de la actual (*Clapperton 1993*). En general se considera que el máximo del Estadio Isotópico 2 (LMG, último máximo glaciario), se habría producido a los 18000 años AP y que el estadal de 15000-14000 habría alcanzado menor extensión. Para la Patagonia, *Mercer (1976)* planteó la existencia de una serie de avances neoglaciales cuya cronología, generalmente aceptada, incluye tres avances neoglaciales. El neoglacial I se habría producido entre los 4700 y 4200 años AP, el neoglacial II, entre los 2700 y 2000 años AP y el neoglacial III ("Pequeña Edad de Hielo"), entre los 800 años AP y el siglo XIX.

Los depósitos morénicos de los valles del arroyo Chapelco Chico-Maipú y río Quilquihue no han sido datados hasta el presente. Los mismos pueden agruparse en dos sistemas de morenas (con varias posiciones de estabilización del glaciario cada una), uno externo y en consecuencia más viejo, ubicado entre la Loma Atravesada de Taylor y la Cuesta de Pio Protto, y otro in-

terno y más joven, localizado próximo el límite este de la Ciudad de San Martín de los Andes y en las cercanías de la desembocadura del lago Lolog en el río Quilquihue. Por el grado de preservación de estos depósitos, por su altitud, por la situación de infrayacencia respecto a las cenizas holocenas y por analogía con la zona del Malleo y Nahuel Huapí, pueden adjudicarse ambos sistemas a la última glaciación. En tal sentido puede establecerse que ambas posiciones sean homologables a Nahuel Huapí I y II y Mamuil Malal I y II. Sin embargo, serían necesarias dataciones de estos depósitos a fin de confirmar las correlaciones establecidas, ya que en las proximidades de la confluencia de los ríos Quilquihue y Chimehuin (al E del área estudiada) se habrían identificado depósitos morénicos que podrían pertenecer a una posición más antigua de la lengua de hielo (Glaciación El Condor?). Una distribución semejante de depósitos morénicos fue descrita por *Ferrer y otros (1999)* para la zona del lago Trafal.

Las formas deposicionales se observa principalmente en la parte este del área en estudio, sobre ambos flancos del valle que conforma la Vega Maipú, en el extremo norte de la Vega del Lolog y en el área de la Pampa de Trompul. En general estas acumulaciones están caracterizadas por la falta de estratificación y muy bajo grado de selección granulométrica, la fracción gruesa está constituida principalmente por clastos subredondeados a redondeados de rocas de composición graníticas y en menor proporción por rocas volcánicas que indicarían un transporte prolongado. Si bien existen depósitos con estas características en donde los clastos pertenecientes a rocas volcánicas son el principal componente de los mismos, estos estarían asociados probablemente a una lengua de hielo que descendió desde el cordón Chapelco para confluir con la lengua principal instalada en el actual valle del arroyo Maipú. Acumulaciones ligadas a depósitos ácuos de alta energía son observadas por sobre los depósitos morénicos antes descritos (*outwash*), como así también aquellos que corresponden a varves. Por otro lado las formas asociadas a la erosión glaciaria más importante que se observan en la región son las artesas que alojan a los lagos Lacar y Lolog y los valles del arroyo Maipú y río Quilquihue. Estrías asociadas a la acción del hielo son visibles en las migmatitas al sur del lago Lacar y circos glaciarios de distinguen en el cordón Chapelco.

Con el fin del período glacial se reactivan los procesos fluviales y los de remoción en masa, estos últimos de gran distribución areal. Para la caracterización de los procesos de remoción en masa se ha tenido en cuenta los diferentes tipos de la cobertura vegetal y edáfica en los distintos sectores del área en estudio: El reptaje es el proceso más evidente y los conos de talud la geoforma típica en aquellos sectores donde la presencia de vegetación es escasa o nula, y los suelos están pocos desarrollados ya sea por efecto del viento o por presentar un gradiente importante en la pendiente. Estos se observan principalmente en las cotas más altas, por encima de la cota de 1.700 m, que durante parte del año está cubierto por una espesa capa de nieve. Para zonas con características similares, pero con una pendiente más elevada, llegando en algunos casos a la vertical, que generalmente se asocian a los flancos de la artesa glaciaria sobre todo en las márgenes de los lagos Lacar y Lolog y en el valle del arroyo Maipú, las caídas de rocas son frecuentes, favorecidos por el alto grado de diaclazamiento que presentan los granitoides, basaltos y andesitas. Así como resultado de la meteorización física y los procesos criogénicos se generan los materiales que son susceptibles a experimentar movilizaciones por fenómenos gravitacionales.





Para sectores por debajo de la cota de 1.700 m en donde el gradiente de la pendiente es bajo y la acción eólica pasada y actual favorece la acumulación de las cenizas producidas durante el evento volcánico del Holoceno, surge la posibilidad de la formación de una importante cubierta edáfica sobre la cual se desarrolla la cubierta herbácea y la masa boscosa característica de la región. Los procesos de remoción en masa presentes corresponden a los de soliflucción, los lóbulos generados a raíz estos procesos se observan principalmente en las pendientes de bajo a mediano gradiente las que están sometidas a frecuentes períodos de congelamiento y descongelamiento. En los amplios claros que existen dentro de este bosque, la mayoría de los cuales están relacionados con la actividad antrópica, el efecto es acelerado como consecuencia de la falta protección que brinda la cobertura vegetal. Al oeste de la laguna Rosales en coincidencia con la traza del lineamiento que corre dirección sureste-noroeste, se observa un depósito como producto posiblemente de una avalancha de rocas. Probablemente debido al alivio que se produce en los laterales de los valles ocupados por la masa hielo cuando este se retira, es que se halla dado lugar a los deslizamientos del tipo rotacional y planar observados en sector sureste del área de estudio, y en particular en el faldeo NE del cordón Chapelco, por donde asciende el arroyo Chapelco Chico, y en la porción inferior del faldeo del Cerro Corral de Piedra, al este del arroyo Chapelco Grande.

Las geofomas derivadas del proceso fluvial se disponen principalmente en los flancos y los fondos de los valles producto de la acción glaciaria. Los abanicos aluviales que se observan a ambos lados del valle del arroyo Maipú y sobre la margen norte del río Quilquihue, están asociados a cursos permanentes que escurren las parte altas. En general son de dimensiones reducidas. Los fondos de los valles antes citados poseen amplias planicies aluviales y algunos niveles de terrazas. El régimen estacional característico de los ríos y arroyos de la región implica marcada variaciones en los caudales, lo que lleva a frecuentes inundaciones de la planicie aluvial en épocas de estiaje.

En el Mapa Geomorfológico han sido diferenciadas siete Unidades Geomórficas (figura 3). La Unidad Geomorfológica 1 (UG 1) "Relieve Poligénico Rocoso" se dispone en los sectores más altas, donde la pendiente del terreno es elevada y la vegetación es escasa o nula. Resultado consecuencia del proceso erosivo glaciario, la meteorización física y química, y los procesos criogénicos actuales y pasados es la presencia de una importante cobertura detrítica que puede ser movilizados por remoción en masa (caídas y avalanchas de rocas) facilitado por el elevado gradiente de las pendientes y por el grado de diaclazamiento que presenta la unidad litológica sobre la que se ha desarrollado esta forma. La Unidad Geomorfológica 2 (UG 2) "Pendientes Coluviales" ocupan posiciones intermedias en los valles, allí la pendiente media del terreno es moderada, lo que ha permitido la formación de una cubierta edáfica significativa, por su parte la cobertura vegetal de acuerdo a su situación altitudinal pasa de bosque de lengas achaparradas a lengas arbóreas. Predominan los procesos de meteorización física (crioclastismo) y de remoción en masa (soliflucción y reptaje, principalmente). En líneas generales estas pendientes se caracterizan por presentar una importante cobertura detrítica susceptible de ser movilizada por fenómenos gravitacionales. Los procesos fluviales presentes en esta unidad están representados por un manifiesto carcavamiento.

Las unidades que están asociadas con el evento glaciario que afectó la región durante parte del Pleistoceno, pueden dividirse en aquellas formas que relacionadas a procesos erosivos

"Rocas Aborregada con Till" (UG 3) por un lado y a los procesos agradacionales "Morenas" (UG 4) y "Planicie y Terraza Glaci-fluvial" (UG 5) por otro. La Unidad Geomorfológica 3 (UG 3) tiene gran distribución areal. Generalmente las pendientes son elevadas, en algunos sectores esta desprovista de vegetación y las rocas sobre las que se desarrolla poseen un importante grado de fracturación, lo que favorece los procesos de remoción en masa que presentan una marcada estacionalidad. En los fondos de los valles del río Chimehuin y de los arroyos Chapelco Chico y Maipú se dispone la Unidad Geomorfológica 5 (UG 5), correspondiente a un antigua outwash. Esta unidad incluye geofomas de similar origen pero de diferentes edades de acuerdo a los distintos términos glaciarios. Es una planicie subhorizontal, de muy bajo relieve relativo, modificada ocasionalmente por la deflación y acumulación eólica y por la acción erosiva y deposicional de los cursos fluviales que las surcan y tributan en ellas, especialmente los arroyos Cull-rani, del Molino y Puesto Quemado. En sectores deprimidos de esta planicie se han desarrollado los mallines (UG 8) en donde la permeabilidad y el drenaje del suelo son pobres.

Los abanicos aluviales que se observan en las desembocaduras de los arroyos Cull-rani, del Molino, entre otros, conforman la Unidad Geomorfológica 6 (UG 6) "Abanicos Aluviales" sobre ellos se han desarrollado importantes núcleos poblacionales, que se proveían de agua de los cursos permanentes de estos arroyos, lo que en la actualidad tienden a presentar diversas condiciones peligrosas como anegamientos y erosión hídrica localizada. Por último la Unidad Geomorfológica 7 (UG 7) "Terrazas y Planicies Fluviales", está asociada a los cauces fluviales abundantes en la región. Las terrazas son amplias así como las planicies, los depósitos suelen ser gruesos y en general muestran cierto grado de participación de procesos de remoción en masa. El régimen estacional de lluvias implica marcadas variaciones de caudal en los cursos lo que implica frecuentes inundaciones sobre las planicies y fenómenos erosivos sobre los niveles de terrazas.

### Suelos

La Región Andina-Patagónica se caracteriza por poseer acentuados gradientes bioclimáticos, geomórficos y litoestratigráficos que han incidido en la distribución geográfica de los suelos así como en sus propiedades. Estas variaciones tienen su máxima expresión en sentido oeste-este. Los suelos observados en la región pertenecen principalmente a tres Ordenes: Andisoles, Molisoles y Entisoles, estos últimos en superficies geomórficas inestables y preferentemente en la zona oriental del valle. En mucha menor proporción se encuentran suelos pertenecientes al orden Alfisoles. Los Andisoles (Xerands y Udands) son suelos con moderado grado de desarrollo, perfiles simples A-AC-C o A-Bw-C, en este último caso con un horizonte de alteración y evidencias de pérdidas y migraciones de componentes en solución. Su formación se encuentra relacionada estrechamente a la acumulación de materiales piroclásticos debidos a las frecuentes erupciones volcánicas de los Andes a estas latitudes. Precisamente, a la latitud de Neuquén es donde se encuentran la mayor parte de los volcanes activos de los Andes patagónicos, esencialmente del lado chileno, pero debido a las direcciones dominantes de los vientos, la depositación de cenizas posee mayor expresión en territorio argentino. Son texturalmente gruesos y los contenidos de materia orgánica son altos. La densidad aparente es baja y poseen una buena retención hídrica, si bien se encuentran usualmente bien drenados. En superficie son moderadamente ácidos (debido a la vegetación arbórea) y en profundidad se vuelven alcalinos (por la presencia de carbonatos).

El porcentaje de saturación es alto, debido a la presencia de bases y escasa lixiviación. Aparecen en todo el sector occidental de la provincia. Poseen alta susceptibilidad a la erosión solo en los casos en que se encuentren descubiertos. Dominan en toda la zona cordillerana y en los valles glaciarios que tienen sus nacientes en la misma. Su presencia se encuentra estrechamente relacionada con el bosque de Nothofagus y mixto de Ciprés y Nothofagus.

Los Entisoles (Acuentes, Fluventes, Ortentes y Psamentes) son suelos de escaso a nulo grado de desarrollo pedogenético, carentes de horizontes diagnósticos. Poseen perfiles simples A1/C y conservan rasgos heredados de los procesos sedimentarios que dieron lugar a la acumulación de los materiales parentales. En general son todos profundos y muy permeables, con escasa fertilidad (baja capacidad de intercambio catiónico y materia orgánica), coloraciones rojizas y mala retención hídrica. Son poco aptos para cualquier tipo de uso agrícola (con o sin riego). Aparecen en las zonas de taludes, pendientes controladas por remoción en masa y terrazas fluviales nuevas y planicies aluviales de los ríos de la región y en los abanicos aluviales que conforman el piedemonte de los sistemas serranos precordilleranos. Poseen alta susceptibilidad a la erosión hídrica y los Psamentes también a la erosión eólica.

Los Molisoles (Acuoles y Xeroles) se caracterizan por poseer un epipedón mólico (A1) con contenido de materia orgánica superior al 1% y más de 25 cm de potencia. El perfil es simple A1/AC/C, pudiendo ser el horizonte inferior cálcico. Poseen texturas francas y moderado grado de estructuración del epipedón. Son moderadamente permeables, poseen media a alta retención hídrica. Son comparativamente más fértiles pero tienen problemas de manejo. Aparecen básicamente en la zona occidental y central, respondiendo a un mayor excedente hídrico estacional (menor evapotranspiración), se vuelven dominantes en sectores bajos del paisaje, en valles glaciarios y planicies glaci-fluviales. Se relacionan a vegetación de pradera herbácea. Poseen moderada a alta susceptibilidad a la erosión. Finalmente, los Alfisoles aparecen estrechamente relacionados con los Molisoles, careciendo a diferencia de estos, de epipedón mólico. Por debajo del horizonte órico poseen horizontes argílicos no demasiado estructurales, si bien cumpliendo con todas las exigencias planteadas en la Soil Taxonomy (*Soil Survey Staff, 1996 y posteriores actualizaciones*). Son casi exclusivamente Haploxeralfes, con perfiles simples A1/Bt/C. Aparecen en los sectores bajos del paisaje, en valles glaciarios y planicies glaci-fluviales. Se relacionan a vegetación de pradera herbácea. Poseen moderada a alta susceptibilidad a la erosión. En las zonas de mallines se encuentran Histosoles (suelos orgánicos) y en las zonas altas pueden reconocerse Inceptisoles.

Sobre la base de la cartografía realizada por Laya (1969), Ferrer y otros (1989) e INTA (1989) actualizada en Ferrer y otros (1998) y mediante controles de campo se ha realizado un Mapa de suelos en el cual se han identificado cuatro unidades cartográficas (US). La Unidad Cartográfica 1 (US 1) ocupa los sectores cumbrales en las divisorias montañosas y se encuentra compuesta por Udivitrands y Hapludands líticos en fases someras y erosionadas y Criortentes y Udiortentes típicos, melánicos y ándicos. En esta unidad también son frecuentes los afloramientos rocosos. En general se asocian a pendientes altas en faldeos dominados por el reptaje y afloramientos rocosos y ocasionalmente carpetas debidas a meteorización física (crioclastismo). La vegetación es transicional entre bosque ralo de lengas que se va volviendo más achaparrada con la altura y prado altoandino

(dominado por gramíneas de altura y vegetación en cojín). En los sectores más bajos y asociado al bosque, la ceniza volcánica es el material originario dominante, si bien se encuentra mezclado con los materiales gruesos propios del talud.

La Unidad Cartográfica 2 (US 2) es la unidad dominante y se encuentra sobre los faldeos de los cordones montañosos y los laterales de los valles glaciarios. En estos sectores el material originario dominante es la ceniza volcánica y la vegetación es de bosque (de Ciprés, de Nothofagus y Mixto 1 y 2). Los suelos dominantes son los Hapludands (Haploxerands) y los Udivitrands típicos. En algunos sectores más planos y ubicados a cotas inferiores, se encuentran Molisoles (Hapludoles y Haploxeroles) y Entisoles (Ortentes). Ocasionalmente se reconocen en los mallines Histosoles (Medifibristes). Por su parte la Unidad Cartográfica 3 (US 3), se localiza en las zonas mal drenadas de los pisos de los valles glaciarios y fluviales. Dominan en los sectores algo mejor drenados los Molisoles y Alfisoles (Haploxeroles y Haploxeralfes) y en los sectores peor drenados los Histosoles y Endoacuoles. En los materiales fluviales y glaci-fluviales más gruesos se encuentran Fluventes y Ortentes. En esta unidad el paisaje es subhorizontal y la vegetación de tipo de pradera o especializada (hidrofitas). La presencia de cenizas, en los sectores más elevados permite la aparición de Andisoles. Finalmente, la Unidad Cartográfica 4 (US 4) se localiza en el este de la zona estudiada, y presenta un mayor déficit hídrico. Las cenizas son menos frecuentes o se encuentran mezcladas con otros materiales y la vegetación dominante es la estepa herbácea. Predominan los Haploxeroles y Haploxeralfes típicos y en algunos sectores peor drenados los Acuoles (Endoacuoles énticos).

#### Mapa de Vegetación

Desde el punto de vista fitogeográfico la comarca se encuentra enmarcada dentro de la Provincia Subantártica o Bosque Andino Patagónico en el sector oeste y dentro de la Estepa Patagónica en el este (Cabrera, 1976). En la primera, se reconocen cuatro distritos principales, que para la región en estudio está representado por el Distrito del Bosque Caducifolio donde las especies mayoritarias son de hoja caduca que corresponden al género *Nothofagus*, tales como la lenga (*Nothofagus pumilio*), el ñire (*Nothofagus antarctica*), el roble pellín (*Nothofagus obliqua*) y el raulí (*Nothofagus alpina*) y en menor proporción por especies de hoja perennes en la que se destaca dentro del género anterior al coihue (*Nothofagus dombeyi*) y entre las coníferas al ciprés de la patagonia (*Austrocedrus chilensis*). El tipo de vegetación predominante es el bosque alto, con especies de hojas caducas o perennes. La distribución y diferentes asociaciones están influenciadas por la disponibilidad de agua y la exposición y posición de las laderas en las que se desarrolla. Según el gradiente pluviométrico antes descrito, la vegetación se distribuye de acuerdo a un gradiente altitudinal pasando desde el lengal achaparrado en las partes altas, a la lenga arbórea, el bosque mixto de coihue, raulí, roble pellín y ñire, con sotobosque de caña colihue (*Cusquea culeou*) y arbustos como el amancay (*Alstromeria aurantiaca*), el michay (*Berberis darwinii*), la mutisia (*Mutisia decurrens*), entre otros. La zona de transición (ecotono) entre el bosque y la estepa está marcada por un régimen de precipitaciones de entre 700 mm y 800 mm, en donde el maitén (*Maitenus boaria*), el radal (*Lomatia hirsuta*), el ciprés de la patagonia, junto a pastos duros, arbustos y matas achaparradas, conforman la asociación de este sector que da paso a la Estepa Patagónica caracterizada casi exclusivamente por gramíneas como el neneo (*Mullinum spinosum*) y coirón (*Stipa speciosa*).

La distribución de la vegetación en la zona estudiada ha permitido diferenciar siete unidades fitogeográficas volcadas en un mapa de vegetación (UF): UF 1 De Altura, UF 2 Bosque de Ciprés, UF 3 Bosque de Nothofagus, UF 4 Bosque Mixto I, UF 5 Bosque Mixto II, UF 6 De Mallines y UF 7 Estepa. En los sectores ubicados generalmente por encima de los 1.800 m s.n.m., la vegetación arbórea cede su lugar a comunidades especializadas. Estas han sido incluidas por *Cabrera (1976)* en la denominada Provincia Altoandina. En esta domina la estepa de gramíneas, integrada por *Festuca monticola*, *Festuca weberbaueri* y *Poa obvallata* entre otras. Hay brezales de *Empetrum rubrum* (mutilla) y vegetación especializada en las vegas de altura. Hacia arriba aparece la vegetación en cojín y luego los sectores cumbrales en general se encuentran desprovistos de vegetación. En el Bosque Mixto I, aparecen asociaciones de las siguientes especies: *Nothofagus antártica* (ñire), *Austrocedrus Chilensis* (ciprés), *Maitenus boaria* (maitén) y *Lomatia hirsuta* (radal). El sotobosque de esta unidad está dominado generalmente por *Chusquea culeu* (caña colihue) y *Berberis sp.* En las áreas húmedas, cañadones y bordes de arroyos hasta los 900-1.000 m. sobre el mar están ocupadas, por la única especie perenne presente en el área de estudio, *Nothofagus dombeyi* (coihue). Los bosques de ñire ocupan las posiciones inferiores de las laderas distribuidas en zonas subhúmedas en forma de bosque y/o matorral. Para el Bosque Mixto II, los bosques de *Austrocedrus Chilensis* se presentan sobre relieves abruptos en laderas de exposición Norte y Este con características climáticas y edáficas de clima templado seco característico de las zonas ecotonales, con sotobosque de *Lomatia hirsuta*, *Mutisia decurrens*, *Berberis sp.* y *acaena sp.* En las áreas más húmedas y con dirección Este se encuentran comunidades vegetales compuestas por maitén Iradal (*Lomatia hirsuta*), como componentes de un sotobosque abierto se encuentran especies como parrilla (*Ribes magellanicum*), maqui (*Aristotelia maqui*), chaura (*Gaultheria phillyreaefolia*) y michay (*Berberis darwinii*). Finalmente, en las zonas de mallines se encuentran comunidades especializadas compuestas por pajonales de cortadera (*Cortadera pilosa*) y vegas de *Deyeuxia*, *Deschampsia* y *Poa*.

#### 4. MAPAS DE INTEGRACIÓN

Los mapas de peligrosidad geológica han surgido de la combinación cualitativa y ponderada de los mapas (capas), sumado a la información climática, fitogeográfica, sísmica y de ocupación y usos del suelo, como así también con los datos sobre procesos naturales que hubieran causado daños importantes sobre la población y obras de infraestructura. Además se tuvieron en cuenta las diferentes clase de pendientes sobre la base de las equidistancias y distribución areal de las curvas de nivel y la orientación de las mismas. En los mapas de integración (figuras 4 y 5) se ha dividido el terreno en diferentes áreas según su peligrosidad relativa basadas en los procesos de remoción en masa y fluvial. La zona estudiada presenta una muy activa morfogénesis, los principales procesos son la remoción en masa, la erosión y deposición fluvial y en menor medida la deflación y acumulación eólica. En la tabla 2 se observan la distribución e intensidad relativa de los factores de peligrosidad en función de las diferentes unidades geomórficas reconocidas. Como principal factor de peligrosidad geoambiental se destaca la remoción en masa seguido por el de la erosión hídrica e inundaciones, para lo cual las pendientes medias del terreno, la cubierta edáfica, detrítica y vegetal juegan un papel preponderante. Así en las zonas donde los valores de las pendientes son bajos los procesos remoción en masa se encuentran atenuados debido principal-

mente a que ellas se encuentran estabilizadas, mientras que para estos sectores, las inundaciones son frecuentes dada la marcada estacionalidad de las precipitaciones, como las ocurridas en Julio de 1993, Agosto de 1997 y 1999 que afectaron principalmente las zonas inmediatamente contiguas a los arroyos del Casco Central de San Martín de los Andes y de la Vega Maipú.

Por otro lado en las zonas montañosas en donde se observan valores de pendientes del terreno de altos a moderados, los procesos asociados a la remoción en masa en ellas son más comunes, debido a una serie de factores, entre los que se destacan la importante cobertura detrítica que las cubren y es susceptible a movilizarse por efectos de la gravedad y la vegetación del bosque, la que una vez afectada, se degrada rápidamente y no protege las pendientes. La acción del escurrimiento superficial genera los rill y cárcavas que se observan sobre todo en los extensos taludes con material coluvial, esta situación se agrava en las zonas donde la vegetación es escasa, ya sea por las características propias del lugar o por la acción antrópica. El factor antrópico aparece para esta región que presenta un crecimiento demográfico sostenido, como el principal agente potenciados de los procesos de remoción en masa afectando en general las pendientes naturalmente estabilizadas. Otro factor a tener en cuenta en la estabilidad de las pendientes es la sismicidad, factor natural que es poco considerado en la región, si bien existen políticas el respecto en lo que se refiere a las características constructivas de la obra pública y privada. Según el INPRES, el área de trabajo se encuentra en una región de moderada actividad sísmica, correspondiéndole la Zona 2, dentro de la zonificación sísmica del país, con una probabilidad superior al 75% de sufrir los efectos de un sismo de intensidad VII, en la escala Mercalli modificada. Los antecedentes de sismos destructivos son escasos, sin embargo en los últimos años se han producidos sismos de baja intensidad, como el ocurrido el 28 de Marzo de 1998 con una intensidad de IV, si bien no ocasionó víctimas y ni daños materiales, se reportaron pequeñas caídas de rocas. El sismo que destruyó a la ciudad de Valdivia en 1960, fue percibido por los pobladores de la zona que sostienen que las aguas del lago Lacar de "retiraron" para volver con fuerza en forma de una gran ola que cubrió totalmente su playa y zona aledañas. En líneas generales los efectos directos de los sismos en la región pueden ser comparativamente pocos significativos sobre la población y sus actividades, para eventos de menor magnitud que V, el impacto mayor tiene lugar en forma indirecta, ya que los sismos suelen actuar como disparadores de los fenómenos de remoción en masa los cuales sí suelen ser catastróficos. Por otro lado la zona presenta un grado potencialmente bajo de peligrosidad en lo referente a las emisiones de la fracción gruesa de los volcanes activos que se encuentran próximo el límite con la República de Chile. Mientras que la fracción ceniza favorecida por la intensidad y dirección del viento, tiende a aumentar la peligrosidad pero sin alcanzar valores muy altos.

Para la zonificación de la peligrosidad geológica se han representado cuatro clases de acuerdo al principal proceso geomórfico actuante y causante de la potencial peligrosidad, que para su representación se los ha dividido en aquellos relacionados con los procesos de remoción en masa por un lado y los asociados al proceso fluvial (figuras 4 y 5). Respecto a las cuatro clases definidas para los procesos de remoción en masa, las *zonas de baja peligrosidad* se asocian a los sectores donde la pendiente media del terreno es escasa o nulo y está representada por la Unidad Geomorfológica "Mallines". Aquí los fenómenos de remoción en masa son escasos o directamente están ausentes. Las *zonas*



FIGURA 5. MAPA DE PELIGROSIDAD POR EL PROCESO FLUVIAL

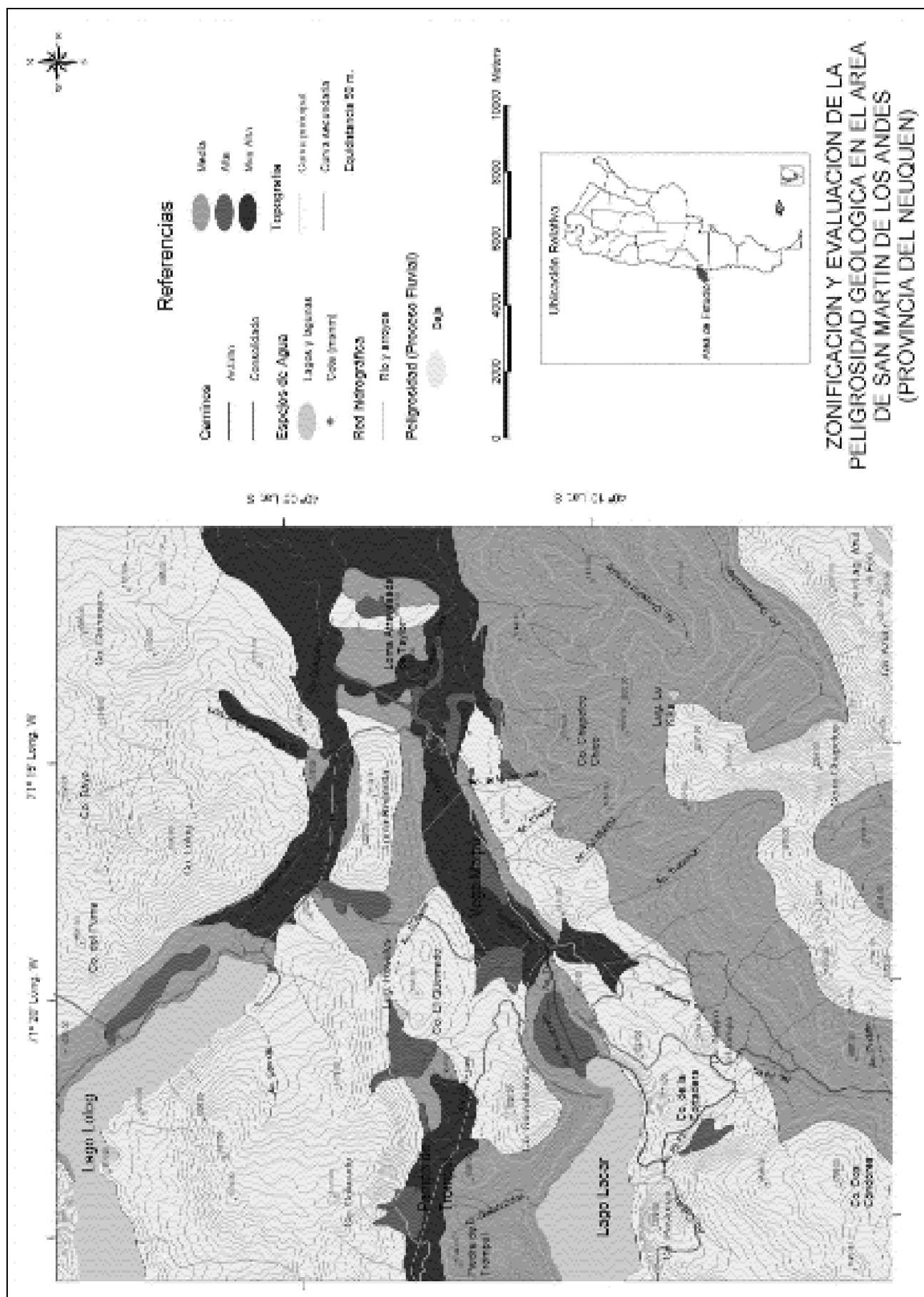


TABLA 2. PRINCIPALES FACTORES DE PELIGROSIDAD

Unidades Geomorfológicas	Factores de Peligrosidad						
	Remoción en masa				Fluvial		
	Flujos densos	Caídas	Avalancha de rocas y detritos	Reptaje	Inundación	Sedimentación	Erosión hídrica
Rel. Poligénico Rocoso	Medio	Muy Alto	Muy Alto -	-	-	Bajo	
Pendientes Coluviales	Muy Alto	-	Muy Alto	Muy Alto	-	-	Medio
Rocas Aborreg. con Till	Medio	Muy Alto	Muy Alto	Alto	-	-	Bajo
Morenas	Bajo	-	Medio	-	-	-	Medio
Planicie y Terraza Glacifluvial	-	-	Medio	-	Muy Alto	Alto	Alto
Abanicos Aluviales	Alto	-	-	-	Alto	Alto	Alto
Planicie y Terraza Fluvial	-	-	Medio	-	Muy Alto	Alto	Alto
Mallines	-	-	-	-	Alto	Alto	Medio

de *peligrosidad media* se localizan en sectores donde la pendiente del terreno es baja a intermedia, las formas dominantes están relacionadas con procesos de erosión y acumulación glacial y agradación fluvial e incluye a las unidades geomorfológicas “Morenas”, “Planicie y Terrazas Glacifluviales” y “Planicies y Terrazas Fluviales”, suelen estar cubiertos por una abundante vegetación (estepa gramínea y bosque) la que en caso de ser degradada, aceleraría los procesos que allí ocurren. Tal como se dijera más arriba, la cobertura vegetal tiene un efecto de protección sobre las pendientes y, para las unidades geomórficas aquí incluidas, las que se encuentran desarrolladas en el sector de la estepa serían las más propensas a sufrir movimientos gravitacionales. Las *zonas con peligrosidad alta*, se asocian a la Unidad Geomorfológica “Abanicos Aluviales”, ya que la probabilidad de ocurrencia de debrisflow es importante. En esta unidad, junto con las planicies y terrazas glacifluviales, se han asentado los principales núcleos urbanizados. Dentro de la misma categoría, se incluyen las U.G. Relieve poligénico rocoso y Rocas aborregadas cubiertas por till. En estas las caídas de roca y avalanchas son frecuentes, sobre todo en las épocas de grandes precipitaciones nivas y pluviales. Estos fenómenos suelen provocar el corte de las rutas, como por ejemplo en el caso de la ruta 234, que da acceso a Chapelco y una San Martín con Villa la Angostura. Finalmente, las *zonas de muy alta peligrosidad* se localizan en las partes más elevadas donde los procesos erosivos glaciares son evidentes, las laderas están tapizadas por una espesa capa de detritos que son susceptible de moverse por efectos de la gravedad, además la cubierta vegetal al ser escasa o nula facilita el desplazamiento de los materiales. se asocian a la unidad Pendientes Coluviales. Las caídas y las avalanchas de rocas son frecuentes afectando por el momento sectores aún des poblados. Otro factor a tener en cuenta es la exposición u orientación de las laderas, de esta forma aquellas orientadas hacia el sur principalmente, como así también las orientadas al sudeste y sudoeste son las más propensas a verificar procesos de remoción en masa, dado que la insolación debido a la posición latitudinal de la zona en estudio, permite que se acumule por más tiempo

la nieve y en comparación con aquellas que dan al norte, sean más inestables.

De forma similar que para los procesos de remoción en masa se realizó el análisis de la potencial peligrosidad de los procesos fluviales reconociéndose cuatro clases de peligrosidad. La clase de *Peligrosidad Baja* se asocia a las unidades que ocupan las partes más altas, en donde si bien existe un cierto grado de erosión hídrica comparativamente es baja debido a que la cubierta edáfica y vegetal es escasa. Respecto a la *Peligrosidad Media* corresponde a las extensas Planicies Coluviales que cubren amplias zonas representan los sectores con peligrosidad media. En ellas se observa un incipiente cárcavamiento que en algunos sectores suelen formar profundos cañadones. Los sectores de *Peligrosidad Alta* se relacionan con los depósitos de abanicos aluviales y los mallines, en estos sectores la erosión hídrica es importante debido a la impermeabilización del suelo consecuencia de las urbanizaciones que sobre ella se han instalado, a pesar de la espesa cubierta vegetal que es fácilmente degradada. Finalmente las zonas de *Peligrosidad muy alta* se disponen en los fondos de los valles del río Chimehuín y arroyos Chapelco Chico y Maipú, en ellos las inundaciones son frecuentes dada la estacionalidad de las precipitaciones, que tienen lugar predominantemente en los meses de invierno y persisten hasta el deshielo y al ascenso de los niveles freáticos que ocurren en estos períodos. La profundidad del acuífero varía entre los 2 y 6 metros, sin embargo cabe destacar que existen sectores anegados la mayor parte del año los que se relacionan con niveles freáticos poco profundos.

## 5. CONCLUSIONES

La evaluación y zonificación de la peligrosidad geológica en el área de San Martín de los Andes, motivo del presente trabajo, resulta de la combinación cualitativa y ponderada de una serie de mapas-capas temáticos realizados para tal fin, sumado a la información acerca del clima, vegetación tipos y usos del suelo y al inventario de procesos naturales activos. La zona de estudio presenta un marcado gradiente en sentido oeste-este en lo

que respecta principalmente a los aspectos topográficos, climáticos, y de vegetación. Del reconocimiento de los distintos cuerpos de rocas que afloran en la zona y adoptando un criterio de integración de las formaciones, agrupándolas de acuerdo a su comportamiento frente a potenciales procesos naturales, se identificaron 5 Unidades Litológicas. Geomorfológicamente la zona presenta un paisaje labrado esencialmente por la acción glaciaria y glaciifluvial asociada, a la que con posterioridad se superimpuso la acción fluvial. La remoción en masa es importante y se encuentra generalizada. El proceso eólico ha sido comparativamente menos importante desde el punto de vista del modelado. Se diferenciaron 8 Unidades Geomorfológicas que constituyen la base de los mapas finales. Los suelos también presentan un marcado gradiente. Entre las variaciones registradas se puede citar una decreciente andosolización hacia el este y pertenecen principalmente a tres Ordenes: Andisoles, Molisoles y Entisoles, estos últimos en superficies geomórficas inestables y preferentemente en la zona oriental del valle. En mucha menor proporción se encuentran suelos pertenecientes al orden Alfisoles.

Para la evaluación y zonificación de la peligrosidad geológica en el área se realizaron dos mapas de integración que reflejan en distintos grados de peligrosidad los diferentes procesos geomórficos actuantes en la región. De esta forma se han diferenciado, para cada mapa de integración, cuatro clases de peligrosidad relativa, de acuerdo a la siguiente escala: 1) *Muy Alta*, 2) *Alta*, 3) *Media* y 4) *Baja*. Para ello se han tenido en cuenta las distintas características climáticas, forestales, litológicas, geomorfológicas, morfométricas y tipos de suelos. El Mapa de Integración I refleja los diferentes grados de peligrosidad para los procesos asociados a la remoción en masa. De él se desprenden

de que los de mayor grado se asocian a las partes medias de los faldeos donde la Unidad Geomorfológica "Pendientes Coluviales" adquiere su máximo desarrollo. En este sector las laderas están tapizadas por una gran cantidad de detritos que son susceptibles a desplazarse por acción de la gravedad. Las Unidades Geomorfológicas "Relieve Poligenético Rocoso", "Rocas Aborregadas con Till" y "Abanicos Aluviales" le siguen en orden de peligrosidad. Se observan en las partes más elevadas o sobre los flancos de la artesa glaciaria y en la desembocadura de los arroyos en los amplios valles de origen glaciario. En el Mapa de Integración II se muestran los diferentes grados de peligrosidad asociados a los procesos fluviales, de forma que aquellos de mayor grado se ubican junto a los cursos fluviales. Las Unidades Geomorfológicas más afectadas son las que corresponden a las planicies y terrazas fluviales y glaciifluviales, las que son inundadas en forma periódica debido a la estacionalidad de las precipitaciones. En orden de peligrosidad decreciente le sigue la Unidad Geomorfológica "Abanicos Aluviales", sobre la cual se han instalado la mayoría de los núcleos poblacionales del área, con el consiguiente riesgo que ello implica. Por último, los sectores con media y baja peligrosidad con respecto a los procesos fluviales se encuentran en las partes más altas, donde dichos efectos están atenuados. Este estudio intenta brindar pautas acerca del ordenamiento del territorio sobre la base del conocimiento del medio natural en un área que presenta un crecimiento demográfico importante con la consecuente expansión de nuevos núcleos poblacionales, hacia sectores poco propicios, representados generalmente por planicies aluviales o por faldeos de cercanas elevaciones. La información aquí generada puede ser utilizada como base para la toma de decisiones y elaboraciones de políticas a cerca del ordenamiento territorial.

## 6. TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

- CABRERA L., 1976.  
Regiones fitogeográficas de la República Argentina.  
*ACME. Buenos Aires.*
- CLAPPERTON, C., 1993.  
Quaternary Geology and Geomorphology of South America.  
*Elsevier, 746 p.*
- DALLA SALDA, L., R. VARELA Y C. CINGOLANI, 1999.  
El Basamento Pre-Gondwanico del centro-oeste del Macizo Norpatagónico.  
*En Geología Regional Argentina, R. Caminos (ed.), Anales SEGEMAR 29:107-132, Buenos Aires.*
- FERRER, J. A., J. IRISARRI Y J. M. MENDIA, 1990.  
Estudio Regional de Suelos de la Provincia del Neuquén.  
*Publicación Especial COPADA-CFI, 900p. Buenos Aires.*
- FERRER, J. A., J. IRISARRI Y J. M. MENDIA, 1998.  
Mapa de Suelos de la provincia del Neuquén. Escala 1:500000.  
*COPADE-CFI. Neuquén - Buenos Aires.*
- FERRER, J., F. PEREYRA Y D. VILLEGAS, 1999.  
Geoformas y suelos en el Valle del río Traful, prov. de Neuquén.  
*Rev. Asoc. Geol. Arg., 54(3):270-280.*
- FIDALGO, F. Y N. PORRO, 1978.  
Geología Glacial.  
*En Geología y Recursos Naturales del Neuquén. VII Cong. Geol. Arg. (Neuquén). Relatorio: 129-136.*
- FLINT, R. F. Y F. FIGALGO, 1964.  
Glacial geology of the flank of the Argentine Andes between 39° 10' lat. S and 41° 20' lat. S.  
*Geol. Soc. Amer. Bull. 75 (4): 335-352.*
- GONZALEZ DIAZ, E. F., 1976.  
Mapa Geológico de la Hoja 38a, San Martín de los Andes, escala 1:100.000.



*Inédito.*

- GONZALEZ DIAZ, E. F., 1982.  
Zonación cronológica del plutonismo en los Andes Patagónicos Septentrionales entre los 40°00' y 42°00' sur:  
La migración de los ciclos intrusivos,  
*Acta Geol. Lilloana XVI (1)* 5-22.
- GONZALEZ DIAZ, E. F. Y F. E. NULLO, 1980.  
Cordillera Neuquina, en Geología Regional Argentina,  
*Acad. Nac. Cienc., Córdoba: 1099-1147.*
- INTA, 1989.  
Atlas de suelos de la República Argentina. Buenos Aires.
- LAYA, H., 1969.  
Cartografía de los principales grupos de suelos y sus relaciones genéticas en la región de Junín y San Martín de los Andes (prov. Neuquén).  
*Actas 5º Reunión Argentina de la Ciencia del Suelo: 331-343. Santa Fe.*
- LAYA, H., 1977.  
Edafogénesis y paleosuelos de la Formación téfrica Río Pireco. (Holoceno), Neuquén.  
*Asoc. Geol. Arg. Rev. 32 (1): 3-23.*
- RABASSA, J., E. EVERSON, G. SCHLIEDER, J. M. CLINCH, G. STEPHENS Y P. ZILTER, 1987.  
Edad Pre-Pleistoceno superior de la glaciación El Cóndor, valle del río Malleo, Neuquén. República Argentina.  
*Actas 10º Cong. Geol. Arg., 3: 261-263. San Miguel de Tucumán.*
- RABASSA, J., E. EVERSON, J. M. CLINCH, G. SCHLIEDER, P. ZILTER Y G. STEPHENS, 1990.  
Geología del cuaternario del valle del río Malleo, provincia del Neuquén.  
*Asoc. Geol. Arg. Rev. 45 (1-2): 55-68.*
- RAMOS, V., 1999.  
Las provincias Geológicas del territorio argentino.  
*En Geología Regional Argentina, R. Caminos (ed.), Anales SEGEMAR 29:41-96, Buenos Aires.*
- SOIL SURVEY STAFF, 1996.  
Keys to Soil Taxonomy,  
USDA, 644 pp. Washington.



## Susceptibilidad de agregados silíceos a la degradación frente a la reacción álcali - sílice

Maiza, Pedro J. <sup>1-2</sup> - Marfil, Silvina A. <sup>1-3</sup>

### Resumen

Los diferentes tipos de sílice, cuarzo, calcedonia, tridimita, cristobalita y ópalo tienden a degradarse en medio alcalino, por lo que provocan reacciones deletéreas cuando son utilizados como agregado para hormigón. Estos minerales corresponden a variedades de sílice micro, poli o criptocristalina y constituyen rocas tales como arenisca, porcelanita, jaspe, geiserita, ftanita, pedernal, chert y algunas de origen orgánico como son diatomita, radiolarita y madera fósil (xilópalo).

En el presente trabajo se estudiaron diferentes variedades de sílice que forman parte de agregados gruesos y finos usados en hormigones de cemento portland. Para ello se trabajó con esteromicroscopio y microscopía de polarización. Se evaluó la morfología que presentan los clastos, textura, presencia de minerales de neoformación, avance del proceso en función de la movilización de la sílice, relación del clasto con el mortero y fenómenos de disolución.

Si bien no se incluye en el presente trabajo, se han utilizado metodologías más específicas para interpretar las variaciones composicionales de los materiales originales y los generados durante el fraguado y envejecimiento del hormigón, tales como SEM, DRX, IR, EDAX y otras.

### 1. INTRODUCCIÓN

El desarrollo de la reacción álcali - sílice (RAS) en hormigones de cemento portland ha sido ampliamente tratada en la bibliografía mundial (Léger *et al.* 1996; Prezzi *et al.* 1998; Qinbua *et al.* 1997; Rodrigues 1999). En Argentina son numerosos los trabajos publicados sobre el tema a partir de 1960. (Comisión de estudio de la reacción álcali-agregado 1968; Batic *et al.* 1974; Marfil y Maiza 1993 y 2001; Marfil *et al.* 2001). Es aceptado que el fenómeno se produce entre materiales denominados deletéreos y los álcalis provenientes principalmente del cemento, sumado al contacto del hormigón con humedad, aguas salinas, elevadas temperaturas, etc. Los principales materiales considerados deletéreos son las variedades de sílice

criptocristalina, el vidrio volcánico y las rocas volcánicas con pastas vítreas.

En el presente trabajo se estudian agregados constituidos con variedades de sílice metaestable con el propósito de informar acerca del proceso de degradación, los fenómenos de disolución que presentan y los materiales de neoformación que se desarrollan.

### 2. MATERIALES Y MÉTODOS

Se trabajó con hormigones de obra cuyos agregados contienen especies silíceas deletéreas dentro de sus constituyentes y han manifestado RAS. Se analizó el comportamiento de ágata, calcedonia, cuarzo tensionado (con extinción ondulante) y cuarzo microcristalino. Se utilizó un sistema microscópico Olympus, con procesador de imágenes integrado con un esteromicroscopio SZ-PT; microscopio petrográfico Olympus trinocular B2-UMA, con una cámara de video Sony 151 A incorporada y procesador de imágenes Image Pro Plus versión 3.1.

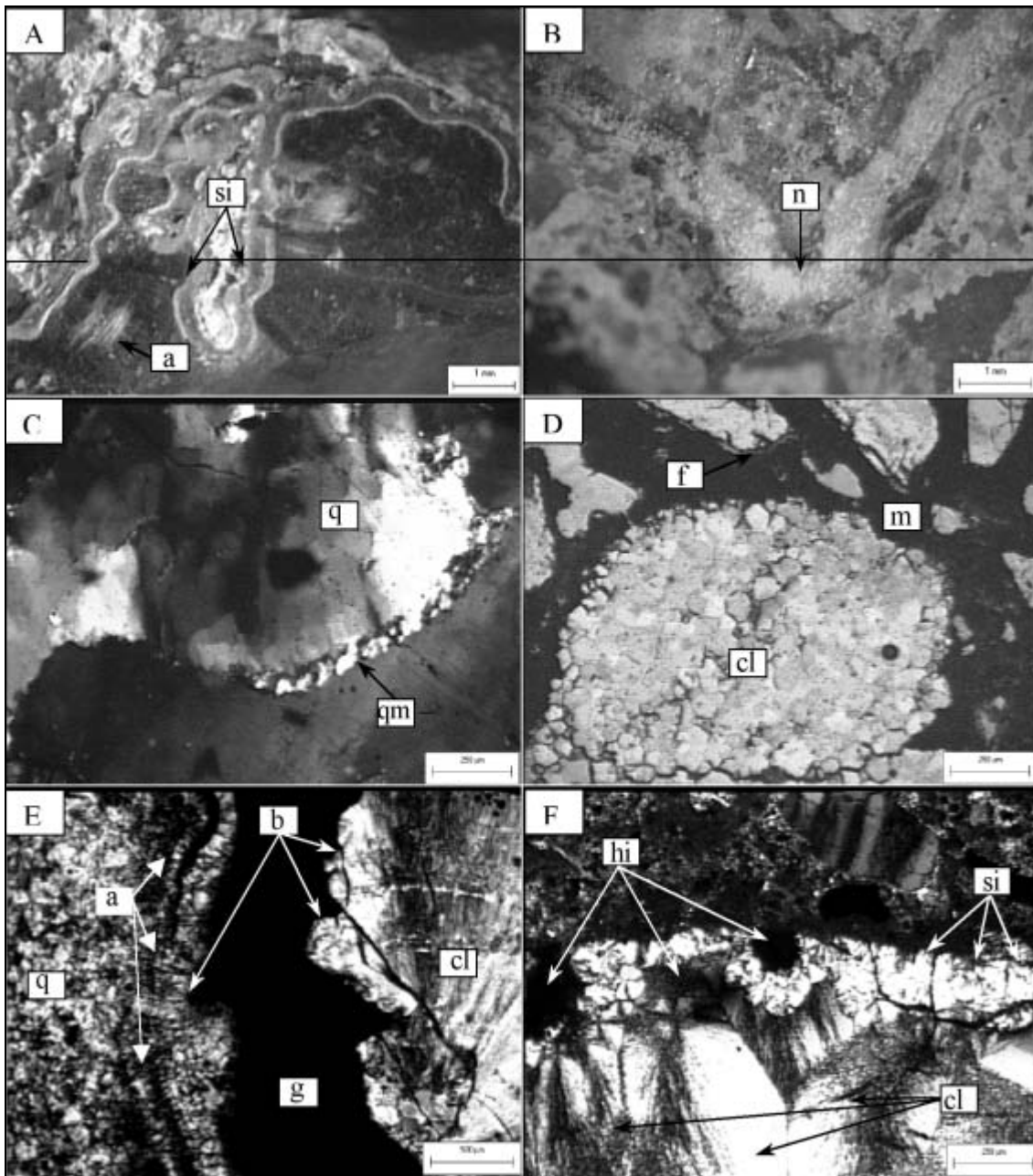
Entregado: 10 de Diciembre de 2002 ■ Aceptado: 14 de Febrero de 2003

1. Dpto. de Geología. Universidad Nacional del Sur. San Juan 670.  
8000 Bahía Blanca. TE 0291-4595184. e-mail: samfil@criba.edu.ar

2. Investigador Principal CONICET

3. Investigador Adjunto s/d CIC de la Prov. de Bs. As.

FIGURA 1.



**3. OBSERVACIONES CON ESTEREOMICROSCOPIO**

Se trabajó con un hormigón intensamente deteriorado por el desarrollo de la RAS, donde en la composición del agregado grueso predominan clastos de ágata, pedernal y cuarcita. Los clastos de ágata (a) presentan muy avanzada corrosión superficial, son claros los fenómenos de lixiviación de sílice. Aumenta la porosidad superficial y se concentra en sectores del mortero periféricos a los clastos (si). (Fig. 1A). En los contactos agregado-mortero es frecuente observar productos de neoformación (n), identificados por DRX como estructuras ceolíticas (Fig. 1B), cuya composición determinada por EDAX es Si, Al, O y cantidades variables de Ca, Na y/o K.

**4. MICROSCOPIA DE POLARIZACIÓN**

Las rocas cuarcíticas están constituidas por cuarzo con extinción ondulante. Existen métodos ópticos para medir el ángulo

de extinción ondulante y su valor está vinculado con la potencial reactividad del material. Depende en forma directa del grado de deformación de la roca. Además del ángulo de extinción ondulante (AOE), la susceptibilidad a la disolución está estrechamente vinculada al tamaño del grano. El cuarzo microscritalino tiende a reaccionar aunque en forma mucho más lenta. En la Fig. 1C se muestra un clasto de cuarcita (q) con elevado ángulo de extinción ondulante, que contiene cuarzo microcristalino (qm) en su borde. Este material es calificado como de reacción lenta en hormigón. La Fig. 1D muestra un clasto de arenisca con cuarzo microcristalino donde es posible observar el contacto con el mortero (m). El cemento y la matrix de la periferia del clasto han sido lixiviados al extremo de despegarse los granos del cuerpo principal (cl). La sílice aparece precipitada en poros y fracturas (f) de las inmediaciones, en estructuras tipo ceolita.

Las variedades de sílice metaestables tales como tridimita, cristobalita, calcedonia y ópalo, constituyentes de agregados

finos y gruesos, presentan fenómenos de disolución de la sílice, la que tiende a moverse hacia los bordes en forma de gel. La Fig. 1E corresponde a un clasto de ágata (a) con abundante calcedonia, (cl), la sílice movilizada se concentra en la zona central (amorfa) (g). En el sector izquierdo predomina el cuarzo fino (q). En ambos es posible observar los fenómenos de disolución en las zonas de borde (b).

En la Fig. 1F se observa un clasto de calcedonia (cl) con claras evidencias de disolución con concentración de sílice microcristalina (si) y óxidos de hierro (hi) en las zonas periféricas. El mortero presenta claras evidencias de reacción, con precipitación de óxidos de hierro y cementación con especies de neoformación, modificando su textura original.

Figura 1: A. Clasto de ágata (a) con fenómenos de disolución concentrados en el borde del clasto (si) y desarrollo de productos de reacción. B. Minerales de neoformación (n) en el contacto agregado-mortero. C. Clasto de cuarcita donde se observa el cuarzo (q) con extinción ondulante y cuarzo microcristalino (qm). D. Bordes de disolución en un clasto de arenisca con cuarzo microcristalino. E. Fenómenos de disolución de sílice en clastos de ágata (a) y cuarzo fino (q), con movilización de sílice hacia la zona central amorfa (g). F. Calcedonia (cl) con disolución en la zona de contacto con el mortero donde se concentra sílice microcristalina (si) y óxidos de hierro (hi).

## 5. CONCLUSIONES

- Los agregados que contienen variedades de sílice metaestable se lixivian liberando sílice al hormigón, debido al pH

## 7. TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

- BATIC, O; M. WAINZTEIN Y A. IÑIGUEZ ROGRIGUEZ, 1974.  
Estudios y experiencias sobre los agregados para hormigones empleados en la zona de Bahía Blanca en relación a la reactividad alcalina potencial.  
*Revista Técnica LEMIT. Serie II. N° 257. Anales LEMIT. 227-242.*
- COMISIÓN DE ESTUDIO DE LA REACCIÓN ÁLCALI-AGREGADO, 1968.  
Investigación de la reactividad potencial con los álcalis de los cementos de los áridos utilizados normalmente en las obras del gran Buenos Aires y en una parte del litoral norte argentino.  
*VI Congreso Argentino de Vialidad y Tránsito. Memoria IV. Doc. 58. 273-280.*
- LÉGER, P.; P. CÔTÉ AND R. TINAWI, 1996.  
Finite element analysis of concrete swelling due to alkali-aggregate reactions in dams.  
*Computers & Structures, vol. 60, N° 4, 601-611.*
- MARFIL, S. A. Y P. J. MAIZA, 1993.  
Zeolite crystallization in portland cement concrete due to alkali-aggregate reaction.  
*Cement and Concrete Research, vol. 23 N\_ 6, 1283-1288.*
- MARFIL, S. A. AND P. J. MAIZA, 2001.  
Deteriorated pavements due to the alkali - silica reaction. A petrographic study of three cases in Argentina.  
*Cement and Concrete Research, vol. 31. N° 7, 1017-1021.*
- MARFIL, S. A.; P. J. MAIZA Y R. C. J. SALOMÓN, 2001.  
Pavimentos de hormigón de la ciudad de Bahía Blanca. Su comportamiento frente a la RAS.  
*Revista de la Asociación de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente. N° 16, 146-152.*
- PREZZI, M.; P. J. MONTEIRO AND G. SPOSITO, 1998.  
Alkali-silica reaction. Part 2: The effect of chemical admixtures.  
*ACI Materials Journal, vol. 25, N° 1, 95-101.*
- QINHUA, J. AND L. WEIQING, 1997.  
Investigations on concrete railway ties suffering from alkali-silica reaction.  
*Cement and Concrete Research, vol. 27, N° 1, 107-113.*
- RODRIGUES, F.; P. MONTEIRO AND G. SPOSITO, 1999.  
The alkali-silica reaction. The surface charge density of silica and its effect on expansive pressure.  
*Cement and Concrete Research, vol. 29, 527-530.*

cercano a 13 que desarrolla el proceso de fraguado y durante su evolución de endurecimiento y su envejecimiento.

- El grado máximo de susceptibilidad es ópalo-cristobalita, disminuyendo hacia calcedonia-tridimita, cuarzo microcristalino y cuarzo con extinción ondulante.
- La sílice solubilizada tiende a concentrarse en las zonas periféricas de los clastos, formando estructuras de silicatos alcalinos, junto con los óxidos de hierro.
- En la morfología externa de los clastos de agregado pueden apreciarse fenómenos de disolución, redondeamiento de aristas agudas y contactos de caries.
- El producto final será sílice amorfa y productos de neoformación tipo ceolitas, dependiendo principalmente de la disponibilidad de álcalis.
- Los productos de reacción tanto en forma de gel como cristalizados, se desarrollan en los bordes de clastos reactivos, en el interior de cavidades de aire accidental y en fracturas. Una vez colmatadas las cavidades comienzan a fisurar el mortero. Las fracturas tienden a ser radiales. Los cristales crecen en forma perpendicular a la longitud de las mismas.

## 6. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Universidad Nacional del Sur, al CONICET y a la CIC por el apoyo brindado y al Sr. Rodolfo Salomón por la colaboración en la compaginación de las fotomicrografías.



## Caracterización geoambiental de los ríos de la ciudad de Salta y su influencia en el Espacio Geológico Urbano (EGU), Argentina

Marcuzzi, Jorge J. <sup>1-2</sup> - Rojas, Luis <sup>1</sup> - Vera Sanchez, Hugo <sup>1</sup> - Gutierrez, Miguel <sup>1</sup>

### Resumen

*Los sistemas fluviales son indicadores sensibles del medio físico al que pertenecen, cuando tienen lugar desequilibrios la respuesta para corregir el impacto es inmediata, esta reacción se manifiesta mediante una serie de reajustes en el sistema; como erosión, aluvionamiento, cambios de cauce o elaboración de un nuevo perfil longitudinal, entre otros. Estos reajustes en general no son óptimos para las obras de infraestructura, urbanización o áreas de cultivos, por lo que se consideran como amenazas de la naturaleza y se olvida que gran porcentaje de los casos son consecuencia de acciones antrópicas desacertadas.*

*Para investigar los problemas mencionados, en un esquema de trabajo orientado a estudiar diferentes aspectos del Cuaternario del Valle de Lerma, los autores de esta entrega analizan los ríos situados en el sector norte del valle. Los mismos son parte de la Unidad Geoambiental Fluvial, según el esquema de clasificación de Unidades Geoambientales para el Valle de Lerma definido por uno de los autores en un trabajo anterior, en función de elementos del relieve, geológicos y bióticos. La finalidad es sistematizar de manera experimental los cursos fluviales, mediante una metodología que incluye diferentes niveles de complejidad, sustentada en parámetros geológicos, geomorfológicos, hidráulicos, ambientales y otros. Se considera que los resultados del trabajo de sistematización cuando se analice el conjunto del sistema fluvial de la región, permitirán elaborar un esquema básico para el estudio de problemas geoambientales en estas unidades y su relación con el Espacio Geológico Urbano (EGU) de la ciudad de Salta.*

*La restricción del análisis, a un número reducido de ríos, tiene el propósito de evaluar precisamente la metodología empleada, que si bien demuestra una serie de bondades y los parámetros considerados en el primer nivel son relativamente sencillos de cuantificar por simples observaciones de campo o en imágenes satelitales, es necesario comprobar su adaptación a las características del medio local.*

*Se resalta la necesidad de desarrollar una metodología de este tipo, como parte de un plan de investigación geoambiental que proporcione información para sistematizar los ríos que conforman la Unidad Geoambiental Fluvial del Valle de Lerma, especialmente la importancia que reviste conocer su comportamiento y los parámetros que gobiernan su evolución. Para el presente caso el estudio se centra en la clasificación de los tipos de cursos y de los valles fluviales asociados según aspectos geomorfológicos y morfológicos.*

### 1. INTRODUCCIÓN

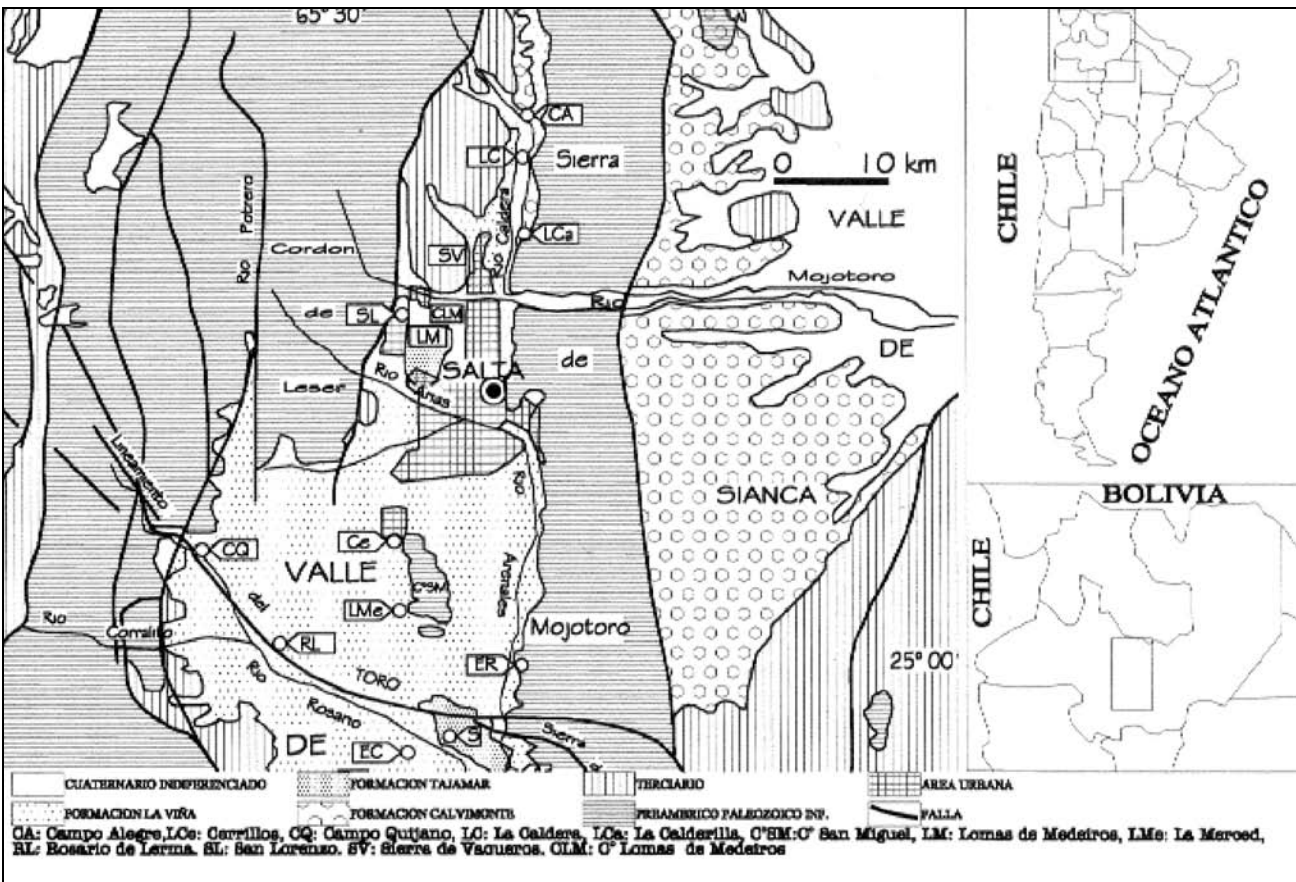
El nacimiento y desarrollo de la ciudad de Salta, como explica Marcuzzi et al. en este simposio, por múltiples razones ha estado relacionada con los cursos de agua existentes en el medio; para provisión de agua, defensa, esparcimiento, riego y otros; en la actualidad esta relación en ciertos aspectos ha variado, pero los ríos han incrementado su importancia como fuente de provisión de áridos y como áreas recreativas paisajísticas. Esto hace necesario tener un conocimiento más detallado de sus

Entregado: 12 de Setiembre de 2001 ■ Aceptado: 31 de Octubre de 2001

1. Cátedra de Geotecnia, FCN, Universidad Nacional de Salta

2. Secretaría de Minería, Industria y Recursos Energéticos de Salta  
Alsina 975 - 4400, Salta, Argentina  
jjmarcuzzi@sinctis.com.ar

FIGURA 1. GEOLOGÍA DEL VALLE DE LERMA (simplificada) Extraído de Gallardo et. al. 1999



características en especial para regular la actividad extractiva de áridos que genera considerables impactos y riesgos geoambientales.

El marco descrito ha motivado la necesidad de analizar en forma detallada las características y comportamiento de los ríos y arroyos que conforman la unidad geoambiental definida. El propósito es lograr un ordenamiento sistemático que permita monitorear en el tiempo los cambios y consecuencias que registre su evolución natural o debida a los impactos por la acción del hombre.

La extracción de áridos es uno de los aspectos más delicados que registra actualmente el sistema fluvial, dado el impacto geoambiental que significa una demanda sostenida del recurso ante la necesidad de satisfacer la demanda social de obras de infraestructura. Este diagnóstico, muestra en una primera etapa la necesidad de implementar un plan de caracterización de los cursos fluviales que pertenecen al esquema geoambiental del EGU de la ciudad de Salta, y luego en el tiempo contar con un modelo para el Valle de Lerma que permita reconocer las variables que gobiernan el desarrollo en el tiempo de los cursos fluviales y los principales impactos geoambientales producidos o por generarse y predecir las consecuencias sobre la unidad geoambiental urbana y de las subcuencas relacionadas.

## 2. ASPECTOS GENERALES

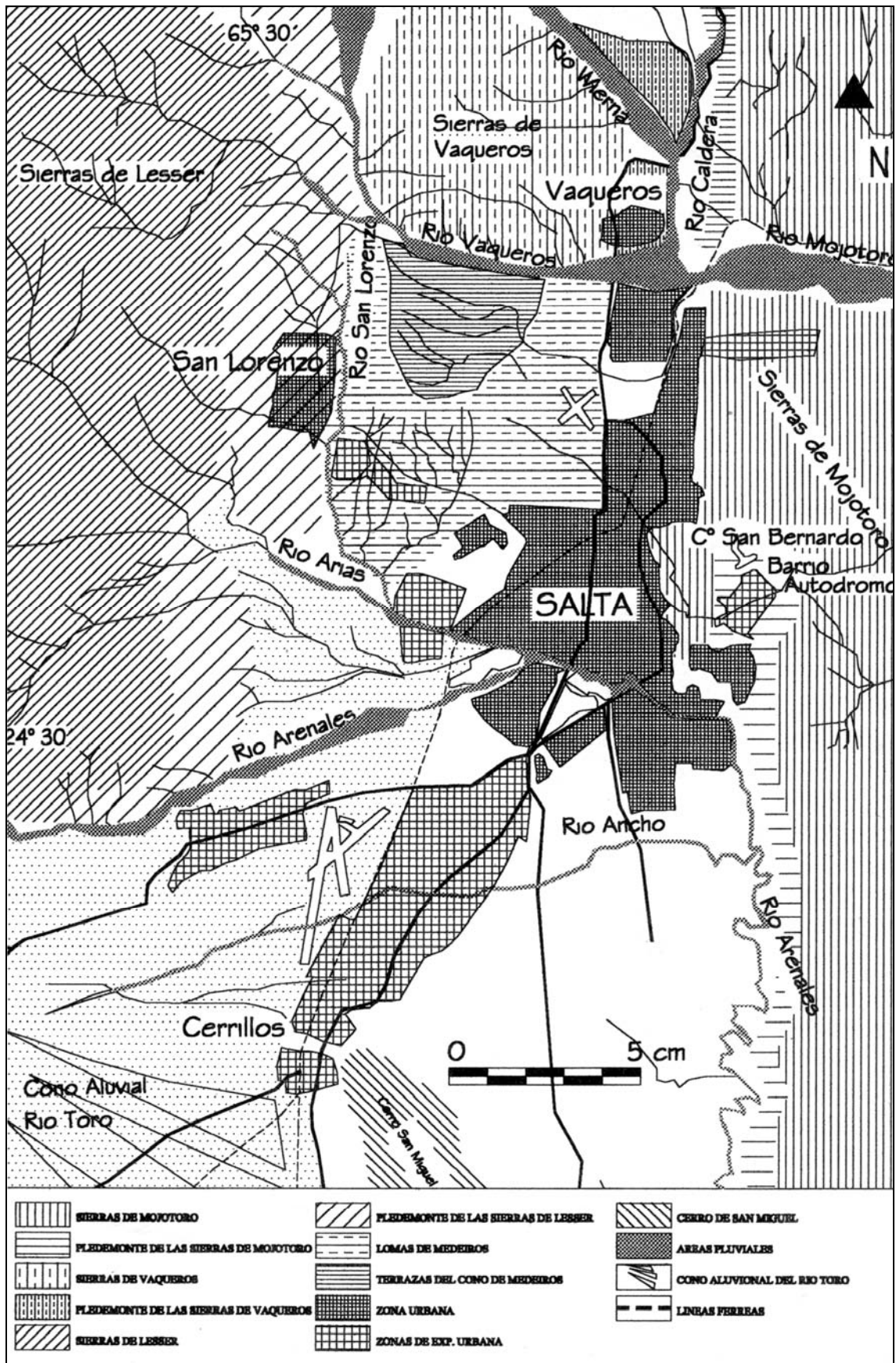
El modelado actual de las cuencas y los patrones de drenaje asociados, son el resultado de procesos del pasado geológico y también del clima actual cuyos flujos de energía controlan la dinámica de la erosión y transporte de sedimentos, que definen

los componentes fundamentales de la morfología fluvial, caso de la dimensión de la planicie de inundación, canales, cauces, patrones de drenaje, el perfil longitudinal y transversal, entre otros.

Como ya se expresó los cursos de agua que integran las cuencas pueden ser sistematizados en base información de campo según diferentes niveles de jerarquía. Para interpretar el resultado de la configuración de la red de drenaje de una cuenca se han desarrollado diversas metodologías de trabajo como las propuestas de Strabler A.N (1952); Leopold, L.B.; 1994; Leopold L.B. y M.G. Wolman (1957), por nombrar solo alguna de las más conocidas; en este trabajo se adopta el esquema desarrollado por Rosgen; D., 1996. Este autor toma en cuenta distintas variables del medio físico, hidrológico y geomórfico, en diferentes escalas según el nivel de jerarquía que implique el estudio.

El esquema de trabajo propuesto por Rosgen, D.; *op cit*; se considera una importante herramienta para analizar y predecir el comportamiento de los ríos del Valle de Lerma. Básicamente se pretende lograr una clasificación con parámetros que permitan realizar un control de las variaciones de su comportamientos y en especial poder interpretar las causas de estas. Un caso preocupante es el incremento del aluvionamiento que registran los cauces, aspecto muy común en los últimos tiempos en toda la provincia. El análisis sistematizado de los ríos proveerá información del contexto físico, hidrológico y geomórfico, para verificar si los desequilibrios son producto de factores naturales y/o antrópicos.

FIGURA 2. UNIDADES GEOAMBIENTALES. Modificado de Marcuzzi et. al. 1994





Como se ha corroborado que los factores de origen antrópico son los que mayor incidencia tiene en la alteración del comportamiento de los ríos, en particular para el Valle de Lerma como consecuencia del incremento de la extracción de áridos, urbanización de subcuencas, deforestación y otras acciones en proceso de evaluación, este trabajo de jerarquización de los corrientes fluviales del Valle de Lerma permitirá contar con una base de información a partir de la cual se puedan ponderar los factores que tienen mayor incidencia en los desequilibrios producidos.

De acuerdo con lo anterior se realiza la sistematización de los ríos que integran la Unidad Geoambiental Fluvial (Marcuzzi *et al.* 1996) del EGU de la Ciudad de Salta, pero dado el marco experimental del trabajo solo se tuvieron en cuenta los cursos de agua más destacados en el entorno del EGU. Los ríos considerados pertenecen a diferentes cuencas, al norte de la ciudad los ríos forman parte de la cuenca del Bermejo y los del sur la del Juramento-Salado (Fig.2). Por el momento se hace abstracción de este aspecto y se analizan los ríos como unidades individuales.

Los ríos que se incluyen en el estudio son: al norte el Caldera, Wierna, Vaqueros y Mojotoro, al sur el Arenales y Arias, y hacia el oeste el San Lorenzo y Potrero (Fig.2). Cursos como el A° Echenique, A° Grand Bourg, río Ancho y otros menores, sin descartar su importancia geoambiental, por el momento no se los considera en el análisis. Por otro lado, si bien el trabajo se restringe al área del entorno urbano, se incluyen los ríos Potrero, Wierna y Mojotoro, porque indirectamente influyen en el geoambiente urbano del Gran Salta (Fig.2).

### 3. MARCO GEOLÓGICO Y UNIDADES GEOAMBIENTALES

La geología (Fig.1) se describe sintéticamente, según los objetivos del trabajo, no obstante más detalles sobre este punto se pueden consultar en Marcuzzi *et al.* en este simposio, lo mismo se sugiere con respecto a las unidades geoambientales (Fig.2).

#### 3.1. Precámbrico Paleozoico Inferior

Las unidades más antiguas corresponden al Precámbrico y Paleozoico inferior (Cámbrico - Ordovícico). El Precámbrico está representado por pelitas y turbiditas de la Fm Puncoviscana (Turner, 1960), débilmente metamorfizadas y con un denso diaclasamiento. En el Cámbrico afloran ortoconglomerados y cuarcitas de color rosado, también facies de areniscas y pelitas, los estratos están menos fracturados y diaclasados que la unidad infrayacente. El Ordovícico, Fm Mojotoro, se compone de bancos de cuarcitas, areniscas y lutitas, también muy diaclasados con buzamiento al oeste. Constituyen el componente litológico de las unidades geoambientales de las serranías de Mojotoro y Lesser.

#### 3.2. Terciario Serranía de Lesser y Pie de Monte

Está representado por Grupo Orán, destacándose la Formación Piquete (Subgrupo Jujuy), constituida por conglomerados gruesos de matriz arenosa y areniscas con contenidos de arcilla de color pardo rojizo, aflora principalmente en la Sra. de Vaqueros y en menor proporción en la Sra. de Lesser. El relieve de la parte norte del valle sufre de un importante fenómeno de neotectónica, que condiciona varios aspectos del paisaje resultante. En el límite sur de la unidad con el río Vaqueros, se observan escarpas de falla que evidencian un control tectónico.

#### 3.3. Cuaternario

De acuerdo con el esquema geológico de Gallardo E. *et al.* 1999, las unidades geoambientales de las Lomas de Medeiros, Área Urbana, de Expansión Urbana y Áreas de Ambiente Fluvial pertenecen al Cuaternario. En las unidades geoambientales consideradas solo afloran las formaciones Tajamar y La Viña, de las tres identificadas como Cuaternario Temprano y luego el Cuaternario Tardío indiferenciado que constituye la parte norte Lomas de Medeiros, el pie de monte de la Sras. de Lesser y Mojotoro y los depósitos de cauce de las unidades fluviales. (Fig. 1). Predominan sedimentos de facies clásticas poco consolidadas de ambientes fluviales y también lacustres y palustres.

### 4. METODOLOGÍA

Se realiza una caracterización geomórfica de los ríos que forman parte de la Unidad Geoambiental Fluvial del Valle de Lerma, Marcuzzi *et al.* en este simposio, en este caso restringida al EGU de la ciudad de Salta, según la metodología propuesta por Rosgen D., 1996. El esquema propuesto por este autor consiste de cuatro niveles de valoración, que abarcan desde la escala de cuenca hasta detalles específicos de los cauces, con el propósito de asociar cursos de agua con similares características. Cada nivel se relaciona con ciertas variables en base a procesos morfológicos, que definen las características de un río. Es decir que el grado de complejidad del análisis para establecer una jerarquización de la morfología fluvial depende del nivel de estudio considerado, que puede abarcar desde aspectos regionales hasta pequeños detalles locales.

Para el Nivel I se tienen en cuenta aspectos geológicos y geomorfológicos de la cuenca del Valle de Lerma, y de los valles secundarios; esto implica una escala gruesa o regional, luego se incorporan en el estudio parámetros de detalle a una escala menor, como la descripción morfológica del cauce, canales, sus dimensiones, encajonamiento, perfil transversal, tipo de sedimentos y otras relaciones.

En el presente trabajo dado que tiene carácter experimental solo se trabaja en el Nivel I; donde se tienen en cuenta aspectos de la geología regional y las características geomórficas del relieve actual de la cuenca, además de las geoformas asociadas en el modelado, especialmente los tipos de valles por el que drenan los ríos objeto del análisis. También se analizó la bibliografía disponible, no muy abundante en la temática fluvial, pero dada la relativa simpleza de la información necesaria para esta etapa, la captura de la misma se basó principalmente en trabajos de campo y análisis de imágenes satelitales.

En síntesis el Nivel I, además de aspectos geológicos regionales como el relieve, la litología, los procesos fluviales actuantes, la deposición de materiales, la influencia del clima y las zonas bióticas presentes, tiene en cuenta parámetros morfológicos de los ríos como el perfil longitudinal y transversal, diseño en planta de los cauces, pendiente del valle y del cauce, y otros ya mencionados. La información capturada se analiza mediante gráficos y tablas, que por razones de espacio no se las incorpora en el trabajo, de la que resulta el tipo de cauce de los ríos y el valle fluvial asociado. Los cauces comprenden nueve categorías (Aa+; A, B,C,D,DA,E,F y G) y los valles once, de la I a la XI.

Los Niveles II, III y IV, comprenden una evaluación en base a detalles más específicos que permiten definir múltiples aspectos geoambientales, incluidos los bióticos, y así analizar situaciones anómalas en la evolución de los ríos. En resumen el



sistema de clasificación fue desarrollado para establecer una metodología de análisis integral en la que se contemplan parámetros geológicos y biológicos, que posibilita una clasificación sistemática de los ríos y sus características geoambientales para un manejo racional de los mismos.

## 5. CLASIFICACIÓN DE LOS CURSOS DE AGUA

Se parte del concepto que el paisaje de una cuenca es el resultado de procesos erosivos y deposicionales, producto de la interacción compleja de la geología con el clima, que es un factor dinámico en el tiempo y cuya influencia sobre la litología define el tipo de cobertura vegetal, ambos factores condicionan los procesos de modelado. En el esquema de trabajo para la caracterización geomórfica de los cursos de agua y tipo de valle asociado, según el Nivel I, se tuvieron en cuenta los siguientes parámetros:

- El gradiente del valle y del cauce, relación que influye en la sinuosidad de los cauces. De la sinuosidad resultan los patrones de la trama de drenaje de los canales, que se definen en: simples, múltiples, anastomosados o sinuosos.
- Forma del perfil transversal del cauce y el valle asociado, relación de la que se obtiene el grado de encajonamiento del cauce. También se incluye la correspondencia entre el encajonamiento o estrechos del cauce y profundidad del mismo, comparada con la relación entre amplitud y profundidad del canal.
- Morfología de los cauces de acuerdo con su vista en planta. Esto se obtuvo mediante una comparación gráfica de un esquema sobre formas de cauces mayores.
- Tipo de valle asociado, que resulta de la naturaleza geológica e intensidad de los procesos erosivos y deposicionales en la cuenca. Estos se pueden observar en la Fig. 3.

Luego de evaluados los parámetros antes mencionados resulta la siguiente clasificación de los ríos seleccionados, así tenemos:

*Río Potrero:* Se caracteriza por poseer una pronunciada pendiente mayor del 10%, de lo que resulta un cauce escalonado y medianamente encajonado, según la relación de ancho - profundidad; y la relación de sinuosidad que resulta de la pendiente del valle. El relieve circundante es vigoroso con grandes desniveles, que dan lugar a importantes procesos laterales de carácter erosivo y/o deposicionales, posee alta potencialidad de generar corrientes de escombros (Debris flow). Presenta suelos deposicionales de textura gruesa. En los canales dominan texturas gruesas, desde bloques a gravas gruesas. Se suaviza antes de penetrar en el Valle de Lerma, por lo que a criterio de los autores posee una doble clasificación. *Clasificación del Cauce Tipo A* para el tramo inferior y *Tipo Aa+*, para el tramo superior, con *Valle Tipo I* El río Potrero corresponde a la alta cuenca de lo que luego corresponde al río Arenales, Fig. 3.

*Río Wierna:* Este es un afluente del río Caldera sobre el que ejerce considerable influencia en varios aspectos de la dinámica fluvial de su receptor. Drena por la Sra. de Vaqueros con fuertes pendientes, por lo que el cauce presenta variaciones en el tramo superior e inferior. El gradiente es fuerte a moderado, presencia de canales secundarios poco

sinuosos y con perfil transversal variable con las crecientes. Se caracteriza por la presencia de materiales aluvionales gruesos típicos de las fuentes de aporte. En el tramo inferior se suavizan las pendientes, adquiriendo una dinámica de tipo deposicional, por lo que corresponde una clasificación dual, el tramo superior del cauce puede considerarse de *Tipo A*, y la parte inferior *Tipo B*. El valle asociado es de *Tipo V*.

*Río San Lorenzo:* Relieve moderado con valle poco amplio de pendiente fuerte en las cabeceras, que disminuye en el tramo medio, está asociado a una planicie de inundación no muy amplia pero importante desde el punto de vista local. Tiene bancos de sedimentos gruesos y suelos aluviales, asociados a suelos finos en el bed rock. En el relieve dominan depósitos coluviales y existe control estructural. Posee de bajo a moderado encajonamiento del cauce y una baja relación amplitud profundidad del canal. Corresponde un cauce de *Tipo C* y valle *Tipo VI*.

*Río Caldera:* Similar al río Wierna, la diferencia se presenta en que el encajonamiento del cauce es menor y tiene una planicie aluvial más amplia, pero con pendientes inferiores, por lo que los depósitos de sedimentos gruesos, son de granometría menor. El valle presenta un considerable aluvionamiento, con considerable transporte de carga sedimentos gruesos hacia el sector del EGU, Fig 2. Posee control estructural. Le corresponde un cauce del *Tipo C*, con valle *Tipo V*.

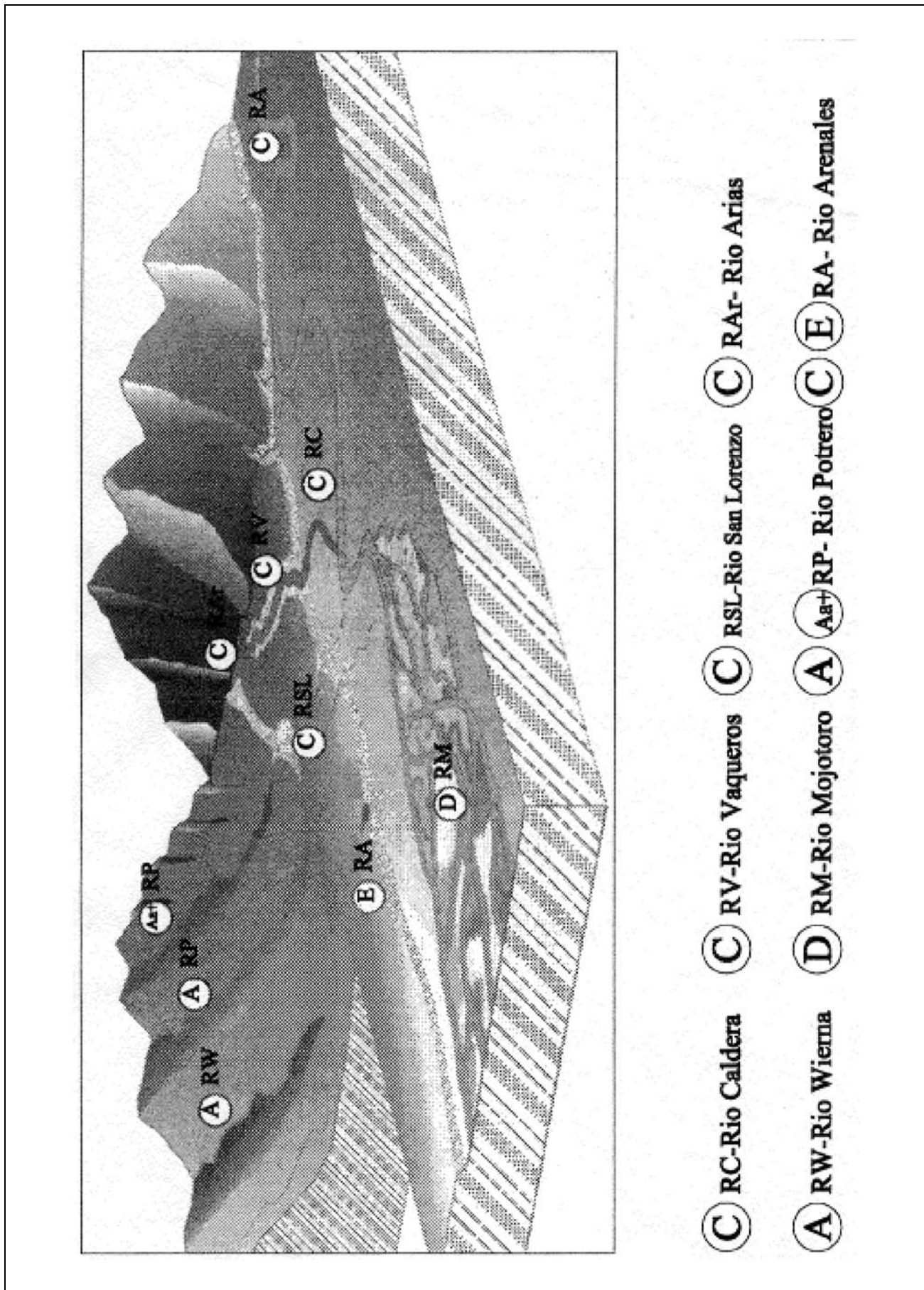
*Río Vaqueros:* Moderadamente encajonado en sus comienzos, aguas abajo se ensancha el cauce, gradiente del 4% o más; presenta varios canales de corrientes. Diseño de cauce y perfil transversal estables. Presenta una planicie de inundación bien definida, con presencia de canales secundarios pequeños y de importantes bancos de depósitos. Posee control estructural. El cauce es de *Tipo C* y valle *Tipo V*.

*Río Arenales:* Se deben considerar dos partes diferentes del tramo, superior e inferior, el primero corresponde al *Tipo C*, de moderado a bajo gradiente, diseño de cauce y perfil transversal estables. El encajonamiento con el relieve no existe pero hay un control estructural que impide una migración hacia el sur, la tendencia es hacia el norte. El tramo inferior corresponde al *Tipo E*, de bajo gradiente con formación de canales de baja energía de transporte y charcas, escasa deposición de sedimentos y alta relación de meandros. Presenta llanura de inundación definida, que en el tramo de *Tipo C* no existe y bancos de sedimentos bien vegetados. Ambos tramos reflejan la influencia de un control estructural. Se tiene un tramo superior de *Tipo C* y el inferior de *Tipo E*. El valle en el tramo superior es del *Tipo V* y para el tramo inferior al *Tipo VIII*.

*Río Arias:* Las características son similares a la del río Arenales para su tramo superior, el tramo inferior ha sido canalizado. Posee un cauce de *Tipo C* y valle *Tipo V*.

*Río Mojotoro:* Posee canales tipo Braided, con depósitos de barras longitudinales y transversales, canal ancho con bancos erosionables. El valle es amplio con activos procesos de ajustes laterales y control estructural. Procesos agradacionales y erosión de bancos. Responde a cauce de *Tipo D* y valle *Tipo IX*. La clasificación resultante se grafica en la Fig. 3, cabe aclarar que la misma es modificable en base a la incorporación de nuevos parámetros.

FIGURA 3. ESQUEMA DE CLASIFICACIÓN DE LOS RÍOS NIVEL 1. Extraído de Rosgen D. 1996



## 6. ASPECTOS PRÁCTICOS

La metodología propuesta para el análisis y clasificación de los ríos permite contar con una herramienta rápida, de relativa sencillez para definir diferentes niveles de detalle de los aspectos morfológicos y geomórficos de los ríos, que pueden ser aplicables al estudio y control de múltiples problemas de los sistemas fluviales. Cuando se disponga de mayor información y se logre avanzar hacia los niveles de clasificación más complejos (Niveles II, III y IV) se podrá evaluar los efectos de impactos geoambientales como es el caso de la extracción de áridos, actividad de la cual no se tiene en la actualidad un diagnóstico de la magnitud de los desequilibrios que genera en la evolución de los cursos fluviales y las cuencas asociadas.

Lo antes expresado permitirá en el ámbito provincial, elaborar parámetros prácticos para la Ley Nacional Ambiental Minera N° 24.585, en lo referido a los instructivos de los Informes de Impactos Ambientales exigibles para la extracción de áridos. Es decir que la normativa podrá ser reforzada por disposiciones complementarias basadas en las caracterización del geoambiente fluvial, específicamente teniendo en cuenta los parámetros conflictivos de cada río, de esta manera cuantificar la potencialidad de riesgos antrópicos y geológicos y conocer las limitaciones de los mismos.

La metodología resultante podrá extrapolarse a otras regiones geográficas con el mismo propósito, además servir para realizar caracterizaciones de hábitats biológicos con el propósito de potenciar el aprovechamiento de recursos ictícolas. Su empleo en la planificación de urbanizaciones ribereñas y proyectos de infraestructura que no signifiquen alterar la evolución normal de los sistemas fluviales.

## 7. CONCLUSIONES

No obstante el carácter experimental del presente trabajo, que solo se desarrolla en el Nivel I, en función de la información

disponible El método se considera como una importante herramienta para realizar un inventario y jerarquización de los ríos del Valle de Lerma, extrapolable al resto de la provincia que permitirá realizar un control expeditivo de los problemas geoambientales de los ríos, relacionados con aspectos naturales o derivado del accionar del hombre.

Se podrá elaborar un banco de datos para integrar información de base de las cuencas y subcuencas, presentes en una comarca, como tipos de valle tipos de cauce asociados, establecer singularidades de las divisorias de aguas, su relación con temas bióticos, turísticos y optimización del uso de los recursos hídricos.

Se considera de suma importancia, para definir una jerarquización definitiva, llegar a los niveles que consideran en el análisis la influencia de los patrones de cobertura vegetal, cambios de flujo, procesos erosivos y deposicionales para interpretar el sistema de modelado fluvial de la cuenca y de cada tipo de río en particular.

El Nivel I de análisis, que se desarrolla en este trabajo permite tener una interpretación aproximada de las características de la cuenca, tipos de ríos y valle asociados, donde se destaca el valor de la información que aportan las formas del relieve y la morfología de los ríos, entre las divisorias de agua, subcuencas y/o tipos de valle. Aunque la información que se procesó en este trabajo sea la mínima específica.

Hasta el punto en que se avanzó en la presente investigación existe un alto grado de correspondencia con la propuesta metodológica del autor. No obstante se considera que deben realizarse algunas modificaciones adaptables a las particularidades del medio local, en base a factores de base que definen el tipo de geoambiente, como geología, clima y biota.

## 8. TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

- AYALA CARCEDO, F. Y J. JORDÁ PARDO, 1988.  
Geología Ambiental.  
*Inst. Tecnológico Geominero de España, pp 257, Madrid.*
- BIANCHI, A.R. Y C.E. YAÑEZ, 1992.  
Las Precipitaciones en el Noroeste Argentino.  
*INTA, SAGyP, Estación Experimental Agrop. Salta, 383 pp., Salta.*
- FERRARY, M., MARCUZZI, J.J. Y O. BARROS, 1994.  
Ordenamiento y Sistematización Geoambiental del Tramo Urbano del Río Arenales, Ciudad de Salta, R. Argentina.  
*7º Congr. Geol. Chileno, Vol.1:623-62, Concepción.*
- GALLARDO, A., MARCUZZI, J.J. Y R. ARGANARAZ, 1994.  
Neotectónica del Espacio Geológico Urbano (EGU) de Salta, Argentina, I: Entorno Subregional del Valle de Lerma.  
*7º Cong. Geol. Chileno, Vol. 1:294-298, Concepción.*
- GALLARDO, E.; AGUILERA, N.; DAVIES D. Y R. ALONSO; 1997.  
Estratigrafía del Valle de Lerma, Provincia de Salta, Argentina.  
*Memorias del XII Cong. Geol. de Bolivia, Tarija pags. 483-493.*
- LEOPOLD, L.B.; 1994.  
A View of the River.  
*Harvard University Press, Cambridge, Mass.; pp 298.*
- LEOPOLD, L.B Y M.G. WOLMAN; 1957.  
River Channel Patterns: bridged, meandering and straight.  
*U.S. Geological Survey Prof. Paper 282-B.*

- MALAMUD, B.; JORDAN, T.; ALONSO, R.; GALLARDO, E.; GONZÁLES, R. Y S. KELLY; 1996.  
Pleistocene Lake Lerma, Salta Province, NW Argentina.  
*XIII Cong. Geol. Arg. y III Cong. de Exploración de Hidrocarburos, Actas IV: 103-114. Buenos Aires.*
- MARCUZZI, J.J., ARGANAÑARAZ, R. Y J. BEJERMAN, 1994.  
Bases para el Ordenamiento Urbano del Gran Salta. Salta, R. Argentina.  
*7º Cong. Geol. Chileno, Vol. I:648-652, Concepción.*
- MARCUZZI, J.J.; NADIR, R.; ALONSO, R.N.; PERALTA, C. Y R. ARAGAÑARAZ, 1996.  
Riesgos Geoambientales y Ordenamiento Territorial del Gran Salta.  
*XIII Cong. Geol. Argentino y III Cong. de Exp. de Hidrocarburos, Actas IV: 463-479. Buenos Aires.*
- MARCUZZI, J.J.; TORREJÓN D.; PERALTA M. Y N.J. BEJERMAN; 1998.  
Caracterización Geotécnica de la Unidades Geoambientales del Espacio Geológico Urbano (EGU) del Gran Salta, Salta Argentina.  
*Revista de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente.. Nº 12:69-84.*
- ROSGEN, D. 1996.  
Applied River Morphology.  
*Wildland Hydrology, Colortado USA.*
- RUIZ HUIDOBRO, O.J., 1968.  
Descripción Geológica de la Hoja 7e, Salta. Prov. de Salta y Jujuy.  
*Buenos Aires, Instituto Nac. de Geología y Minería, Boletín 109.*
- STRAHLER, A.N. Y A.H. STRAHLER; 1997.  
Geografía Física.  
*Ed. Omega, Barcelona. 3ra. Edición, pp553*



## Características geológicas y geotécnicas de la vertiente oriental andina en la provincia de Tucumán

Mon, Ricardo <sup>1</sup> - Eremchuk, Jorge E. <sup>2</sup> - Minetti, Juan L. <sup>3</sup>

### Resumen

*Al pie de la vertiente oriental andina en la provincia de Tucumán Entre los 26°30' y 28°00' latitud sur, se encuentra un área densamente poblada, expuesta a fenómenos de erosión, inundación, remoción en masa y aluviación que se originan en la ladera montañosa. Esta alcanza una altura próxima a los 4500 m con respecto a la llanura aladaña. Sobre su parte más baja inmediatamente aguas arriba de la franja poblada precipitan más de 2000 mm anuales, con una alta concentración en la temporada estival, entre los meses de diciembre y marzo. Son frecuentes las precipitaciones de más de 100 mm en 24 horas e incluso se dan aisladamente intensidades de 100 mm por hora. Esta situación natural en la que se combinan empinadas pendientes e intensas lluvias impone severas condiciones a la urbanización y a las obras de infraestructura. La deficiente adaptación de las obras e instalaciones humanas a estas condiciones ha desembocado en grandes pérdidas materiales e incluso de vidas humanas, en episodios que se repiten anualmente. Las precipitaciones alimentan una densa red fluvial que forma un gran abanico de ríos que desembocan en un solo punto originando el río Dulce. La franja más poblada está situada justamente al pie de la ladera montañosa donde se producen las lluvias más intensas y donde los ríos al salir del relieve montañoso tienden a expandirse y a divagar sobre la llanura. Las ciudades y pueblos están amenazados por el agua que corre libremente por las laderas montañosas, que frecuentemente incluye significativas cargas sólidas, y por los desbordes y desvíos de los ríos. Las vías de comunicación deben sortear ríos que experimentan crecientes que frecuentemente centuplican o más sus caudales medios, fuera de zonas de deslizamiento de laderas y de avalanchas de detritos. De acuerdo a estas exigentes condiciones naturales es necesario destacar que los proyectos de obras de infraestructura y los asentamientos humanos no pueden seguir haciéndose sin la ejecución de cuidadosos estudios previos.*

### 1. INTRODUCCIÓN

Al pie de la vertiente oriental andina de la provincia de Tucumán se desarrolla una de las áreas agrícolas e industriales más importantes del noroeste argentino, con una alta densidad

de población agrupada en ciudades y pueblos de significativa importancia, que en conjunto tienen más de un millón de habitantes. Entre ellas se encuentra la ciudad de Tucumán.

Desde el punto de vista del relieve este segmento de la vertiente oriental de los Andes, alcanza desniveles que superan los 4500 m. Sobre esta pronunciada rampa topográfica que actúa como una barrera climática Las lluvias que caen en los faldeos orientales llegan en algunos casos a 2000 mm anuales, concentradas en pocos meses del verano (diciembre a marzo) (Poblete y otros, 1989).

En este escenario de elevadas pendientes e intensas lluvias el escurrimiento superficial genera procesos de inundación, erosión y sedimentación que repercuten intensamente sobre la franja poblada situada al pie de la sierra. Los variados mecanismos

Entregado: 12 de Abril de 2002 ■ Aceptado: 17 de Mayo de 2002

1. Facultad Ciencias Naturales e IML, Universidad Nacional de Tucumán, Miguel Lillo 205, 4000 Tucumán, Argentina.  
E-mail: monr@satlink.com

2. Departamento de Geología, Universidad Nacional de Catamarca, Maximio Victoria 55, 4700 Catamarca, Argentina.  
E-mail: quele@arnet.com.ar

3. Fundación Carl: zon Caldenius, Padre Roque Correa 1237, 4000 Tucumán, Argentina.  
E-mail: minetti@millic.com.ar

que operan afectan, muchas veces de forma catastrófica, a la infraestructura vial y urbana como así también a las obras hidráulicas, eléctricas y conductos, con graves consecuencias para los habitantes de la región. Son frecuentes las pérdidas de vidas humanas y los daños económicos son muy significativos. Hacia el este de la zona montañosa se extiende una llanura topográficamente deprimida y de muy baja pendiente donde el lento escurrimiento superficial y los acuíferos libres (freáticos) altos favorecen las inundaciones.

En este artículo se hace una descripción de los materiales que componen la ladera montañosa, de los procesos geológicos que la modifican y la incidencia que estos tienen sobre las instalaciones humanas y las obras de infraestructura. Por otra parte se intenta señalar cuales son las áreas de mayor riesgo frente a los aluviones y a los movimientos en masa. Debe destacarse que aquí se trata de llamar la atención sobre fenómenos que por su complejidad y extensión, requieren estudios muchos más profundos con el concurso de especialistas en geomorfología, climatología, suelos, hidrología.

## 2. RELIEVE

Las mayores altitudes en las cabeceras de los ríos que fluyen por la vertiente oriental andina de este sector alcanzan los 5000 m. Éstas corresponden a un sector de la sierra de Aconquija, enfrentado aproximadamente con las ciudades de Monteros, Concepción - Villa Quinteros. El área situada por encima de los 4000 m ocupa una superficie considerable (figura 1). En este lugar los ríos Solco, Conventillo y sus afluentes descienden 4500 m en aproximadamente 30 km en línea recta, lo que implicaría una pendiente general de la ladera del orden del 15%. Hacia el norte y hacia el sur de este sector las pendientes son menores (figuras 1 y 2.). Cabe destacar que la depósitos de una plataforma con grandes rodados, a la que nos referimos más adelante, coincide con este sector de elevada pendiente de la ladera montañosa. Además la parte del pie de sierra enfrentado con esta área de grandes altitudes es el que sufre los mayores problemas derivados de la acción fluvial.

La línea de nivel de los 1000 m muestra la configuración del frente montañoso y la de 350 m indica la forma de la depresión topográfica hacia donde fluyen todos los ríos de la vertiente oriental andina que finalmente desembocan en el río Dulce.

Hacia el este del quiebre de pendiente que se produce en el pie de sierra entre los 700 y 1000 m, el terreno desciende lentamente hasta alcanzar altitudes menores de 300 m, en la zona del cauce bajo del río Salí y sus afluentes. Esta zona deprimida y de muy baja pendiente, delimitada aproximadamente por la línea de nivel de 300 m es proclive a las inundaciones durante las lluvias del verano, donde los ríos no logran evacuar los grandes caudales que reciben. Fuera de ello el flujo natural del agua ha sido alterado por obras de infraestructura tales como terraplenes de ferrocarriles y rutas. Además la construcción del embalse de Río Hondo sobre el colector principal de esta región que es el río Dulce ha elevado considerablemente el nivel de base de la desembocadura de los ríos disminuyendo aún más su pendiente.

## 3. HIDROGRAFÍA

La red de drenaje de la llanura de Tucumán tiene forma similar a un gigantesco embudo que desemboca en el río Dulce (figura 3). Se trata de una cuenca prácticamente cerrada con una única salida por el valle del río Salí-Dulce implantado entre el extremo norte de la sierra de Guasayán y el alto topográfico de Mujer Muerta (Figura 3). Todos los ríos que componen esta red fluvial nacen en las cumbres montañosas y descienden por la ladera oriental andina antes de ser colectados por los ríos mayores, el Salí y posteriormente el Dulce (Figura 3). Durante las lluvias estivales estos ríos, que tienen caudales muy bajos en la estación seca, experimentan grandes crecientes, que ocasionalmente tienen efectos catastróficos sobre la infraestructura vial y urbana. Por ejemplo, el río Dulce, colector principal de la cuenca que tiene un caudal medio anual del orden de los 80 m<sup>3</sup>/segundo, ha registrado crecientes que han alcanzado los 2800 m<sup>3</sup>/segundo durante la temporada estival 1932-1933; el río Marapa con caudal medio anual del orden de los 6 m<sup>3</sup>/seg. registra una creciente de 254 m<sup>3</sup>/seg. en la temporada 1947-1948. Todos los ríos para los cuales existen registros muestran panoramas similares.

## 4. PRECIPITACIONES

Una parte de la ladera montañosa oriental recibe precipitaciones anuales que llegan alrededor de los 2000 mm. La mayor precipitación mensual se registra en el mes de enero. En cambio el mayor volumen de escurrimiento superficial se observa en marzo una vez que el suelo ha colmatado su capacidad de absorción de agua estival y la napa freática alcanza su nivel más cercano al suelo (*Minetti y otros, 1979*).

El área en la que precipitan más de 1600 mm anuales se encuentra aguas arriba de la franja más densamente poblada de la provincia que de cualquier modo recibe directamente entre 1000 y 1500 mm anuales tal como se ve en la figura 4. Por arriba de los 1100 m de altitud donde se ubica la óptima pluvial las precipitaciones decaen rápidamente (*Minetti, 1975*). De acuerdo a esta distribución de las lluvias resulta evidente que las ciudades y pueblos más importantes del área están ubicados en la zona de mayor pluviosidad de lo cual derivan las mayores situaciones de riesgo. Por otra parte toda esta franja está incluida en el área en la que caen ocasionalmente lluvias de más de 100 mm en 24 horas. También es importante resaltar que si bien estas tormentas representan a datos puntuales de gran intensidad, precipitaciones de gran volumen caídas en 24 hs en superficies del orden del 10% de la provincia de Tucumán, tienen una recurrencia de una vez en 10 años (*Minetti y Flores, 1978*). Por otra parte existen datos aislados sobre impactos ocasionados por intensidades de lluvias del orden 100 mm por hora en el sur de Tucumán (*Bravo et. al. 1999*). Estas intensidades representarían el umbral por encima del cual se generan flujos sólidos en los ríos que tienen en sus lechos la pendiente y la carga sólida suficientes como para que ello ocurra.

## 5. GEOLOGÍA

La geología de la vertiente oriental andina ha sido objeto de numerosos estudios desde la últimas décadas del siglo XIX hasta la actualidad, sus rasgos principales han sido representados en cartas geológicas publicadas en diferentes épocas. La mayor parte de los estudios estuvieron dirigidos al sustrato rocoso, a los materiales superficiales, que forman parte de la cubierta cuaternaria y que tienen relevante importancia a los fines de este estudio, se les ha prestado menor atención (Figura 5).

FIGURA 1. MAPA TOPOGRÁFICO

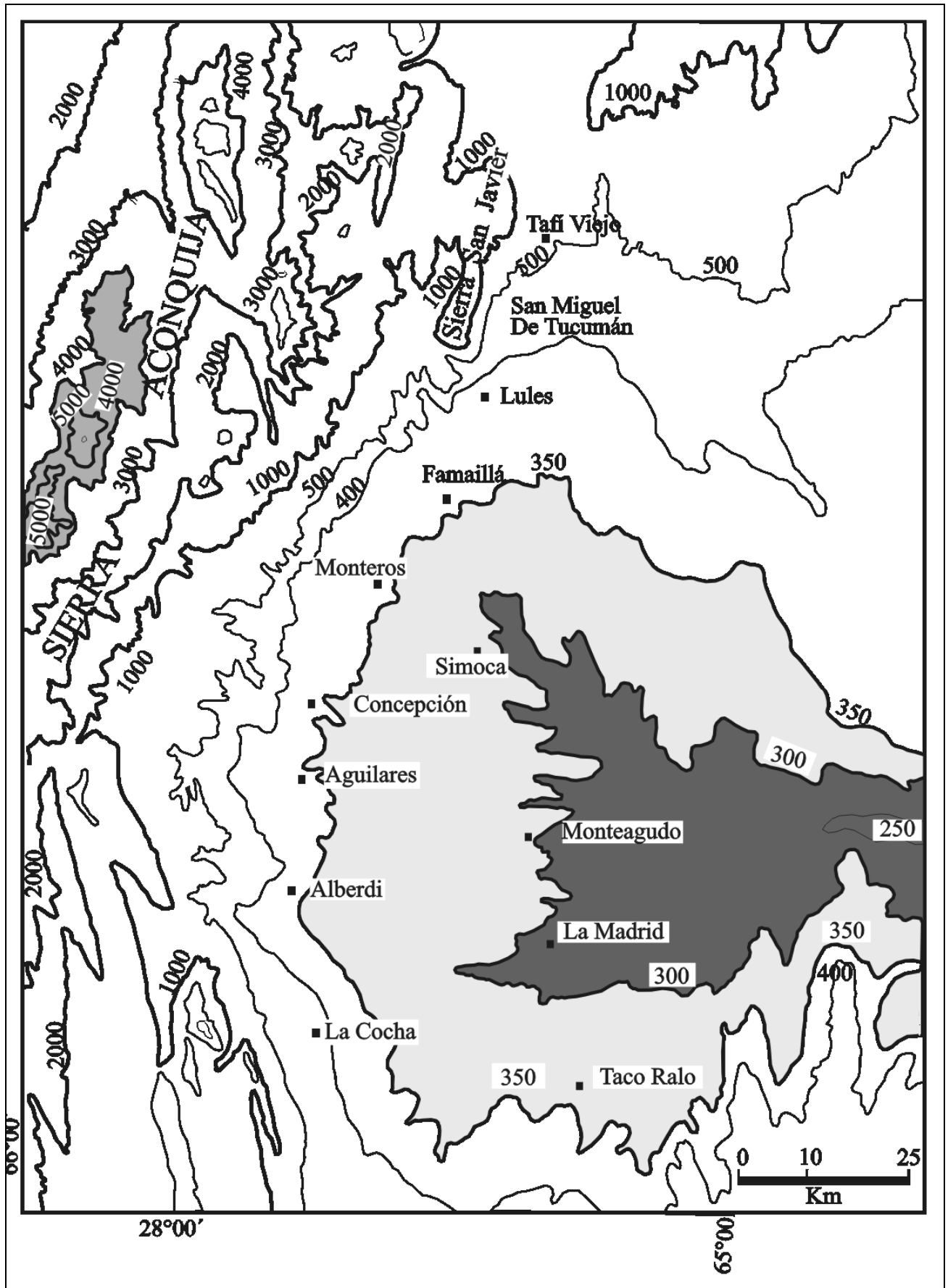


FIGURA 2. PERFILES TOPOGRÁFICOS

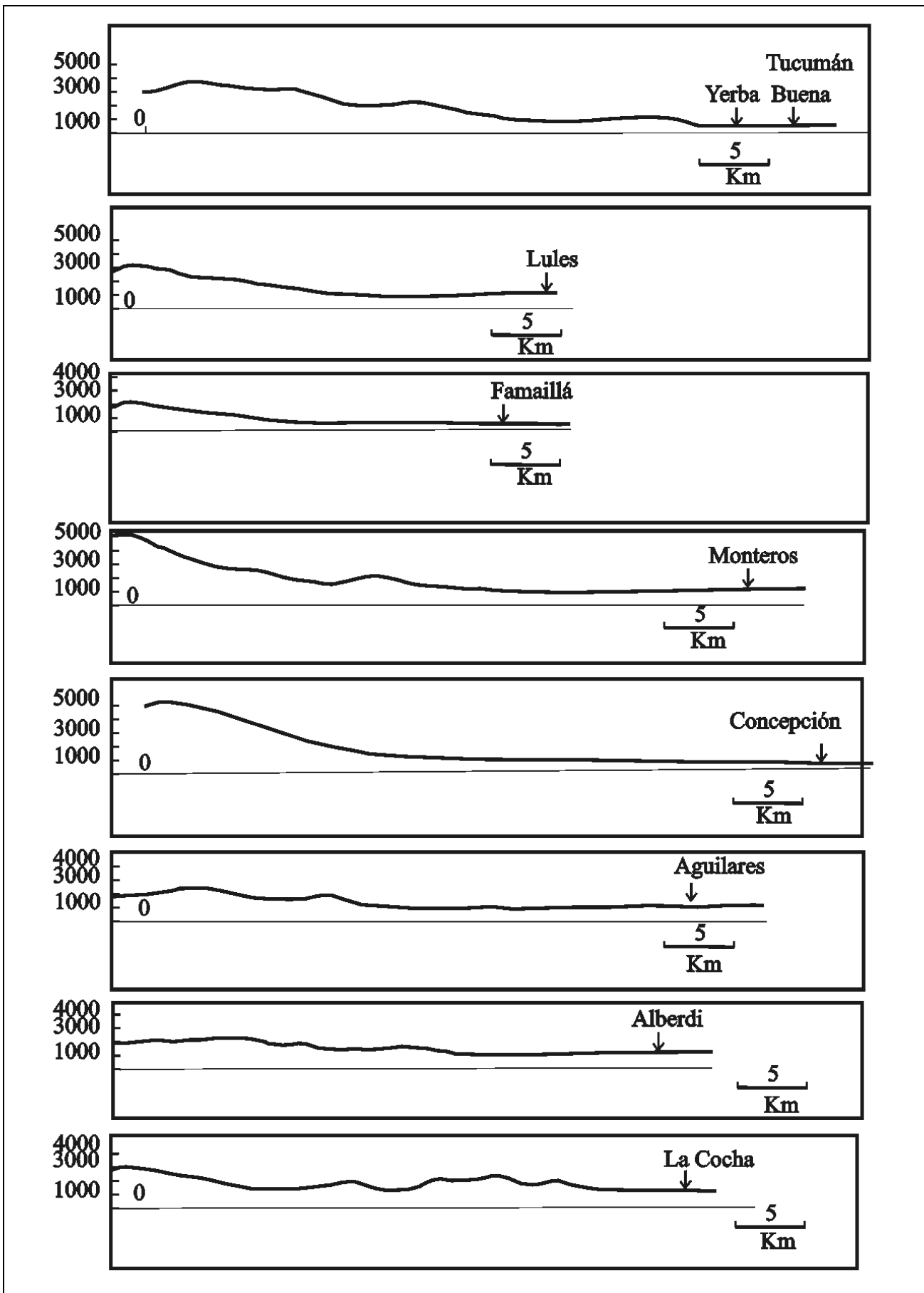




FIGURA 3. DRENAJE

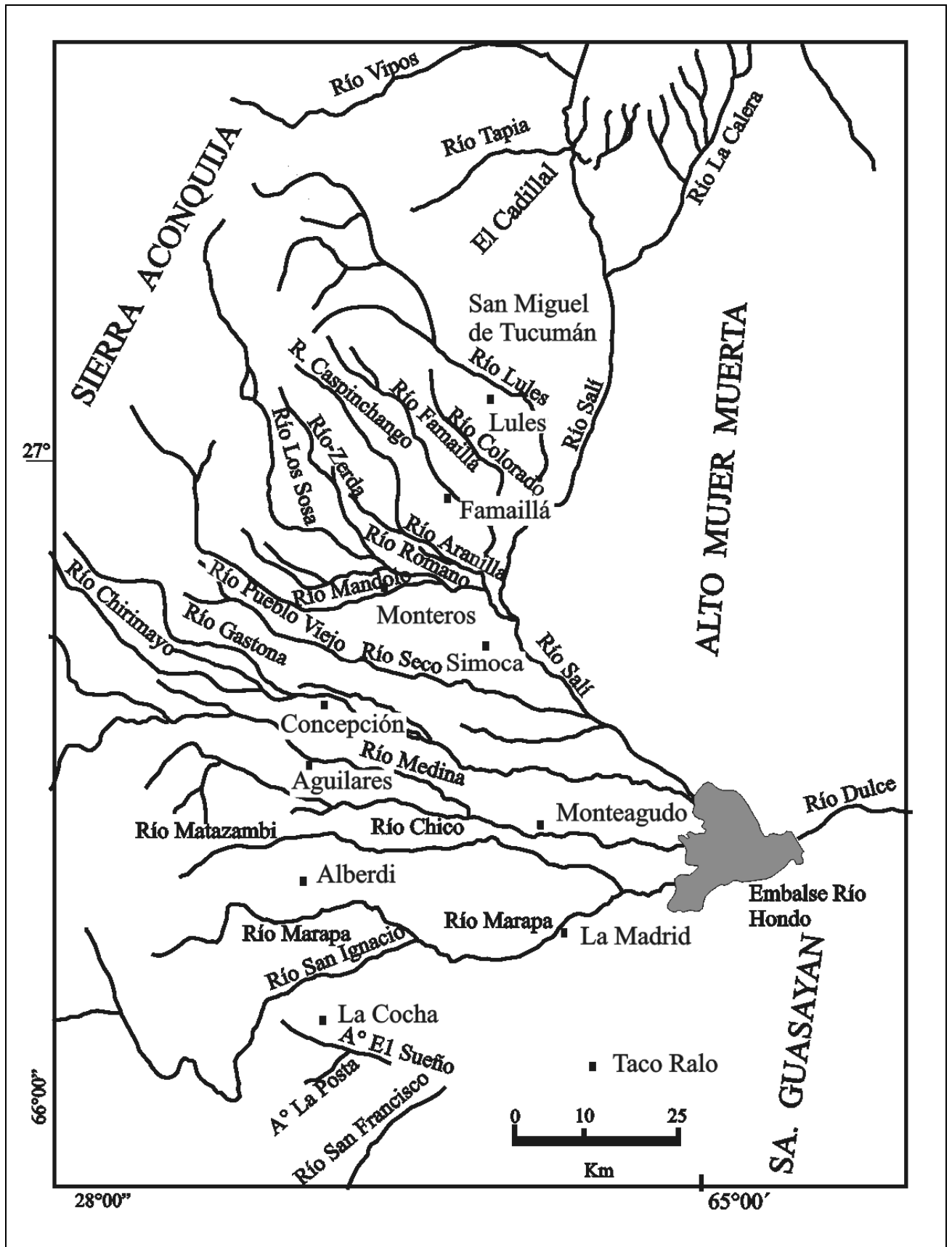


FIGURA 4. ISOHIETAS

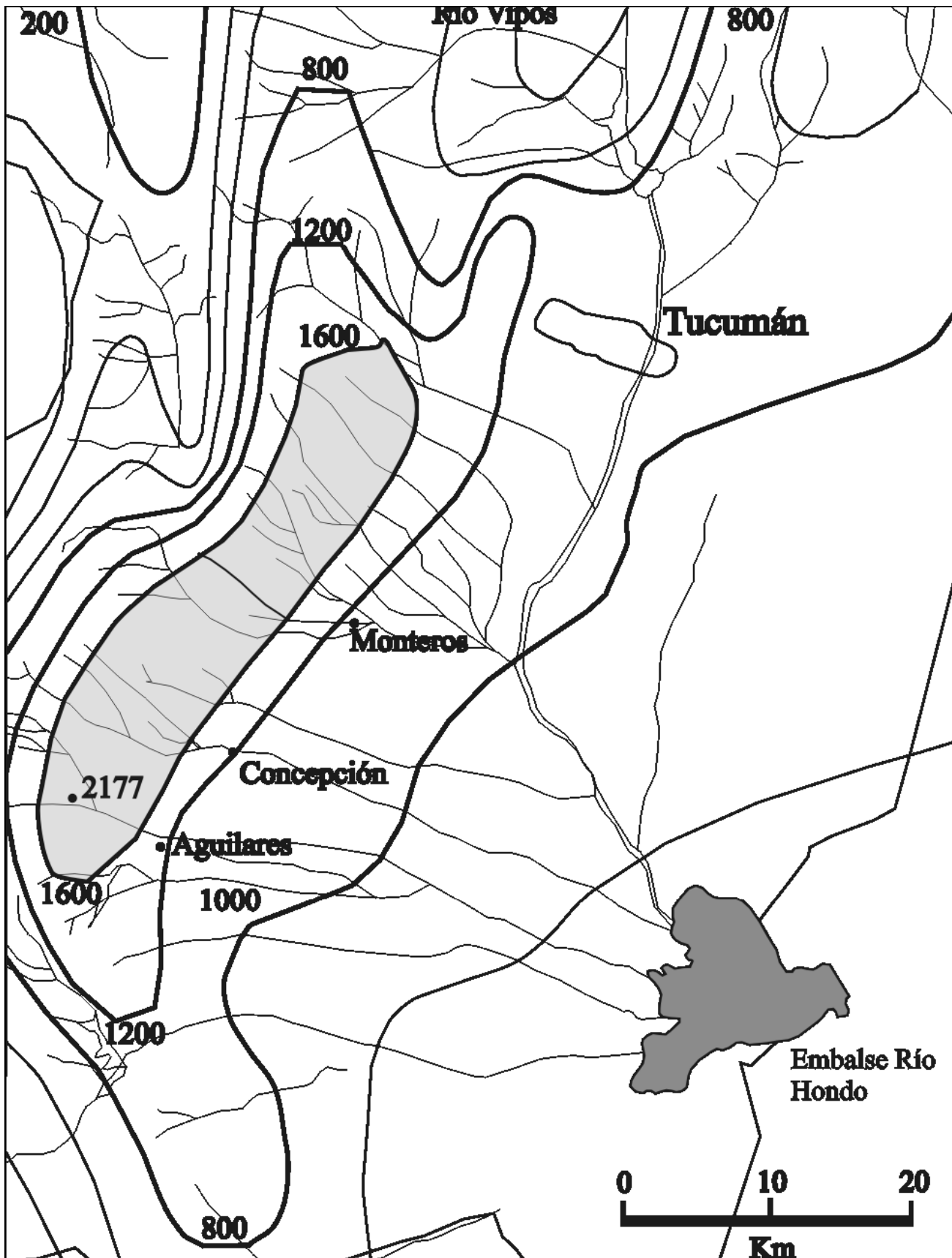
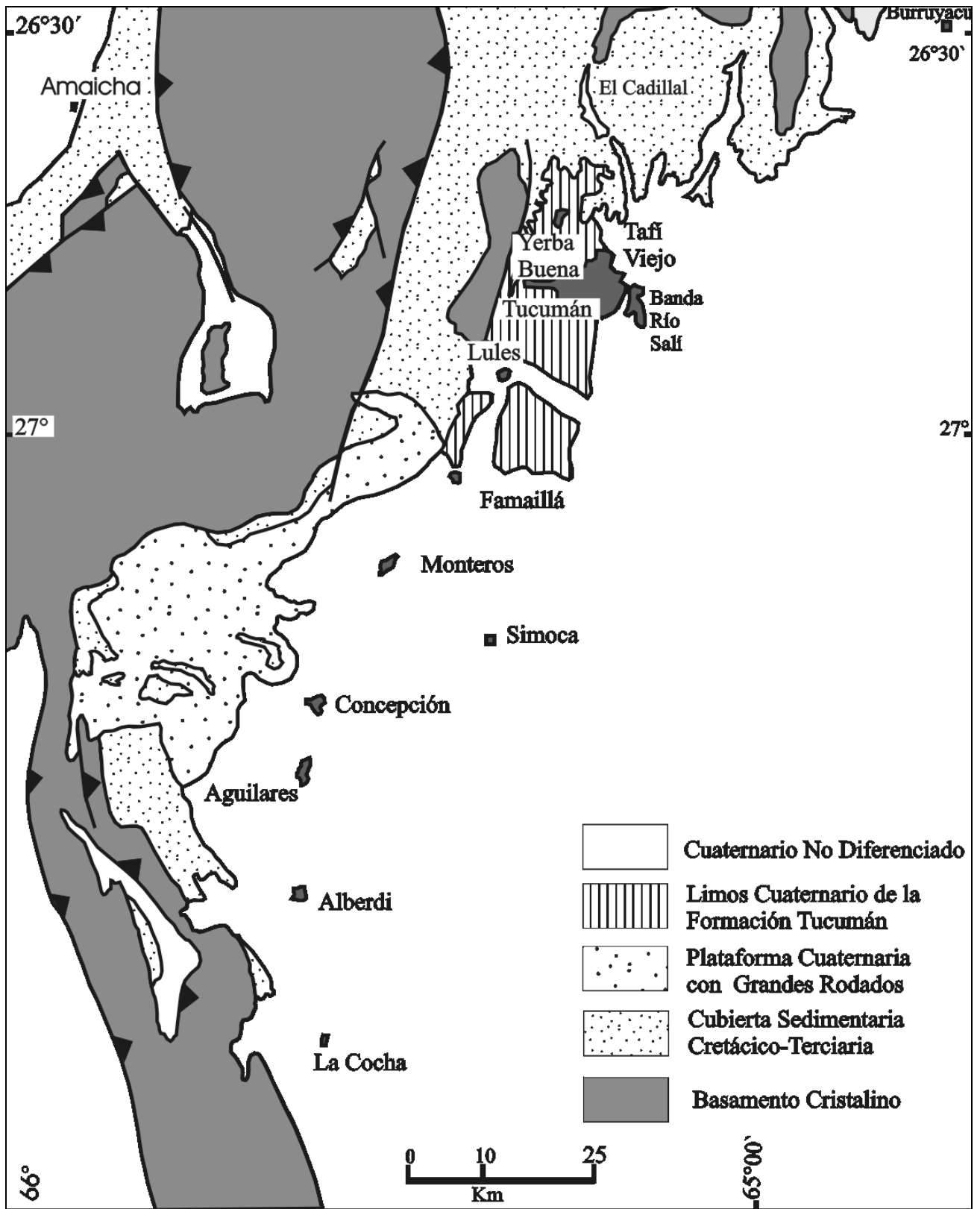


FIGURA 5. MAPA GEOLÓGICO



## Geología del sustrato rocoso

### *Basamento cristalino*

La mayor parte de las montañas de este segmento de los Andes están formadas por gneises y granitos afectados por extensas zonas de migmatización, que pertenecen al basamento cristalino de la región. El borde noreste de este complejo está constituido por pizarras de bajo grado de metamorfismo, que afloran en la sierra de San Javier, inmediatamente al oeste de la ciudad de Tucumán. Entre los gneises y las facies de bajo grado se extiende una zona intermedia donde intervienen fundamentalmente esquistos bandeados de mediano grado de metamorfismo. El complejo de rocas metamórficas es presumiblemente precámbrico aunque ha proporcionado numerosas edades isotópicas del Paleozoico inferior. Los granitos proporcionan edades isotópicas paleozoicas. Se trata de rocas altamente deformadas con numerosas discontinuidades que permiten la penetración del agua y por lo tanto de la meteorización, favorecida por las condiciones climáticas subtropicales con elevadas precipitaciones y densa vegetación. La meteorización y erosión fluvial de estas rocas son las que generan los materiales superficiales cuaternarios que están principalmente formados por clastos de rocas metamórficas. Por otra parte las condiciones cálidas y húmedas han permitido una intensa alteración y la formación de una capa prácticamente continua de depósitos coluviales que tapizan las laderas montañosas. Sobre los cuerpos graníticos se han generado capas de un regolito de considerable espesor.

### *Cubierta sedimentaria*

Esta ocupa angostas franjas adosadas al borde oriental de los macizos metamórficos. Está formada por capas continentales rojas consistentes principalmente en areniscas y limolitas que pertenecen al Terciario superior, presumiblemente Mioceno. Como material cementante estas rocas contienen proporciones relativamente elevadas de arcilla, lo que hace que los productos de su meteorización sean frecuentemente suelos arcillosos proclives a deslizamientos y movimientos de ladera. Estas capas rojas se apoyan discordantemente sobre el basamento cristalino a lo largo de la mayor parte del borde montañoso.

### Geología de las unidades superficiales cuaternarias

Las entidades cuaternarias superficiales que componen el pie de la montaña tienen pronunciadas variaciones en sentido norte-sur. En el sector norte sobre el borde de la sierra de San Javier los conos aluviales tienen escaso desarrollo y los depósitos de materiales finos que cubren la llanura que se encuentra hacia el este llegan prácticamente hasta el pie de sierra. Hacia el sur del río Lules la participación de materiales granulares aumenta pronunciadamente y hacia el sur del río Famaillá el pie de sierra está formado por una plataforma de rodados gruesos (Figura 5) con bloques que ocasionalmente superan hasta los 3 m de diámetro. Esta se extiende hasta poco al sur de Aguilares donde empiezan a cubrirla y reemplazarla lateralmente materiales finos, limos y arenas finas. La plataforma de materiales gruesos ha quedado desactivada, sobreelevada con respecto a los cauces de los ríos actuales sobre ella se apoya una delgada capa de materiales finos y suelos que sostienen los cultivos que se practican en el área. En los ríos, desde el Famaillá hacia el sur incluyendo el río Medina, Chirimayo, se notan dos episodios que corresponden a regímenes distintos: el primero responsable de la depósito de los grandes rodados que forman la plataforma sobreelevada; el segundo responde a los cauces actuales, que están tallados en la plataforma antigua y acarrear depósitos gruesos pero de granulometría menor a los de la plataforma. Los cauces actuales están lavando los materiales de la plataforma

llevándose la fracción que pueden transportar y dejando un residuo de grandes rodados, visible en la mayor parte de los cauces de este sector. El manto de grandes rodados que forma la plataforma tiene un espesor próximo a los diez metros, ocasionalmente aflora su base apoyada discordantemente sobre las capas rojas plegadas del Terciario. En su formación intervienen tanto depósitos fluviales como derivados de flujos densos.

Hacia el sur de Aguilares, el pie de sierra está formado nuevamente por arenas finas y limos. No se presentan depósitos granulares gruesos equivalentes a los que se encuentran más al norte.

La llanura que se extiende hacia el este de la franja serrana representa una gran planicie de inundación cubierta por los depósitos fluviales del río Salí y sus afluentes. Estos depósitos se asientan sobre capas loésicas de origen eólico reconocidas principalmente a través de perforaciones. En el extremo norte de la llanura entre el río Salí y la sierra de San Javier ha quedado preservada una cubierta de materiales finos en gran parte eólicos que se asienta sobre los depósitos fluviales (Formación Tucumán, *Bona parte y Bobovnikov, 1974*)

## 6. PROCESOS QUE SE DESARROLLAN EN LA LADERA ORIENTAL DEL ACONQUIJA

### Deslizamientos y remoción en masa

La mayor parte de los deslizamientos gravitacionales afectan a la cubierta de material coluvial y al regolito que cubren las laderas montañosas de la vertiente oriental de las sierras de Tucumán. Se trata de deslizamientos superficiales traslacionales, que desplazan sobre los taludes paneles de suelos de 2-3 m de espesor y de extensiones variables del orden 4-6 hectáreas. La superficie de deslizamiento está marcada por el contacto entre la cubierta coluvial y la roca del sustrato. Los materiales deslizados son heterogéneos, inconsolidados, representados por una mezcla de fragmentos angulosos que no muestran selección por tamaño, compuesta por gravas y arenas con una participación significativa de fracciones finas en la que intervienen suelos vegetales. Las condiciones geológicas descritas no favorecen los deslizamientos rotacionales, propios de terrenos homogéneos principalmente arcillosos donde la cubierta de sedimentos alcanza espesores elevados, estos ocurren solo aisladamente.

El sustrato rocoso prácticamente no está involucrado en los movimientos de ladera. Esta observación vale tanto para los taludes naturales como para los artificiales. Los cortes de camino excavados en roca son estables, salvo incidentes aislados.

Los deslizamientos de ladera tienen una gran extensión en de la vertiente serrana, aunque habitualmente solo se detectan en los sitios en los que afectan obras e instalaciones humanas, donde sus efectos resultan evidentes. Dada la densa cubierta vegetal de gran parte de la sierra es probable que muchos deslizamientos antiguos estén ocultos por debajo de ella.

Las causas desencadenantes de los deslizamientos son sin duda las grandes lluvias, estos se movilizan durante la estación lluviosa estival. Por efecto de la saturación disminuye del ángulo de fricción interna de los materiales y aumenta la presión intersticial en el contacto material suelto-roca lo que, al disminuir la fricción, favorece los deslizamientos.

En esta región el efecto sísmico como desencadenante de deslizamientos es irrelevante.

Los deslizamientos de ladera transportan el material hacia el cauce de los ríos, donde se acumula una carga sólida que eventualmente se moviliza en forma de flujos densos (corrientes de

barro) durante las grandes crecientes de los ríos que acompañan a las tormentas de verano. Vale decir que el movimiento que comienza como un deslizamiento de talud puede terminar como una avalancha en una etapa posterior o prácticamente simultánea. Dada la escasa información pluviométrica que existe sobre la región se desconoce el valor del umbral de precipitaciones necesario para movilizar los flujos sólidos (*debris flows*, "corrientes de barro"). Existe solamente un dato para el río Chirimayo (Figura 5) donde se produjo un flujo de carácter destructivo, el 31 de diciembre de 1997, luego de una tormenta donde precipitaron 308 mm en 24 horas con una concentración próxima al 70% (215 mm) en 4 horas (Bravo et al. 1999), se supone que durante este lapso se pueden haber superado los 100 mm por hora.

### Carcavamiento y aluviación

Las zonas del pie de sierra formadas por sedimentos finos, especialmente limos, pobremente consolidados son las más propicias a la formación de cárcavas profundas que provocan considerables daños en las obras de infraestructura. Los fenómenos más notables se producen en las inmediaciones de Los Nogales, Tafí Viejo, Yerba Buena, San Miguel de Tucumán (Figuras 5 y 6). También en las áreas situadas al sur del río Matazambi (Figura 3). En estos lugares los cauces que descienden de la montaña o las filtraciones que escapan de los canales provocan acelerados procesos de erosión vertical profunda.

Inmediatamente al norte de Los Nogales (Figura 6) un pequeño arroyo produjo una profunda cárcava que destruyó caminos vecinales y que cuyo avance puede eventualmente afectar a la autopista del acceso norte a la ciudad de Tucumán. Al norte de Tafí Viejo el arroyo Buena Esperanza y sus afluentes han provocado un intenso carcavamiento que destruyó viviendas en el barrio Calpini, y obligó a sus habitantes a abandonarlo parcialmente. Asimismo este fenómeno amenaza a la avenida que vincula a Tafí Viejo con la ruta nacional 34, cuyo puente sobre este arroyo tiene que ser reconstruido. Otros cauces que descienden a la latitud de Tafí Viejo siguen las calles de la ciudad tales como la calle Uttinger donde han provocado profundos fenómenos de carcavamiento que han afectado a viviendas de la zona obligando a sus habitantes a abandonarlas. Además estos cauces transportan considerables cantidades de arenas y gravas que son depositadas sobre las calles de la ciudad (Mon y Eremchuk, 2001). Los canales Yerba Buena y Cainzo -Las Piedras como asimismo el Canal Sur han sufrido un intenso proceso de carcavamiento a partir de filtraciones en su revestimiento cuya rápida acción erosiva ha generado grandes espacios vacíos detrás de las losas provocando su colapso y posterior arrastre. Asimismo los desbordes del Canal Yerba Buena han producido procesos erosivos tan intensos que lo han hecho prácticamente desaparecer en ciertos sectores. La gran cantidad de material sólido que arrastra ha rellenado los canales haciéndole perder su capacidad de conducción y provocando desbordes en las franjas ribereñas que han producido serios daños en viviendas y cultivos. Los materiales granulares gravas y arenas han cubierto extensas zonas de los cultivos de citrus. El río Muerto, que fluye sobre Yerba Buena, es parcialmente captado por el canal del mismo nombre (cuando este funcionaba) igualmente el cauce sigue conduciendo agua que la vuelca directamente sobre barrios de esta ciudad que sufren considerables inundaciones todos los veranos. El profundo carcavamiento en los arroyos La Posta y El Sueño sobre la ruta 38 al sur de La Cocha ha producido el colapso total de sus respectivos puentes con considerables daños materiales y hasta pérdidas de vidas humanas (Figura 6).

## 7. EFECTOS SOBRE LA INFRAESTRUCTURA VIAL Y OTRAS OBRAS LINEALES

Si bien el incipiente grado de desarrollo económico de la región montañosa hace que aún no se hayan construido intensamente en ella vías de comunicación ni tampoco haya avanzado la urbanización ni otras obras de infraestructura, las obras existentes sirven como indicadores de la magnitud que pueden alcanzar los problemas geológico-geotécnicos en ellas, si no se adoptan ciertas medidas de correcta ingeniería de proyecto. A continuación se reseñan brevemente los principales problemas que afectan a las obras existentes. Se las describe siguiendo un orden norte - sur.

### Camino de San Javier (Ruta 338)

Esta representa la vía más directa para ascender la sierra de San Javier (Figuras 1 y 6), que constituye uno de los mayores atractivos turísticos de los alrededores de Tucumán, convertida además en zona de viviendas de fin de semana y de deportes de montaña. La ruta asciende por la empinada vertiente oriental de la sierra junto a dos arroyos en un paisaje de extraordinario atractivo. En los últimos años durante la lluvias estivales se han generado grandes deslizamientos que han dejado a la ruta fuera de servicio durante varios meses. Se trata de deslizamientos superficiales que afectan la cubierta aluvial, que al producirse trasladan consigo segmentos del camino, produciendo en él grandes depresiones y escalones que lo dejan intransitable. El sustrato rocoso compuesto por esquistos de bajo grado no se ve afectado por los movimientos de ladera. Los deslizamientos se producen a lo largo de la superficie de contacto entre la cubierta de material aluvial y la roca. Los materiales deslizados caen sobre otros tramos del camino o directamente a los arroyos que sigue el trazado. Los responsables del mantenimiento retiran el material deslizado que cae sobre la calzada y rellenan las depresiones con material granular grueso (ripió) reconstruyendo sobre él la carpeta asfáltica hasta que las lluvias del la estación pluvial siguiente producen nuevos movimientos. De esta manera se genera un ciclo continuo: deslizamiento-relleno-deslizamiento. Los materiales deslizados están aumentando considerablemente la carga sólida de los arroyos de El Parque y sus afluentes, lo que representa un peligro potencial para las áreas pobladas que se encuentran agua abajo. Existe el riesgo de que una lluvia intensa localizada en la cuenca de estos arroyos movilice un flujo sólido a partir de estos materiales con consecuencias catastróficas para los habitantes de los terrenos situados agua abajo.

Es este camino es imperioso realizar un tratamiento de taludes que impida o minimice los deslizamientos. Como primera medida y sin mayores erogaciones habría que restaurar los sistemas de desagüe existentes para evitar que el agua siga corriendo libremente sobre los taludes como lo hace ahora. Posteriormente habría que contemplar obras de drenaje y sostenimiento adecuadamente estudiadas.

### Camino a Villa Nougés

Este representa otro acceso a la sierra de San Javier situado al sur del primero (Figura 6). El contexto geológico-geotécnico donde fue construida esta ruta es aproximadamente el mismo que el de la anterior y los problemas son similares, aunque en esta alcanzan menos intensidad por una situación topográfica más favorable. Los deslizamientos más significativos ocurren en las proximidades de la misma Villa Nougés en el tramo donde el trazado de la ruta corre próximo a un arroyo que produce socavación lateral desencadenando los deslizamientos que afectan a la ruta.

### Camino a Potrero de las Tablas

Este camino asciende a la sierra de San Javier por su extremo sur hasta las nacientes del río Lules. Está construido en un ambiente geológico distinto al de los dos anteriores, dado que sus cortes han sido excavados en materiales derivados de la cubierta sedimentaria cretácico-terciaria, que aparentemente son más estables que los derivados del basamento cristalino. En este camino no se han registrado deslizamientos significativos.

### Camino a Tafí del Valle (Ruta 307)

Esta representa una vía de gran importancia económica dado que une a Tucumán y a las poblaciones más populosas de la provincia con los Valles Calchaquíes. Representa la vía de comunicación con el área turística más importante de la provincia enclavada en el valle de Tafí donde se encuentran Tafí del Valle, El Mollar y otras localidades turísticas (Figura 6). Este camino se desarrolla en un contexto geológico-geotécnico complejo, los tramos más bajos de esta carretera hasta el km 30, a partir del empalme con la ruta nacional 38, transcurren en un ambiente de alta pluviosidad cubierto por densa vegetación subtropical. La traza de la ruta sigue el valle del río Los Sosa con empinadas laderas talladas en esquistos, gneises y granitos. Aunque los cortes en roca de esta carretera no muestran problemas mayores de estabilidad, tal como en los otros trazados viales descriptos previamente, se dan también deslizamientos de la cubierta aluvial por encima del sustrato rocoso. Sin embargo no son estos los que causan los problemas más agudos sino los torrentes laterales, afluentes del río Los Sosa, que experimentan intensas crecientes durante las lluvias estivales acompañadas frecuentemente de flujos densos ("corrientes de barro" o flujos de detritos). Estos fenómenos crean problemas de difícil manejo que mantienen la ruta intransitable, a veces durante algunos días, con los consiguientes dificultades para los pobladores y turistas. Estos fenómenos tienen que ser cuidadosamente estudiados para proyectar y ejecutar obras de protección que deben extenderse bastante más allá de la traza del camino, dentro de las cuencas donde se originan los fenómenos para regularlos y atenuarlos antes de que lleguen al camino. Las acciones que se emprenden directamente sobre el mismo trazado o en sus proximidades inmediatas, tal como ocurre actualmente, representan paliativos onerosos de escaso efecto a mediano y largo plazo.

### Camino de la quebrada de El Portugués

Esta ruta, cuyos primeros tramos se encuentran en construcción, ha sido concebida como un camino alternativo para acceder a las localidades de El Mollar y Tafí del Valle utilizando una vía distinta a la ruta 307. Su construcción ha sido objeto de numerosos intercambios de ideas y debates técnicos estableciendo comparaciones con la anterior. El trazado previsto de esta carretera sigue el valle del río Pueblo Viejo (Figura 6). Actualmente se ha construido un tramo de aproximadamente 8 km a partir del paraje de El Rincón hacia abajo, vale decir su tramo más elevado. Estos primeros tramos muestran que no cabe esperar condiciones geológico-geotécnicas muy distintas de las que se experimentan en la ruta 307, incluso en este trazado parecen darse algunos problemas adicionales que no existen en la otra. El tramo ya construido, a pesar de que muestra una pluviosidad comparativamente baja frente a lo que cabe esperar en los más bajos, muestra señales de inestabilidad por la presencia de rocas graníticas alteradas que generan un manto de regolito arenoso de cerca de 10 m de espesor sumamente inestable en las excavaciones de los taludes. En los tramos más bajos se esperan torrentes acompañados de flujos densos similares a los que se

observan en la ruta 307 dado que los afluentes del río Pueblo Viejo deben tener características parecidas a los que desembocan en el río Los Sosa. Incluso existe el antecedente de que en febrero de 1973 se destruyó la presa de La Horqueta por la acción de flujos densos del río Pueblo Viejo. De esta manera no parece que la carretera de la quebrada de El Portugués pueda constituir un acceso seguro y desprovisto de problemas a Tafí del Valle. Esta también requerirá obras de tratamiento de cuencas y taludes que aseguren su estabilidad.

### Camino al valle de Las Estancias (ruta 315)

Esta carretera salva pronunciados desniveles mediante dos cuestas muy sinuosas excavadas en gran parte en roca y en aluviones gruesos. No se registran en ella problemas mayores de estabilidad, fuera de un deslizamiento superficial de material aluvial situado cerca del punto más elevado del trazado próximo al ex puesto policial de La Banderita, sin embargo este ha sido controlado en los últimos años mediante un sistema de bermas y drenajes. Ocasionalmente se producen deslizamientos superficiales menores, que interrumpen la circulación por algunas horas. La parte baja del trazado está amenazada por las crecientes del río Medinas que frecuentemente socava la carretera durante las grandes crecientes estivales. No se vislumbran soluciones fáciles para este problema que requeriría un significativo cambio de trazado y la construcción de puentes que en principio parecen desproporcionados frente al uso que tiene esta vía de comunicación en la actualidad.

### Mineroducto de Alumbra

El trazado de este conducto que transporta un lodo con un concentrado de metales, que proviene de la mina de La Alumbra, está acompañado de una pista precaria, apta para vehículos de doble tracción, que se desarrolla parcialmente en el faldeo oriental de la sierra de Aconquija entre el valle de Las Estancias y el pie de sierra para luego continuar por terrenos llanos hasta la estación de ferrocarril Cruz del Norte. Este trazado resulta ilustrativo porque muestra que mientras la pista transcurre en roca y a pesar de estar acompañada de elevados taludes sumamente empinados se mantiene estable. En cambio en cuanto la pista penetra en terrenos cubiertos por materiales aluviales, sobre el faldeo occidental de las Cumbres de Santa Ana, muestra pronunciados problemas de estabilidad, que han debido ser objeto de significativas obras de ingeniería de taludes que van desde drenes hasta muros de sostenimiento. Fuera de estos problemas de estabilidad de taludes el conducto debe ser protegido frente los embates de los ríos como el Medina y el Gastona que en determinadas ocasiones han producido destapes de la cañería.

### Camino de Escaba

Este representa otra vía de penetración al área montañosa (Figura 6). Transcurre dentro de elevaciones más bajas que las anteriores y bajo un régimen pluviométrico más benigno. La cubierta de material aluvial que se desarrolla sobre gneises y migmatitas no muestra mayores problemas de estabilidad.

## 8. RUTAS PRINCIPALES Y SECUNDARIAS QUE SE DESARROLLAN EN LA LLANURA AL ESTE DE LA ZONA MONTAÑOSA

La ruta más importante paralela a la frente montañosa es la ruta nacional 38 que constituye una vía de gran importancia económica ya que es el eje de transporte de la zona más activa de la provincia de Tucumán. Dado su trazado aproximadamente norte-sur, cruza prácticamente todos los ríos de la provincia

situados al sur de la ciudad de Tucumán (Figura 6). Durante las grandes crecientes del verano se registran frecuentemente cortes de la ruta e interrupciones del tránsito debido al colapso total o parcial de algunos puentes. Los accidentes más frecuentes son debidos a la socavación de los estribos de los puentes. Se recoge la impresión de que éstos no tienen la luz suficiente como para dejar pasar los elevados caudales que transportan estos ríos durante sus crecientes estivales. Aparentemente los puentes son "cortos" y sus terraplenes de acceso actúan como diques. Se verifica que en la mayor parte de los casos los puentes del ferrocarril construidos sobre los mismo ríos varias décadas antes se han mantenido, dado que estos tienen luces mucho mayores. Los puentes están fundados en aluviones gruesos y sus fundaciones resisten en la mayor parte de los casos. Las roturas ocurren sobre los estribos o en los terraplenes de acceso. En el caso de los puentes situados al sur del río Matazambi, fundados en materiales finos la intensa socavación puede causar el colapso total del puente tal como ha ocurrido con los del arroyo El Sueño y el arroyo de La Posta durante la temporada de lluvias del verano del 2000.

En la ruta provincial situada más al oeste, Ruta 324 (Figura 7), "Interpueblos" todos los veranos se cortan sistemáticamente los puentes sobre el río Caspinchango, río Zerda, Mandolo, Los Sosa. El río Zerda tiene dos puentes unos sobre la ruta 307, acceso a Tafí del Valle y el otro sobre la 324, ocasionalmente se cortan ambos. Estos cortes se producen siempre de la misma manera en uno de sus estribos. Sin duda éstos tampoco tienen la luz suficiente como para dejar pasar las crecientes.

## 9. EFECTOS SOBRE LA INFRAESTRUCTURA URBANA

En el área del pie de sierra están situadas las ciudades más importantes de la provincia de Tucumán, todas ellas están de alguna manera afectadas y amenazadas por los procesos que se desarrollan en las laderas montañosas. La mayor parte de las grandes ciudades están situadas entre los 350 m y los 450, en áreas donde los ríos que descienden de las altas cumbres tienden a divagar y a experimentar desplazamientos en sus cauces, lo que ocasionalmente tiene consecuencias desastrosas para ellas.

### Área del Gran San Miguel de Tucumán

El Gran San Miguel de Tucumán representa la máxima concentración urbana de la provincia de Tucumán y del noroeste argentino, algunos de sus aspectos geológicos geotécnicos fueron tratados en *Mon, 1998; Mon y Eremchuk, 2001*). Forman parte de él varias municipalidades, aquí nos referiremos a las más directamente afectadas por los procesos de las laderas montañosas: San Miguel de Tucumán, Tafí Viejo y Yerba Buena. Estas se encuentran situadas inmediatamente al este de la ladera oriental de la sierra de San Javier, que si bien representa una elevación menor comparada con las altas cumbres de la sierra de Aconquija, situadas mas al sur, la intensa pluviosidad y la elevada pendiente de su ladera provocan inundaciones, socavaciones y depósitos de material aluvial que afectan intensamente a las áreas urbanizadas. En las municipalidades de Yerba Buena y Tafí Viejo (Figuras 5 y 6) la urbanización ha avanzado continuamente sobre terrenos de mayor pendiente y acercándose cada vez más al pie de sierra, situación que ha tenido consecuencias directas sobre estas poblaciones e indirectas sobre San Miguel de Tucumán, que si bien no está en contacto con la ladera montañosa, experimenta las consecuencias de los cambios que se producen en ella.

El avance de la urbanización sobre el área de pie de sierra acompañado de un cambio en el uso del suelo, cultivos de cítricos en vez de caña de azúcar, hace que durante las tormentas de verano se produzca una concentración mucho más rápida del agua que la que ocurría antes. Esta situación ha provocado mayor arrastre de sólidos, colmatación y desbordes de los canales de desagüe y protección. Estos desbordes han tenido serias consecuencias con destrucción de viviendas y cultivos. Si bien los canales conducen agua desde Yerba Buena y Tafí Viejo, sus desbordes afectan también a San Miguel de Tucumán, con inundaciones y hasta destrucción de viviendas. En el estado actual de situación con gran parte de los canales parcialmente destruidos y algunos de ellos directamente fuera de servicio, es de suponer que pueden producirse situaciones sumamente críticas en las próximas temporadas de lluvias. Además no puede descartarse la posibilidad de que lluvias concentradas en una determinada cuenca (*Mon y Eremchuk, 2001*) produzcan una movilización de la carga sólida de los arroyos provocando corrientes de barro que tendrían consecuencias catastróficas sobre la población. En la estación de lluvias del verano del 2001, ya se han producido las primeras señales de alarma, con inundaciones que han traído consigo una carga sólida significativa, que ha ingresado en urbanizaciones cubriendo áreas de cultivo en numerosos lugares del piedemonte de la sierra de San Javier.

### Lules

Los barrios ubicados en la franja norte de la ciudad se ven frecuentemente afectados por los desbordes del río Lules.

### Monteros

La ciudad de Monteros, situada en el área de confluencia de varios ríos: Romano, Mandolo, arroyo El Tejar y río Pueblo Viejo, sufre el embate de los desbordes de estos cauces durante las crecientes que acompañan a las lluvias del verano. Como consecuencia de ello se inundan considerables sectores de la ciudad. Estas inundaciones implican frecuentemente evacuaciones de centenares de personas y significativos daños materiales. Ante una situación tan comprometida cabe una muy cuidadosa planificación urbana con especial énfasis en el análisis del escurrimiento superficial, a fin de evitar que se extienda la urbanización sobre terrenos afectados por los desbordes de los ríos. Asimismo las eventuales obras de protección requerirán de proyectos basados en estudios de la evolución y dinámica de los cauces de los ríos.

### Concepción

La ciudad está amenazada por el río Gastona que tiene un cauce sumamente móvil, la urbanización se ha extendido imprudentemente sobre terrenos inundables en ambas márgenes del río, que amenaza a estos emplazamientos durante sus crecientes. La ubicación de algunos barrios debería ser reconsiderada y el planeamiento urbano debe tener en cuenta estos fenómenos. Los efectos negativos más notables se han registrado en el pueblo de Yucumanita, próximo a Concepción que tuvo que ser parcialmente abandonado. Además durante las crecientes que experimenta el río Chirimayo afectan frecuentemente a las urbanizaciones del sector noroeste de la ciudad.

### Aguilares

Esta ciudad está amenazada por el río Medinas, que frecuentemente desborda durante las tormentas de verano e inunda barrios de la ciudad.

FIGURA 6. RED VIAL

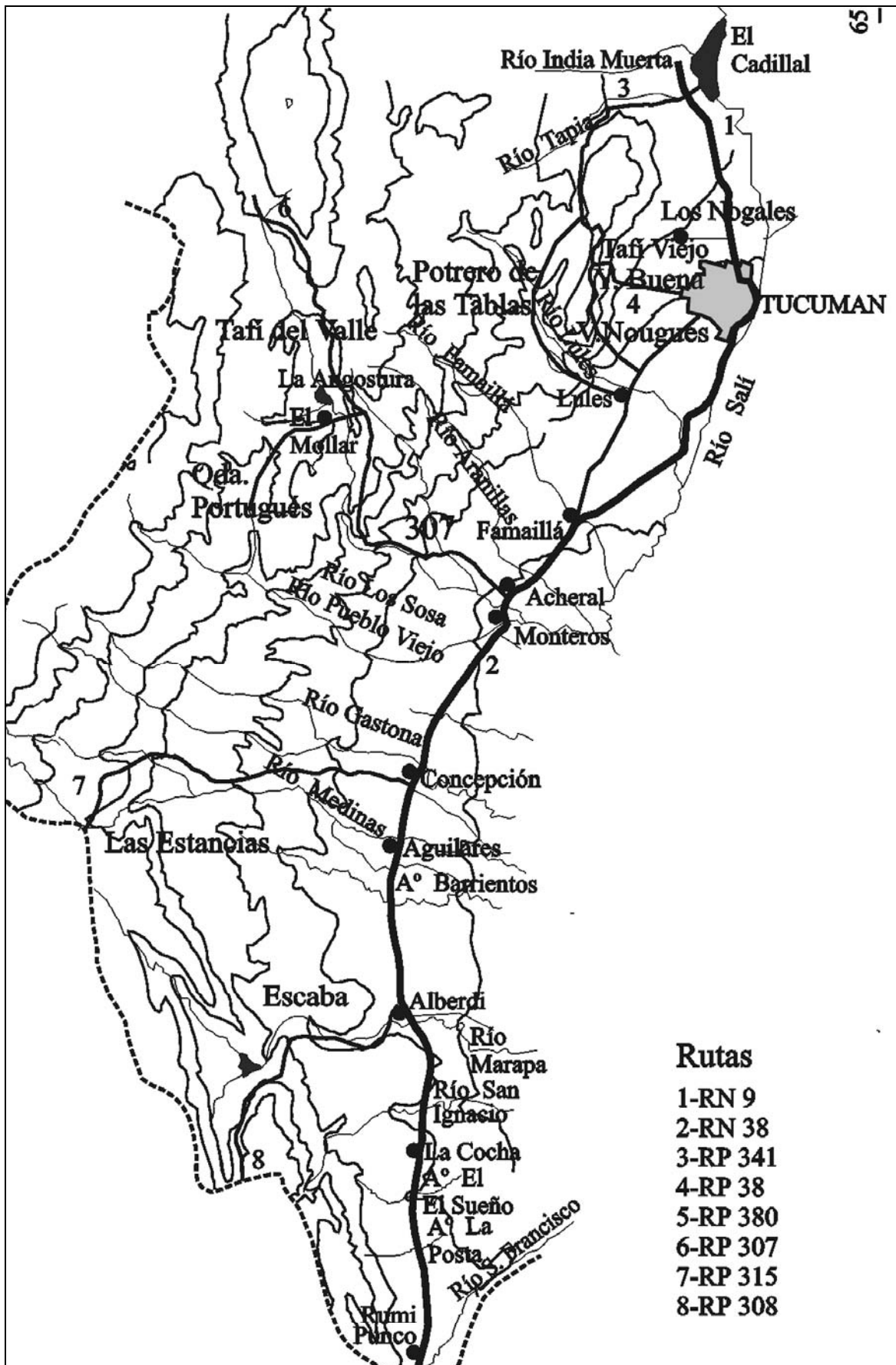




FIGURA 7. RED VIAL INTERPUEBLOS

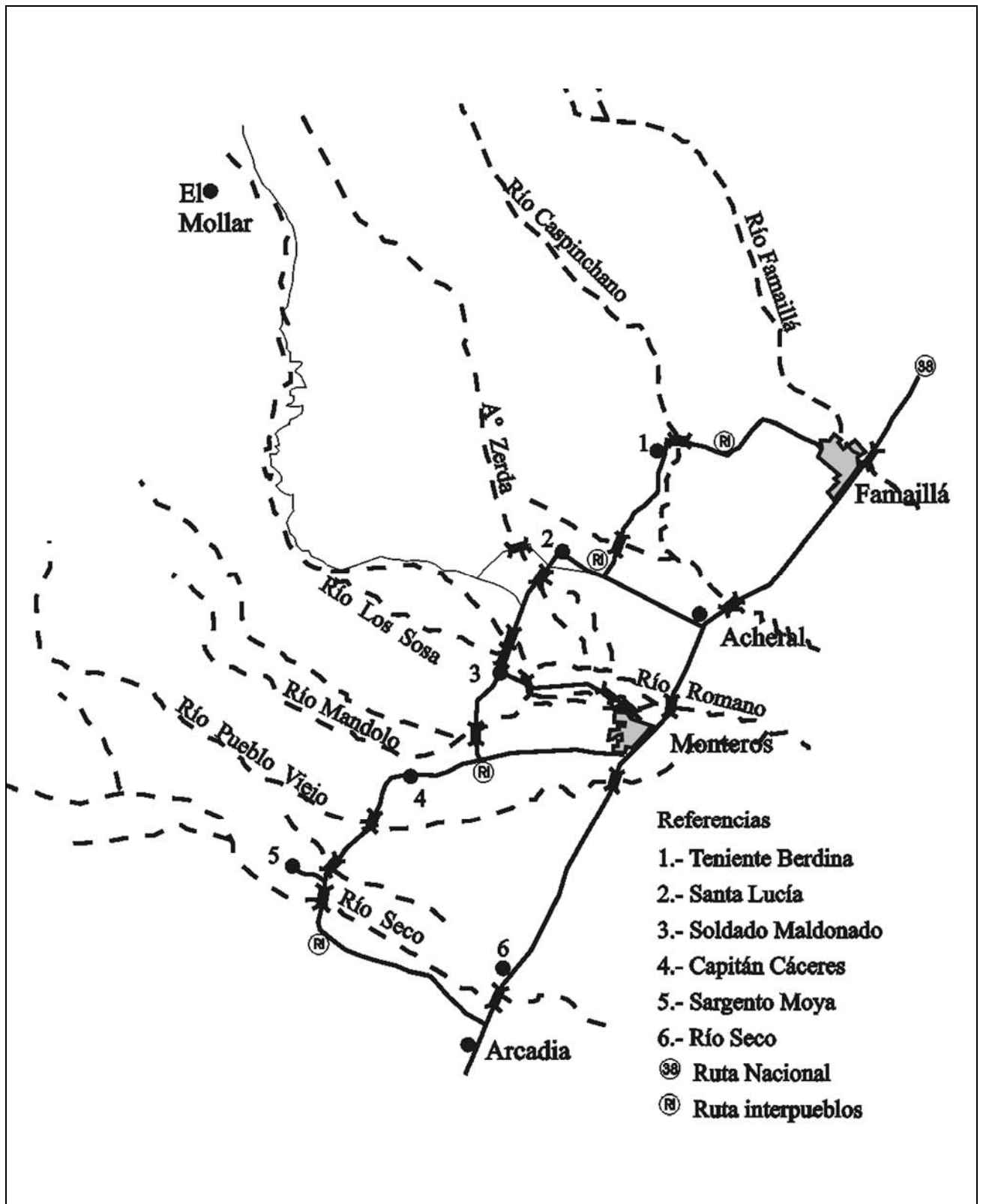
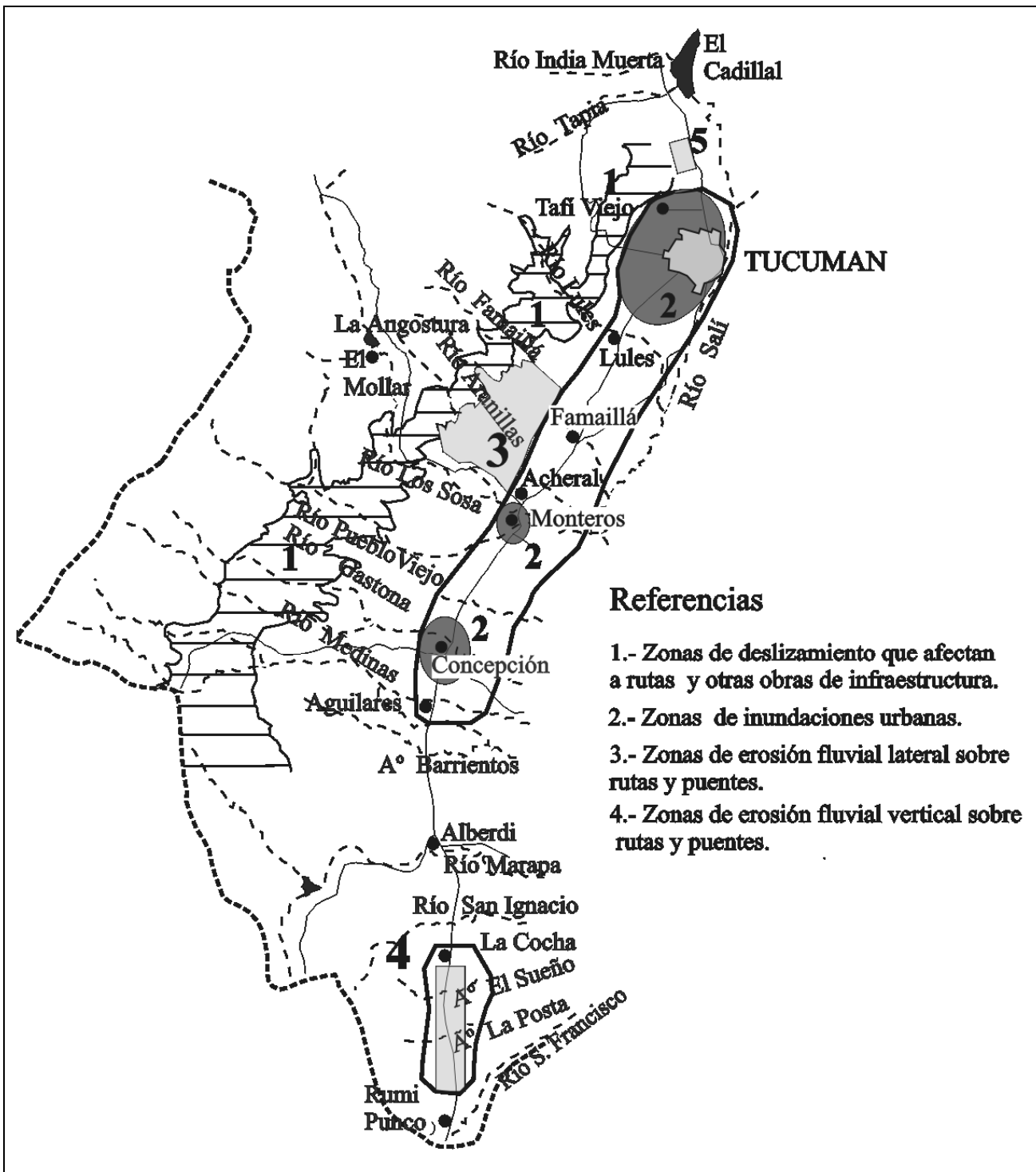


FIGURA 8. MAPA DE RIESGO



## 10. RIESGOS

Los asentamientos humanos más populosos y las vías de comunicación más utilizadas de la provincia de Tucumán están localizados justamente en el área donde se dan las mayores precipitaciones lo que, junto a las fuertes pendientes, configura una situación de alto riesgo frente a las inundaciones, erosión y sedimentación. La mayor parte de las inundaciones se producen por desbordes de los ríos o insuficiencias de los desagües. Fuera de ello están expuestas a fenómenos de erosión lateral de ríos

y arroyos con el peligro latente de que una lluvia de intensidad elevada pueda movilizar la carga sólida de los ríos en forma de flujos densos. Estas áreas están marcadas en el mapa de la Figura 8. Un área significativa del flanco montañoso está expuesto a movimientos de ladera que se desencadenan también por lluvias intensas. Queda claro que los riesgos geológicos de la vertiente montañosa de la provincia de Tucumán están estrechamente asociados a una combinación desfavorable de rasgos topográficos, geológicos y climáticos. En lo que se refiere al clima los estudios recientes (Minetti y otros, 2000) muestran que esta región

está sometida a una situación de mayor pluviosidad en las últimas décadas y es de suponer que los fenómenos descriptos puedan mantenerse e intensificarse en los próximos años.

## 11. CONCLUSIONES

Si bien las condiciones del medio natural de la vertiente oriental andina son severas en cuanto a las fuertes pendientes e intensas precipitaciones concentradas en cortos períodos del año, la mayor parte de las acciones destructivas sobre la infraestructura urbana y de transporte son previsibles y manejables técnicamente. Anualmente, cada vez que se producen dificultades durante las grandes lluvias estivales surgen inmediatamente por parte de los responsables del mantenimiento términos tales como "extraordinarios" o "excepcionales" para calificar a estos fenómenos naturales repetitivos y previsibles. En realidad en las últimas décadas no se han registrado fenómenos que merezcan tales apelativos. Las dificultades que se han experimentado derivan fundamentalmente en deficiencias de la ingeniería de proyecto para adaptar las obras a las condiciones que impone el medio natural. Insuficiencias en los estudios básicos, falta de mantenimiento, expansión urbana sin planificación o con planificación que desconoce las características del medio natural.

Actualmente los problemas que afectan al área de pie de sierra son de tal magnitud que sería utópico intentar resolverlos

a todos al mismo tiempo. Necesariamente deben fijarse prioridades en cuanto a cuales son las ciudades y asentamientos humanos que corren mayores riesgos, cuales son las rutas que justifican mayor esfuerzo de protección y mantenimiento. En lo que se refiere a las ciudades son aparentemente Concepción y el Gran Tucumán las más expuestas, especialmente por su pronunciado crecimiento sobre áreas problemáticas. Las vías de comunicación que requerirían una acción intensa dirigida a estabilizarlas y protegerlas de los torrentes y deslizamientos de ladera parecen ser el camino a los valles Calchaquíes (ruta 307) y el acceso a San Javier (ruta 338).

Por otra parte parece necesario distinguir los problemas que tienen solución a un costo razonable de aquellos que no la tienen, para estos últimos casos será necesario contemplar la posibilidad de evitar el avance de la construcción sobre determinadas áreas e incluso trasladar a áreas más seguras algunas poblaciones o barrios.

## 12. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo pudo llevarse a cabo con el apoyo material del CONICET y de la universidades nacionales de Tucumán y Catamarca. Se le agradece a la Sra. María Vaca sus pacientes esfuerzos en la preparación de los dibujos que acompañan este artículo.

## 13. TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

- BONAPARTE, J.F. Y J. BOBOVNIKOV, 1974.  
Algunos fósiles pleistocénicos de la provincia de Tucumán y su significado estratigráfico.  
*Acta Geológica Lilloana*, 12: 171-183.
- BRAVO, F.C., H.R. PAZ Y COMBA, A. 1999.  
Diagnóstico de las inundaciones en Alpachiri, provincia de Tucumán.  
*Revista de Ciencias Exactas e Ingeniería, Universidad Nacional de Tucumán, abril 1999*: 28-33. S.M. de Tucumán.
- MINETTI, J.L. 1975  
El régimen pluviométrico de la provincia de Tucumán .  
*Pub. Misc. N° 57. EEAT. S.M. de Tucumán.*
- MINETTI, J.L. Y M.FLORES. 1978  
Estudio de precipitaciones de gran volumen en la cuenca del A° Mista.  
*RIAT 55, N° 2, 49-58.*
- MINETTI, J.L., M.G. RAMÍREZ Y L.C. SUÁREZ. 1979  
Balance hidrológico de la cuenca y subcuencas del río Salí.  
*Pub. Mis. N° 64. EEAOC. S.M. de Tucumán.*
- MINETTI, J.L., W.M. VARGAS, L.R. ACUÑA, L.R. DE LA ZERDA Y A.G. POBLETE. 2000  
Tendencias actuales de la precipitación en Argentina y Chile-Impactos.  
*Rev. de Geo. Año 3, N° 4, 10-20. IGA-UNSJ.*
- MON, R.1998  
Características geológicas y geotécnicas del área urbana de Tucumán y Poblaciones Vecinas.  
*Revista de Geología Aplicada a la Ingeniería y el Ambiente. 12:101-112. Buenos Aires.*
- MON, R. & J.E. EREMCHUK, 2001.  
Engineering geological conditions for urban planning in Tucumán area (Argentina).  
*International Symposium of Engineering geological Problems of Urban Areas. IAEG, Ekaterinburg.*
- POBLETE, A.G., J.L. MINETTI Y E.M. SIERRA. 1989:  
La influencia del régimen hídrico Andino-Puneño en el oasis del Noroeste argentino y Cuyo.  
*Rev. de Geofísica, N° 30, 137-149. IPGH-OEA. México.*



## Mejoramiento y búsqueda de nuevas aplicaciones en Materiales Regionales

Muñoz, Luis <sup>1</sup> - Torrán, Eduardo - Treppo, Oscar <sup>2</sup> - Schalamuk, Isidoro <sup>3</sup>

### Resumen

*En el marco del grupo de investigación de materiales regionales (GIMAR), se realizaron ensayos sobre muestras de canteras de la zona centro-este de la provincia de Entre Ríos entre los paralelos de 31 y 33 grados sur, en una franja costera del Río Uruguay, de aproximadamente 30 km de ancho. El estudio comprende gravas (canto rodado), arenas, suelo calcáreo, arcillas y sus mezclas, como así también rocas. Este trabajo presenta los resultados conseguidos hasta el momento en grava-cemento, suelos calcáreos y rocas. Se describen procedimientos empleados y objetivos propuestos en cuanto a aplicaciones posibles.*

### 1. INTRODUCCIÓN

El enfoque propuesto en los trabajos que se desarrollan es el de obtener materiales de bajo costo de procesamiento y con procedimientos sencillos de aplicar a escala de obra. Esto limita un poco las alternativas, pero parece ser realista al momento de aplicar los logros en cuanto a propiedades obtenidas. Además, se buscan nuevos destinos o nuevas aplicaciones para los materiales ya conocidos

En la actualidad, la explotación de estos recursos minerales es limitada, por lo que un aprovechamiento integral puede constituir una solución en la reducción de costos. Ciertas fracciones, como por ejemplo la arena del lavado de canto rodado se descarta, aún teniendo en cuenta que algunas canteras se explotan con rendimientos del 30% de gravas. El movimiento, procesamiento y acopio de este estéril encarece al agregado grueso. Por lo tanto, tomando este caso como ejemplo, se buscan aplicaciones y aprovechamiento de la arena, mezclas u otros componentes minerales recuperables (magnetita u otros).

### 2. RESULTADOS OBTENIDOS EN ROCAS CALCÁREAS

Las rocas ensayadas corresponden a limolitas calcáreas.

A fin de caracterizarlas se realizaron ensayos de resistencia a la carga puntual (Point Load Test). Este ensayo es muy versátil y práctico para muestras de mano, ya que no es necesaria la forma de probeta o testigo. Se adaptaron las punteras esféricas en los conos (con dimensiones IRAM), a una máquina de ensayos universal.

Los resultados permiten resumir las siguientes características:

2.1. Presentan una resistencia variable entre 52.8 y 204, con promedio de 123 kg/cm<sup>2</sup> sobre un total de 17 de los que se consideraron 11, principalmente en razón de la exclusión de los considerados atípicos por tamaño o alguna imperfección de la muestra. Se observó por ejemplo que para esta roca los Diámetros menores o iguales a 3 cm resultaban con valores atípicamente altos, luego del ajuste por diámetro y la conversión a compresión simple y usando 16 como factor de conversión desde carga puntual a resistencia a la compresión simple. Se decidió conservar el factor 16, y descartar los ensayos desviados de la media.

Con el propósito de conocer la durabilidad se efectuó un ensayo de abrasión Los Ángeles, El resultado fue de 28% de pérdida para 500 vueltas, en un material tipo B.

2.2. El contenido en carbonato de calcio varía entre valores de 21 a 35%.

Entregado: 06 de Setiembre de 2002 ■ Aceptado: 29 de Agosto de 2003

1. muniozl@frcu.utn.edu.ar

2. Universidad Tecnológica Nacional -  
Facultad Regional Concepción del Uruguay  
Ing. Pereyra 676- C.P. 3260- Concepción del Uruguay. Entre Ríos.

3. INREMI-CONICET

Se debe tener en cuenta, sin embargo que dada la dureza de la calcita (3) el aumento del contenido en CO<sub>3</sub> Ca, mas allá del suficiente para ocupar los vacíos resta trabazón o fricción a la matrix.

2.3. En general tienen una variación importante en cuanto a consistencia, aún en el mismo yacimiento, es decir presentan heterogeneidad, con variación tanto vertical como horizontal. Esto, unido a su resistencia, limita bastante sus aplicaciones, en lo referente a su utilización en hormigones estructurales.

2.4. Se investiga la posibilidad de desarrollar parámetros de clasificación basadas en el contenido en carbonato de calcio, lo que se describe más adelante al tratar suelos calcáreos, con el propósito de complementar otros ensayos o realizar determinaciones expeditivas.

Las determinaciones realizadas permiten concluir en una clasificación preliminar (aún no cuantificada fehacientemente), donde la resistencia aumenta proporcionalmente con el contenido en CO<sub>3</sub> Ca, hasta cierto valor para luego disminuir. Dado que el carbonato de calcio es el cemento de la roca la explicación es la siguiente:

La dureza del carbonato de calcio es 3 (calcita en la escala de Mohs), por lo que es de resistencia relativamente baja. La presencia de arena y limo aporta la trabazón y fricción interna. El aumento en el contenido en carbonato de calcio muy por encima del porcentaje necesario para ocupar los vacíos, lleva a una relación textural donde los clastos o agregados están dispersos y aislados y la resistencia cae, pasando a corresponder a la del CO<sub>3</sub> Ca, aunque el porcentaje del mismo aumente.

### 3. GRAVAS

En estos materiales conocidos como canto rodado (ripió, según la denominación vulgar local), presentan algunas variaciones granulométricas según su localización, aunque las diferencias mas gravitantes se refieren al contenido en fracción arena o limo-arcilla.

En gravas arenosas se realizaron ensayos de grava -cemento, principalmente en las que presentan un contenido en finos menor al 5%. Las gravas arcillosas o limoarcillosas son aptas para mejorados de caminos. En este caso, se realizaron ensayos de agregado o "restitución" de arcilla, con la finalidad de dar cohesión a las de bajo contenido de arcilla o restituirla en el caso de caminos "gastados" donde la falta de cohesión produce la erosión y transporte del material.

El procedimiento utilizado para la incorporación se adaptó a soluciones aplicables a escala de obra, y de bajo costo.

Se utilizaron dos metodologías:

1. Mezclado directo (como el que podrían realizar equipos en obra). Este procedimiento tiene la dificultad de que la mezcla en obra se puede complicar por la dificultad en la disgregación de los agregados de arcilla, para lograr un a mezcla homogénea y efectiva.
2. Aplicación mediante la disolución de arcilla en agua. Esta metodología se considera factible ya que podría ser incorporada en forma de riego y permite una distribución y mezcla homogéneas.

FIGURA 1. GRANULOMETRÍA DE AGREGADOS

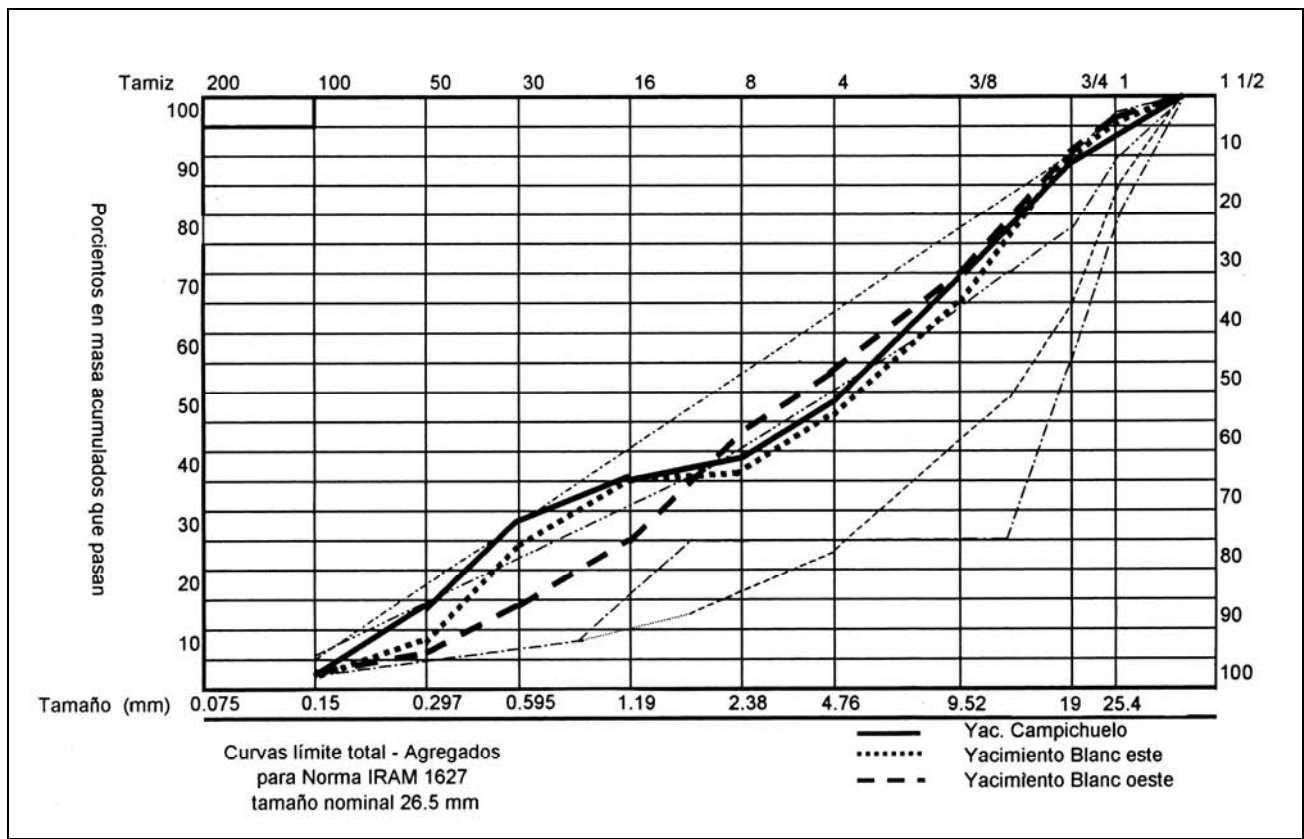


FIGURA 2. ENSAYOS DE COMPRESIÓN SIMPLE

PLANILLA DE REGISTRO DE ENSAYOS EN PROBETAS DE ARENA Y GRAVA/CEMENTO								
(ident.)	% cemento	relación	ANTIG.	Fuerza rot	Tensión rot		Observaciones	
	(peso)	a/c	(días)	(Kn)	kg/cm <sup>2</sup>	(N/mm <sup>2</sup> )	Desc. Muestra	Desp. rotura
1 - a	9	0.40	>28	29.75	35.00	3.79	grava arenosa	
1 - b	9	0.40	>28	24.70	29.40	3.14	grava arenosa	
1 - c	9	0.40	>28	29.30	34.40	3.73	grava arenosa	
1 - d	9	0.40	>28	27.95	32.90	3.56	grava arenosa	
2 - a	9	0.50	>28	99.50	117.00	12.67	grava arenosa	
2 - b	9	0.50	>28	120.00	141.00	15.28	grava arenosa	
2 - c	9	0.50	>28	116.30	136.80	14.81	grava arenosa	
2 - d	9	0.50	>28	109.70	129.00	13.97	grava arenosa	
3 - a	6	0.60	>28	52.35	61.60	6.67	grava arenosa	
3 - b	6	0.60	>28	47.15	55.40	6.00	grava arenosa	
3 - c	6	0.60	>28	68.70	80.80	8.75	grava arenosa	
4 - a	5	0.60	>28	43.75	51.50	5.57	grava arenosa	
4 - b	5	0.60	>28	46.40	54.60	5.91	grava arenosa	
4 - c	5	0.60	>28	47.85	56.30	6.09	grava arenosa	
5 - a	9.6	0.50	>28	123.10	144.80	15.67	Arena de Lavadero	
5 - b	9.6	0.50	>28	149.10	175.40	18.98	Arena de Lavadero	
5 - c	9.6	0.50	>28	153.80	180.90	19.58	Arena de Lavadero	
5' - a	9	0.4	>28	33.90	39.80	4.32	grava arenosa	
5' - b	9	0.4	>28	34.30	40.30	4.35	grava arenosa	
6 - a	9.0	0.5	>28	41.80	49.17	5.31	grava arenosa	
6 - b	9.0	0.5	>28	38.25	45.00	4.86	grava arenosa	
6 - c	9	0.5	>28	34.07	40.08	4.33	grava arenosa	
7 - a	9.6	0.5	>28	137.70	162.00	17.50	Arena de Rio	
7 - b	9.6	0.5	>28	125.80	148.00	16.00	Arena de Rio	
7 - c	9.6	0.5	>28	128.80	151.50	16.30	Arena de Rio	
7 - d	9.6	0.5	>28	128.50	151.20	16.30	Arena de Rio	

### 3.1. Grava-cemento

En las curvas granulométricas de la fig. 1 se puede observar que las mismas están dentro del campo delimitado por las envolventes (curvas límite). Esto explica los altos valores de resistencia obtenidos en los ensayos de probetas que se muestran en la planilla correspondiente.

Las curvas límite corresponden a las IRAM de agregados totales (tamaño nominal 25 mm), lo que demuestra que en canteras de gravas arenosas debería experimentarse el lavado solamente de la fracción fina, proceso que arrastraría además la eventual presencia de sales disueltas. Este proceso se comenzó a experimentar en este laboratorio. Con el objeto de determinar la influencia del contenido de finos (pasante T#200, menos del

3%, para las curvas granulométricas verificadas), así como de vestigios salinos, se procedió al lavado del material, de manera que los mismos fueran virtualmente eliminados.

Ensayos con bajo contenido en cemento:

Con un contenido del 9% en cemento se obtuvo una resistencia de 90 kg/cm<sup>2</sup> a 14 días (aproximadamente 100 kg/cm<sup>2</sup> a 28 días). El material fue compactado.

Para tener una referencia sobre costos y posibles aplicaciones, se realizó una comparación con una dosificación de hormigón realizada por el método de García Balado, adoptando los siguientes valores para un hormigón de 220 kg/cm calculados en base a valores tabulados en dicho método, para materiales equivalentes (agregado grueso y fino silíceos-canto rodado):

P.e. saturado y superficie seca:  
 Piedra: 2.58  
 Arena: 2.64  
 Módulo de fineza de la arena: 3.1 (adoptado).  
 Peso (tn/m<sup>3</sup>) seco del agregado grueso: 1.8  
 Absorción %: 1  
 Relación agua/cemento: 0.5  
 Tamaño máximo del agregado grueso: 25 mm (26.5)  
 Cantidad de cemento requerida: 334 kg (6.7 bolsas)

Grava-cemento: Para obtener igual resistencia se empleó proporcionalmente similar cantidad de cemento, aunque las probetas fueron compactadas y la relación agua-cemento fue de 0.4, de lo que se deduce que la grava arenosa empleada en el ensayo se comporta como el agregado total de la dosificación anterior.

Resumen comparativo Grava-cemento compactada, de bajo contenido en cemento (9%) versus hormigón pobre:

Con los parámetros de los agregados utilizados para la primera comparación pero para una resistencia de 100 kg/cm<sup>2</sup> a 28 días:

Según el método de García Balado se requieren 181 kg. de cemento.

Para una resistencia obtenida de 90 kg/cm<sup>2</sup> a 14 días (aproximadamente 100 kg/cm<sup>2</sup> a 28 días), se emplearon en el caso de la grava-cemento el equivalente a 171 kg.

Como puede verse, la relación de costos del material extraído de cantera de canto rodado arenoso (grava arenosa, con

contenido de finos menor al 5 %), es interesante tanto para bajos como para altos contenidos en cemento.

Es probable que resulten una alternativa de nuevos usos en aplicaciones no estructurales, sino en destinos no comprometidos, de bajo riesgo, donde una eventual falla puntual por una heterogeneidad local del frente de cantera o una falencia en el procedimiento de explotación trasladada a la resistencia, no resulte grave y sea fácilmente subsanable. Por ejemplo en pavimentos rígidos, playas de estacionamiento, rodaje etc.

Con respecto al tema de las sales, es preciso señalar que en los casos estudiados no se identificaron sulfato de calcio o cloruro de sodio (perjudiciales), sino que la que está presente es carbonato de calcio, lo que es registrado en análisis que se efectúan como "sales totales", pero que no presentan los problemas de las anteriores. Por lo tanto es preciso si se teme la presencia de sales en agregados, discriminar en los análisis, la naturaleza de la misma.

En las muestras de canteras de gravas arenosas la dosificación se efectuó con la finalidad de disminuir al máximo la cantidad de cemento para determinadas resistencias, manteniendo la relación agua/cemento por debajo de 0.5

En una segunda etapa de ensayos se introdujo el concepto de compactación. Como es sabido se pueden obtener elevadas resistencias en hormigones compactados (a rodillo, por ejemplo), por lo que se experimentó con gravas-cemento compactadas con Proctor modificado.

Resultados de estos ensayos pueden observarse en las figs. 2 y 3 .

**FIGURA 3. PROBETAS CON ALTO CONTENIDO EN CEMENTO**

PLANILLA REGISTRO DE ENSAYOS DE PROBETAS DE GRA VA/CEMENTO						
ENSAYO DE COMPRESION SIMPLE						
PROBETA Nº	DOSAJE		ANT	RESIST	DESCRIPCION DEL MATERIAL	OBSERVACIONES
	C	A/C		(kg/cm <sup>2</sup> )		
1	12	0.7	14	34	Grava arenolimsa con agregados fer ruginosos	prueba sin encabezar
2	16	0.7	28	107	Id.	
3	16	0.7	28	63	Id.	
4	16	0.7	28	110	Id.	
5	16	0.7	28	53	Id.	
6	16	0.7	28	85	Id.	
7	16	0.7	28	102	Id.	
8	17	0.4	14	183	Grava arenosa limpia (<5% F)	estimado resistencia final 220 kg/cm <sup>2</sup>
9	17	0.4	14	183	Id.	
10	15.5	0.4	25	231	Id.	
11	15.5	0.4	25	224	Id.	
12	15	0.5			Grava arenosa limpia	Relavado en laboratorio
13	15	0.5			Id.	

Al disminuir progresivamente la cantidad de cemento con relaciones de agua/cemento bajas, se tropieza con la dificultad de que por debajo de cierto valor (alrededor del 6% de cemento) la muestra no se puede compactar.

Por observaciones realizadas durante la investigación se llegó a la conclusión de que con muy bajos contenidos de agua, al aplicar el agua mediante rociador, la mayor parte de la misma se consume humectando el cemento más ávido de agua que los agregados silíceos y la superficie de estos últimos no se humedece. Se asumió la hipótesis de que este proceso perjudica la adherencia entre los mismos y por lo tanto la resistencia final.

Para contrarrestar este efecto inferido, se utilizó el 50% de agua para humedecer los agregados mediante rociador y el restante 50% luego de homogeneizar la mezcla, para preparar el pastón.

Para la preparación de probetas se utilizaron moldes desmontables cilíndricos de 11cm de diámetro por 21 cm de alto. Para cada dosaje se prepararon 3 probetas. Fueron curadas de en pileta normalizada.

Los ensayos de resistencia a la compresión simple se realizaron en una máquina de ensayos universal.

Actualmente, como se señaló mas arriba, se están realizando nuevos ensayos de grava arenosa lavada (separándole solamente limo y arcilla), como proceso de obtención de agregado total directamente en lavaderos. Las curvas granulométricas resultantes son adecuadas (bien graduadas), y se espera que las sales eventualmente presentes sean removidas por un lavado más enérgico o prolongado que el actual.

### 3.2. Conclusiones

Si bien los estudios continúan, pueden resumirse las siguientes:

En el caso de las gravas arenosas ensayadas, las curvas granulométricas del material proveniente en bruto de cantera, resultaron bien graduadas, con curvas cercanas a la óptima (IRAM), lo que determinó una resistencia comparable al del hormigón con un contenido similar en cemento.

La variabilidad granulométrica en la composición del material, para una misma cantera, así como el contenido en finos, determina que no sea aconsejable su utilización en estructuras, ya que la resistencia no resultará homogénea. La separación de únicamente limo y arcilla por lavado, procedimiento que como se explicó se está desarrollando en laboratorio, podría mejorar o acotar esta limitación. En este caso una alternativa de los lavaderos sería que el cilindro rotatorio adaptara una zaranda (tamiz, criba) que eliminara solo limo y arcilla y de ser necesario tamaños máximos excesivos.

La resistencia, a igual dosaje, es inversamente proporcional al contenido en finos, especialmente de arcillas. Estas, sumadas a óxidos de hierro, forman una pátina sobre la superficie de los agregados impidiendo la normal adherencia del cemento. La pátina especialmente la de los agregados tamaño arena, no se elimina totalmente en el lavado usual de los lavaderos de canto rodado, ya que un lavado enérgico con agitador mecánico de laboratorio sobre arenas provenientes de los mismos las limpia.

El dosaje con bajo contenido en cemento (menos del 9%) baja relación agua cemento, con compactación, resulta un

material muy interesante por la resistencia obtenida (ver figs. 2 y 3).

Con respecto a la abundancia de estos materiales la distribución de los mismos en la región ha sido mapeada (*Muñoz y Blanc, 1988*).

## 4. ARENAS

Si bien no es uno de los objetivos principales, se estudian depósitos aluviales y de médano, sin obtener resultados de mayor interés salvo los usuales. Sin embargo en el marco del aprovechamiento integral buscado y nuevas aplicaciones se detectaron concentraciones significativas de magnetita en las arenas de lavado de canto rodado acumulada en acopios.

Los minerales pesados de las arenas de depósitos antiguos y sedimentos actuales del Río Uruguay son conocidos. Sin embargo porcentajes del 0.8 % parecen ser resultado de una segregación involuntaria (separación y selección durante el lavado), por diferencia de peso específico con respecto al cuarzo, ópalo y calcedonia de gravas, arenas y rodados de areniscas cuarcílicas.

El análisis granulométrico permite comprobar que pasa el tamiz N(100 un concentrado de aproximadamente el 50% de magnetita. Es decir que previo a la separación magnética puede conseguirse esta nueva separación. Inclusive desarrollar un procedimiento que contemple la separación simultánea de estos minerales. Debe tenerse en cuenta que los lavaderos de canto rodado utilizan el proceso de zaranda cilíndrica rotatoria (y agua) para separar la grava de la arena y los finos, por lo que adicionar una nueva malla podría experimentarse. Si bien puede no resultar rentable como mena, el aprovechamiento integral durante el lavado, unido a la recuperación de la existente en los viejos acopios, puede ser de interés.

Como se puede ver esto debe compatibilizarse con los procedimientos señalados anteriormente de separar solo limo y arcilla para obtener directamente un agregado total para hormigones, en principio no estructurales.

## 5. SUELOS CALCÁREOS

Sobre este material, denominado también broza (localmente) o tosca (aunque este último término debería reservarse para el agregado consolidado), se programaron ensayos tendientes a lograr una clasificación complementaria a los ensayos consolidación o CBR, para determinar la calidad, como material de base o de mejoramiento en caminos. Es un material suelto, con variable porcentaje de agregados desde menores a un cm, decímetros (bochones), hasta bloques, de distinta consistencia. Como se verá mas adelante de estas características dependerán sus aplicaciones.

Como es conocido, estos materiales se originan por la precipitación de carbonato de calcio (bicarbonatos) disuelto en el agua subterránea. La oscilación periódica del nivel freático produce en cada descenso una nueva descarga de carbonatos. También el ascenso capilar de aguas con carbonatos desde niveles calcáreos infrayacentes. De esta forma el contenido de carbonato de calcio será variable. Dado que la granulometría de los suelos también es variable, resultan por lo tanto diferentes tipos y calidades de suelo calcáreo.

El ensayo proctor esta pensado para suelos cohesivos (*Juárez Badillo y Rico Rodríguez, 1980*). Dada la falta de plasticidad de los suelos calcáreos, un dato adicional en cuanto a su caracterización en calidad consideramos que puede ser de utilidad.



Otro factor importante es que dada la presencia de carbonato de calcio hay una cementación de partículas, en mayor o menor grado, por lo que al compactar durante los ensayos o durante el acondicionamiento en obra (bases, mejoramiento de caminos, etc.), hay una progresiva disgregación de los agregados. La superficie específica aumenta, por lo que el contenido en agua también, y por lo tanto la humedad óptima predeterminada no sería tan confiable como en suelos donde no hay pseudocementación o cementación de agregados.

Además la humectación de los agregados no será homogénea, ya que habrá una tendencia a disminuir hacia el núcleo.

Una característica adicional que presentan estos suelos es que los agregados tamaño limo cementados en distinto grado con carbonato de calcio, representan una granulometría variable que depende de la intensidad de los procedimientos de los ensayos.

Las observaciones al microscopio, muestran que las partículas retenidas en determinados tamices, son en realidad en gran parte, agregados, por lo que las curvas granulométricas no son del todo reales, y además variarán al ser reabajadas en obra o destino de uso.

La granulometría será por lo tanto aparente, para los procesos que se emplean a escala de obra.

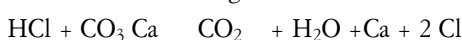
Para esta determinación se utilizó un calcímetro Dietrich Fruliing gasometer.

Los resultados son variables. Dado el origen y la yacencia de estos materiales, el mínimo carece de relevancia ya que el pasaje lateral es generalmente gradual. Los máximos son del orden del 30%, aunque menores a este valor para los promedios, en muestras de 1Kg y granulometría aparente (agregados), menor a 20 mm. En este caso hay que recordar que muy aisladamente pueden encontrarse agregados pulverulentos, algunos hasta de 1 cm, de carbonato de calcio puro. Sin embargo no son significativos en los porcentajes promedio, aunque como se señala en la metodología empleada, deben atenderse durante los ensayos (representatividad y preparación de la muestra). La calibración del aparato, de acuerdo a reactivos y procedimientos empleados permite asignar para los ensayos realizados en estas condiciones un factor de corrección del 2%, en los rangos en los que se trabaja con estos materiales, que debe adicionarse a los valores que se expresan en todos los resultados. En el presente trabajo se presentan todos los valores en texto y tablas, sin esta corrección.

El porcentaje promedio obtenido para una cantera en explotación, con importantes volúmenes extraídos y varios años de explotación resultó del 7%, mientras que otra cantera arrojó 19%, lo que ejemplifica la variabilidad en yacimientos en explotación.

Con este aparato (calcímetro) se determina el contenido en CO<sub>3</sub> Ca mediante el agregado de HCl. La determinación se realiza midiendo el volumen de CO<sub>2</sub> liberado en la reacción.

La reacción es como sigue:



El CO<sub>2</sub> determina una presión sobre una columna de agua y un desplazamiento en un tubo graduado en ml, mediante la aplicación de la siguiente fórmula:

$$V = \frac{[V (B-W)] 273}{760 (273+t^0)}$$

B= Presión barométrica en mm Hg

W= Tensión de vapor del agua a la temperatura t<sup>0</sup> expresada en mm de Hg.

V= Lectura en ml en el aparato.

Los contenidos en carbonato de calcio son variables en diferentes yacimientos y la calidad del suelo calcáreo es directamente proporcional al porcentaje del mismo.

Las variables elegidas son además la granulometría primaria o real (limo-arena arcilla) en general en ese orden de participación granulométrica porcentual, y la granulometría "secundaria o aparente" representada por los agregados cementados.

Un diseño de clasificación debe considerar:

- Contenido en CO<sub>3</sub> Ca.
- Granulometría de fracciones limo-arena
- Granulometría de los agregados
- Resistencia de los agregados
- Pérdida de CO<sub>3</sub> Ca por disolución (lavado por escorrentía)

La calidad resultante deberá evaluarse según el destino.

Durante los muestreos se observó que las muestras de acopio presentaban un porcentaje significativamente mayor a de algunos frentes por lo que se dedujo que el lavado (directo y por disolución del agua de lluvia) podía ser importante.

Esto impulsó un estudio de los efectos potenciales del lavado en materiales expuestos en caminos y utilizados como bases, o que en general están expuestos en distinto grado al flujo de agua.

Se programaron ensayos de lavado en tamices con caudal constante con distintas duraciones, como también ensayos de inmersión, reposo y cambio de agua periódico (diario), a fin de imitar cualitativamente las condiciones reales de campo.

El primer procedimiento se empleó a fin de verificar la pérdida por lavado y/o disolución.

En el segundo el objetivo fue cuantificar de manera sistemática la pérdida según un procedimiento repetible.

Para ello se procedió de la siguiente manera:

Cuarteo de la muestra y separación de 200 gramos

Agregado de agua (por ej. aprox. 1 litro), en un recipiente

Agitación mecánica (aprox. 30 segundos)

La muestra permanece un día en reposo y luego se toma una muestra para secado y determinación de porcentaje de carbonato, con el procedimiento que se indica a continuación.

Agitación con el agitador mecánico (1 minuto a velocidad media), luego de 10 minutos de reposo, se extrae el agua y extrae la muestra de forma que resulte representativa (finos, agregados etc.).

Una vez secada la muestra en estufa, se la disgrega en mortero antes de realizar la determinación.

Se cambia el agua a la muestra.

Se repiten los pasos 3 y 4 durante una semana.

Se repite todo el ciclo de ensayos reprogramando los procedimientos en caso que sea necesario.

Evaluación de resultados: La metodología empleada permite obtener resultados de tipo cuantitativo, aunque debe desarrollarse una equivalencia entre intemperización (disolución y lixiviación natural de carbonatos) y los ensayos realizados. Esta comparación debe incluir intensidad (cantidad o caudal de agua que atraviesa el material y tiempo de exposición al agente).

Los resultados revelan por lo tanto una pérdida significativa que será necesario evaluar con mayor detenimiento a fin de cuantificar ad del material expuesto a las mencionadas condiciones de campo. Los porcentajes obtenidos en estos ensayos preliminares pueden resumirse en el siguiente ejemplo:

Contenido de CO <sub>3</sub> Ca Inicial:	15.02 %
Contenido luego del 1 <sup>er</sup> Lavado:	11.2 %
“ 2 <sup>o</sup> Lavado:	8.8 %
“ 3 <sup>er</sup> Lavado:	6.5 %

Observaciones: Los errores detectados (inversión del orden lógico de pérdida en casos aislados), se deben a la heterogeneidad que introducen los agregados a veces con % atípicamente elevado de CO<sub>3</sub> Ca, lo que influye significativamente dada la pequeña cantidad de muestra que se utiliza en este método (aproximadamente 0.6 g). Para contrarrestar este problema se programaron ensayos con disgregación de la muestra, antes de comenzar el proceso. Esto introduce agregados o bloques grandes cuando los hubiere, siendo el volumen (ponderado) a disgregar una alteración, pero no se considera relevante en cuanto a la finalidad de la experiencia. El volumen de la muestra a disgregar deberá incorporar fragmentos de ya cuarteado.

## 6. SÍNTESIS DE LAS APLICACIONES POSIBLES

### Rocas calcáreas

- Escollerados
- Protecciones de taludes
- Defensas costeras

### Suelos calcáreos

No se visualizaron nuevas aplicaciones a las ya conocidas (mejorado de caminos, bases, contrapisos), pero se aportó al conocimiento de la influencia del contenido en CO<sub>3</sub> Ca en sus propiedades.

### Gravas arcillosas

Caminos. Como mejorado (superficie de rodamiento).

Tanto en éstas como en las arenosas es posible seleccionar ágatas (piedra semipreciosa) en las canteras, playas y acopios de

lavaderos, lo que es conocido y trabajado, artesanalmente hasta el momento.

### Gravas arenosas:

#### Grava-cemento:

Dadas las resistencias obtenidas es factible su utilización en defensas costeras como protección, especialmente en relleno de *paneles de revestimiento flexibles de confinamiento celular* (protecciones de taludes, estabilización de barrancas, protección a la erosión, etc). También como equivalentes de hormigones pobres, contrapisos, y ensayar a escala de obra su uso en pavimentos para tránsito liviano.

#### Agregados totales:

Luego de un lavado para eliminar finos (pasante tamiz 200) y eventualmente sales y parte de arena (en los casos que lo requieren) se obtiene un *agregado total, equivalente al compuesto por agregado grueso + agregado fino* provisto parara la construcción en el caso de los cantos rodados del litoral, provenientes de lavaderos y arena del río respectivamente (el agregado grueso extraído del río está prácticamente agotado).

Este material ha sido ensayado y no difiere de los agregados para hormigones utilizados hasta el momento en las zona. Además al incluir la arena de cantera, se inscribe dentro del aprovechamiento integral de los recursos naturales.

Actualmente ha sido seleccionado entre todos los estudiados y aquí descriptos para desarrollar procesos de producción a escala de obra, tipificar procedimientos y normalizar su uso, trabajos que se desarrollan en el laboratorio de Ing. Civil de la UTN.

#### El marco Ambiental:

Finalmente es importante señalar que se desarrollan paralelamente evaluaciones de impacto ambiental y estudios encaminados hacia el ordenamiento de las explotaciones en el propósito de la compatibilización con la estabilidad ambiental, que no se tratan aquí por no pertenecer a la temática específica del presente trabajo.

## 7. AGRADECIMIENTOS

Para la realización del presente trabajo colaboraron el Ingeniero Pablo Blanc y en distintas etapas los becarios de la carrera de Ing. Civil, Read, S., Cernex, H., Granau, M. y Borjas, F.

## 8. TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

JUÁREZ BADILLO Y RODRÍGUEZ, 2000.

Mecánica de Suelos.  
Ed. Limusa. México

MUÑOZ, L. Y BLANC, P., 1988.

Mapa Geológico Ambiental del Departamento Uruguay, Entre Ríos, Argentina.  
*Revista de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente. No. 12: 113 - 122.*

NORMAS IRAM. (INSTITUTO ARGENTINO DE RACIONALIZACIÓN DE MATERIALES), 1627 :

Agregados. Granulometría de los Agregados para Hormigones, (1980) . 10608: Método de determinación del índice de resistencia a la carga puntual, (1985). 10502: Método de determinación del límite plástico e índice de plasticidad, (1968). 1613: Determinación de carbonatos. Método gasométrico (1978).

La siguiente bibliografía ha sido consultada como referencia conceptual, aunque no se cita en el texto:

ACTAS DE LA ASOCIACIÓN ARGENTINA APLICADA A LA INGENIERÍA. ASAGAI.  
N<sup>os</sup> I al XII (1981-1987).

BULLETIN OF ENGINEERING GEOLOGY AND ENVIRONMENT. IAEG-AIGI. 1997-2002.  
*París*

BULLETIN OF ENGINEERING GEOLOGY. IAEG AIGI -. 1982-1997.  
*París.*

GARCÍA BALADO  
Método para Dosificación de Hormigones.

INTERNATIONAL SYMPOSIUM OF AGREGATES. IAEG-AIGI. 1984.  
*París.*

INSTITUTO DEL CEMENTO PORTLAND ARGENTINO  
Método para la dosificación de Hormigones

MANUAL DE TIERRAS (EART MANUAL) BUREAU OF RECLAMATION. EEUU.  
*Departament of interior. Washington D. C. (1974).Ed.. Bellisco. Madrid, 1980.*

REVISTA DE LA ASOCIACIÓN ARGENTINA DE GEOLOGÍA APLICADA A la Ingeniería y al Ambiente.  
ASAGAI. 1998-2002-07-10.

SABESINSKI, FELPERÍN.  
Proyecto de Hormigones de Cemento Portland, con agregados normales.



## Las redes hidrográficas como modelos de reconocimiento en aerofotointerpretación

Popolizio, Eliseo

### Resumen

*El trabajo pretende resaltar la importancia que tiene el reconocimiento de los tipos de redes fluviales en tareas de aerofotointerpretación. Las denominaciones asignadas a las redes fluviales por los diferentes autores son muy numerosas y llevan con frecuencia al desconocimiento del tipo o topología de la red, especialmente cuando se trata de redes complejas. En el trabajo se presenta un modelo para la designación y clasificación de las redes fluviales que permite a partir de 14 tipos elementales, realizar la combinación, entre ellos, para obtener cualquier modelo. Es evidente que la combinación de 14 tipos elementales tomados de a 14, da un número inmenso de posibilidades, de manera que cualquier red puede ser expresada mediante la leyenda que se propone en el presente trabajo. Se ilustra la combinación de los 14 tipos tomados de a 2, originando una matriz cuadrada donde los elementos simétricos a la diagonal no representan el mismo modelo. También la leyenda utilizada permite indicar si se trata de redes integradas, desintegradas, convergentes o divergentes. Además es posible indicar las paleoredes, las redes fantasmas y la tendencia evolutiva de los sistemas de escurrimiento. Este sistema de clasificación y la leyenda correspondiente fue realizado para un trabajo sobre los Bajos Submeridionales en la década del 70 y se ha venido empleando con éxito en los trabajos posteriores realizados en el Centro de Geociencias Aplicadas.*

### 1. INTRODUCCIÓN

El objetivo del presente trabajo es resaltar la importancia que tiene el reconocimiento de los tipos de redes fluviales en los trabajos de aerofotointerpretación. Por otra parte se pretende presentar un modelo de clasificación que fuera elaborado por el autor con anterioridad y que permite, a partir de tipos elementales de redes, establecer modelos combinatorios. Ello nos ha parecido importante para evitar la multiplicidad y diversidad de términos con que los diferentes autores se refieren a ella. Fue elaborado para el estudio del área conocido como los Bajos Submeridionales en la provincia de Chaco y Santa Fe de la República Argentina y a partir de allí fue empleado en todos los trabajos posteriores realizados en el Centro de Geociencias Aplicadas de la Universidad Nacional del Nordeste.

Como sabemos, la integración de los canales de escurrimiento de las aguas determinan, especialmente, un modelo

conocido como red de avenamiento que tiene una importancia fundamental en los estudios de Geomorfología y en los de Fotointerpretación.

En efecto, las características de una red puede decir muchas cosas relativas a las formas del relieve y su comportamiento y por otro lado, como son fácilmente observables en las aerofotografías, tienen gran significación en el reconocimiento de las características geomorfológicas.

Es necesario tener en consideración que los componentes de una red pueden estar integrados o desintegrados y por lo tanto es conveniente establecer una leyenda para diferenciar ambos casos. Designaremos, por lo tanto, como I a las redes integradas espacial y funcionalmente; y como D a las desintegradas (Fig. N° 1) De igual manera las redes pueden ser: Convergentes o divergentes y para indicarlo en la leyenda correspondiente utilizaremos un superíndice más o menos respectivamente. También es necesario tener en consideración que en las fotografías aéreas y en los trabajos de campaña es posible reconocer antiguas redes o paleomodelos originadas bajo condiciones diferentes de las actuales. En cuyo caso antepondremos la letra P. De esta manera la leyenda: PRI<sup>+</sup> significaría paleored integrada convergente.

Entregado: 21 de Agosto de 2001 ■ Aceptado: 31 de Octubre de 2001

Centro de Geociencias Aplicadas. UNNE.  
Las Heras 727, 3500, Resistencia, Chaco. Argentina.  
Telfax: 03722-428106.  
E-mail: epopolizio@ing.unne.edu.ar

FIGURA 1.

TIPOS ELEMENTALES DE REDES					
MODELO		Integrado	Desintegrado	Convergente	Divergente
Dendrítica	d				
Pinada	p				
Ortogonal	o				
Angular	a				
Emparrada	e				
Bayoneta	b				
Radial	r				
Anular	an				
Parabólica	pb				
Collar de Cuentas	co				
Laberíntica	l				
Flabeliforme	f				
Paralela	pa				
Cribada	c				

Finalmente hay otras redes que se encuentran sepultadas por sedimentos o son subterráneas y sin embargo pueden reconocerse en las fotografías aéreas y en ese caso antepondríamos la letra F (fantasma). No podemos dejar de considerar que el factor escala es determinante en la caracterización y reconocimiento de los tipos de redes. En este trabajo las referencias que se hacen están vinculadas a escalas comprendidas entre 1:75.000 y 1:20.000 las cuales son bastante comunes, lo que no implica que los conceptos vertidos en el trabajo se puedan aplicar en otras escalas y a las imágenes satelitarias con las debidas reservas en cada caso.

Los modelos elementales de redes usados en esta clasificación se indican en la Fig. N° 1.

## 2. TIPOS ELEMENTALES DE REDES Y SU POSIBLE SIGNIFICADO

Los modelos elementales de redes se indican con letras colocadas como subíndices y en el caso en que las redes representen combinaciones se van colocando las letras correspondientes una a continuación de la otra, separadas por comas y según el orden de importancia que tengan en la combinación como lo vemos posteriormente.

### 2.1. Red Dendrítica: (d)

Se caracteriza por presentar un aumento continuo de los tributarios desde la desembocadura hacia las cabeceras, siguiendo frecuentemente un modelo seriado en cuanto al número de

cursos de distinto orden, por ejemplo  $2^n$ , es decir, que cada segmento se divide en 2 a así sucesivamente. Generalmente se considera como insecuente, desde el punto de vista cinético, es decir, que no está controlado por la estructura, de manera tal que no existen lineamientos preferenciales que afecten a los canales de escurrimiento. Se puede decir que existe una isotropía erosiva, lo cual puede deberse tanto a la homogeneidad litológica o estructural, como a la existencia de un manto de meteorización o suelo que oculte, debido a su espesor, la influencia estructural.

Es característica de zonas con alta pluviosidad, en gran parte porque en ellas la meteorización y la edafogénesis dan lugar a regolitas y a suelos profundos que enmascaran las condiciones litoestructurales dificultando que estas se traduzcan en el lineamiento de los cursos que integran la red.

Sin embargo, en muchos casos, un modelo que en escalas pequeñas (por ejemplo: 1:100.000) se puede presentar como dendrítica, a observado a escala mayor (por ejemplo 1:25.000) puede reflejar cierto condicionamiento estructural no distinguible en las primeras. En general cuanto menor sea la escala (es decir cuanto mayor sea el área abarcada) más se impondrán los factores litoestructurales sobre aquellos de la estructura superficial del paisaje.

No se debe olvidar que el factor dominante en el génesis de este modelo es la homogeneidad, o isotropía superficial, de allí que pueda desarrollarse sobre rocas o estructuras homogéneas, aún cuando no existan condiciones de excesiva pluviosidad.

Las rocas sedimentarias horizontales o subhorizontales del tipo de las arcillas, limos y arenas o sus mezclas, representan las mejores condiciones para el desarrollo de este modelo.

Las sedimentarias compactas y las metamórficas subhorizontales pueden dar un modelo semejante, pero la existencia de diaclasas o los efectos de la esquistocidad lo degeneran en un modelo compuesto: dendrítico angular.

Las rocas plutónicas y las metamórficas de la hipozona, debido a su alto grado de homogeneidad, observada a escalas pequeñas presentan este modelo, el cual analizado detalladamente refleja siempre un modelo complejo: dendrítico-angular, como consecuencia de las diaclasas y fallas que frecuentemente afectan a estas rocas.

Este modelo puede presentarse en sus cuatro variantes, es decir: Integrado, Desintegrado, Convergente y Divergente. En áreas actualmente áridas o semiáridas se presenta frecuentemente con carácter desintegrado y obedece a una disminución de las precipitaciones, las que antiguamente pudieron haber sido más elevadas originando modelos integrados.

El modelo divergente es también bastante común en los conos de deyección y en los deltas típicos, en los cuales, también pueden aparecer modelos desintegrados como relictos paleoclimáticos.

## 2.2. Red Pinada (p)

La característica esencial que la diferencia de la dendrítica es el ángulo muy agudo que forman los afluentes y también puede presentar un modelo seriado.

Con frecuencia este modelo está asociado a la isotropía superficial y en ese caso valen todas las consideraciones hechas para la red anterior, pero siempre existe un fuerte condicionamiento asociado a la pendiente topográfica. Si esta última es muy fuerte la red se puede desarrollar sobre rocas deshomogéneas. Con frecuencia aparece en los reversos de los relieves de crestas y también donde existen planos inclinados que determinen una pendiente regional.

Al igual que el modelo anterior puede presentar las cuatro posibilidades indicadas en la Fig. N° 1 y responder también a paleomodelos, para la cual valen también las consideraciones hechas para la red dendrítica.

## 2.3. Red Ortogonal (o)

Es siempre el resultado de un fuerte condicionamiento estructural debido a geoclasas o fallas conjugadas que se cortan casi en ángulo recto, es por ello que los cursos afluentes encuentran a los colectores con ese valor angular.

Los macizos formados por rocas plutónicas o metamórficas con alto grado de metamorfismo tienden a presentar este modelo, a tal punto que suele constituir uno de los patrones básicos para el reconocimiento de este tipo de roca.

Se debe tener especial cuidado con las escalas pequeñas o muy pequeñas donde la isotropía litológica predomina sobre las discontinuidades estructurales y entonces el modelo puede parecer dendrítico.

A pesar de lo dicho, como ya lo mencionaran varios autores, este modelo puede aparecer en cuencas sedimentarias como resultado del reflejo de la tectónica de fondo, aún cuando la cobertura tenga centenares metros de espesor, lo cual se ha podido constatar en las llanuras de varios países y en la Argentina.

Es conveniente mencionar que estos lineamientos conjugados, que se cortan casi en ángulo recto, en América del sur forman dos sistemas: uno Amazónico (E-W) - São Franciscano (N-S) y el otro Caribeño (NW-SE) Brasileño (SW-NE).

## 2.4. Red Angular (a)

Valen todas las consideraciones hechas para la anterior y es el resultado de la superposición de los dos sistemas mencionados o incluso de otros lineamientos de fallas o diaclasas que controlan el encajamiento de los cursos fluviales. Como resultado de ello los ángulos de encuentro, de los afluentes con los colectores, varían de un lugar a otro.

Por la misma razón, lo que mencionáramos para la red anterior, este modelo a escalas pequeñas puede confundirse con uno dendrítico.

## 2.5. Red Emparrada (e)

Se caracteriza por que los cursos principales son muy largos y de carácter subsecuente, en tanto que los afluentes son cortos y confluyen en ángulo recto con carácter de obsecuente y consecuente.

Responde, generalmente, a un fuerte condicionamiento estructural originado por estratos inclinados y hasta verticales correspondientes a estructuras monoclinales o a los lados o limbos de estructuras plegadas.

Los cursos afluentes de mayor longitud siguen la dirección del buzamiento y por lo tanto permiten determinarlo, lo que también constituye una clave de fotointerpretación. La alternancia de estratos de diferente resistencia a la erosión origina una fuerte anisotropía superficial que controla la dirección dominante de la red, razón por la cual el curso principal sigue la dirección del rumbo de los estratos. Por la misma razón es frecuente un modelo combinado paralelo-emparrado.

## 2.6. Red Bayoneta (b)

Se caracteriza por presentar cursos rectilíneos que bruscamente cambian de dirección en, aproximadamente,  $90^\circ$  por un corto tramo para retomar nuevamente la dirección primitiva.

Es característica de relieves plegados, especialmente del tipo apalacheano y refleja fenómenos de sobreimposición de una red sobre una estructura, exhumada progresivamente. Sin embargo, modelos semejantes pueden tener lugar en redes paralelas con procesos de captura originado por un tributario.

También puede darse sobre cordones eólicos paralelos o morrenas con el mismo modelo, por sobreimposición o por procesos de captura. Igualmente puede indicar la presencia de una falla transversal al escurrimiento o una geoclasea con esas características.

## 2.7. Red Radial (r)

En este caso los cursos principales se disponen como los rayos de una rueda y pueden ser, lógicamente, convergentes o divergentes. Responden tanto a condiciones estructurales como morfológicas, por lo cual deben analizarse con sumo cuidado antes de emitir juicio sobre su génesis. En general, toda forma circular o una depresión circular va a originarla; por ejemplo los volcanes, los relieves residuales más o menos cupulares o cónicos, las depresiones estructurales, eólicas o de asentamiento diferencial más o menos circulares.

Puede ser observado en escalas muy diferentes, por ejemplo sobre una gran cubeta sedimentaria en forma de plato o en pequeñas depresiones pseudokársticas, en estas últimas presenta un aspecto que ha sido designado en Argentina como modelo "en estrella" o "araña" por algunos autores. Sin embargo, la posibilidad de estar asociada a condicionamientos estructurales dómicos (diapiros de sal o de arcilla, lacolitos, pequeños batolitos, etc.) han dado una gran importancia a este tipo de modelo.

Puede ser el primer elemento para reconocer un área potencialmente rica en minerales, como por ejemplo los domos salinos asociados al petróleo. En las llanuras las depresiones kársticas o pseudokársticas, eólicas, de lagos o lagunas más o menos circulares, dan lugar frecuentemente a este modelo.

## 2.8. Red Anular (an)

Con frecuencia está asociada a modelos morfológicos y estructurales semejantes a los citados para la red anterior pero requiere que la morfología o la estructura determinen un zoneamiento diferencial frente a la erosión dispuestos en anillos concéntricos.

Desde el punto de vista estructural estas condiciones pueden deberse a fallas circulares o concéntricas, o a estratos dispuestos en estructuras dómicas o de cubeta, biselados por la erosión, la cual origina una sucesión de estratos con diferente resistencia a la misma.

Las deformaciones estructurales generadas por los lacolitos, lopolitos e intrusiones de pequeños batolitos, o el zoneamiento metamórfico anular pueden dar lugar a este tipo de red. En algunos casos los cordones de playa anulares que se originan por la progresiva desecación de un lago pueden determinar este modelo y algunos estratos volcanes erosionados, también pueden originarlo. Finalmente debemos decir que es frecuente la asociación de estos dos últimos tipos de redes mencionadas originando un modelo radioanular.

## 2.9. Red Parabólica (pb)

Puede obedecer a un condicionamiento estructural tal como ocurre en la nariz o proa de anticlinales o sinclinales, que han sido parcialmente desmantelados. También puede aparecer asociada con una morfología de cordones eólicos de tipo parabólico o bien bordeando las morrenas frontales de los glaciares.

## 2.10. Red Collar de Cuentas (co)

Se caracteriza por la intercalación de una serie de depresiones a lo largo del eje fluvial, como si formaran un rosario y determinan condiciones muy favorables para la regulación del escurrimiento, ya que las depresiones actúan como embalses reguladores.

Puede estar condicionada a muchos factores y puede ser mono o poligenética.

La presencia de depresiones eólicas, antiguas o exhumadas interligadas por un sistema fluvial actual, la interconexión de depresiones kársticas o pseudokársticas y los asentamientos diferenciales por compactación de sedimentos a lo largo de un eje fluvial, pueden originarla y representan modelos frecuentes en las llanuras.

La interconexión de lagos de represamiento morrénico por un curso fluvial, y a nivel antrópico la construcción de represas escalonadas pueden dar lugar.

## 2.11. Red Laberíntica (l)

Implica una total desorganización del escurrimiento sin que por ello se pierda el sentido general del flujo de las aguas, que en muchos casos es fácilmente detectable.

Sus formas más frecuentes se dan en áreas kársticas y pseudokársticas, donde las depresiones y los canales se pueden interligar en diferentes direcciones. También puede aparecer sobre planicies de erosión glaciaria o sobre paleomodelos eólicos parcialmente desmantelados. El modelo conceptualmente puede aplicarse a planicies fluviales y áreas deltáicas donde una maraña de canales se entrecruzan y pueden ligarse con depresiones de todo tipo sin que por ello pueda hablarse de una red en sentido estricto.

## 2.12. Red Flabeliforme (f)

El término fue creado por la Dra. Pierina Pasotti para un modelo muy frecuente en la provincia de Santa Fe (Argentina), pero que también se presenta en otras áreas de llanura y en zonas de relieve elevado. Es consecuencia de un endicamiento, estructural o morfológico, que obliga a un sistema de cursos paralelos a cambiar de dirección y converger hacia uno central que consigue salvar el obstáculo a causa del aumento de la capacidad erosiva. Esto indica que los cursos corrían por una superficie antecedente y al generarse el obstáculo por un levantamiento tectónico o un proceso de erosión diferencial se originó la red mencionada.

Con frecuencia se da en los relieves de cuestas, en las áreas de plataforma o por levantamiento de bloques tectónicos basculados, en cuyo caso es indicio de la presencia de una falla.

Como hemos dicho en las llanuras se pueden manifestar los movimientos tectónicos del basamento aunque la cobertura sedimentaria sea muy espesa, pudiendo aparecer este tipo de red, como lo indicara la Dra. Pasotti; para la provincia de Santa Fe.

## 2.13. Red Paralela (pa)

Este tipo de red pura no puede ser convergente ni divergente. La existencia de una red de estas características indica una adecuación muy particular entre la topografía y el escurrimiento además de una fuerte isotropía superficial. En efecto, la topografía debe estar condicionada a la pérdida de energía del escurrimiento debido a la velocidad, de manera tal que sea

imposible el derrame de las aguas fuera de los canales de escurrimiento, ya que de lo contrario se originaría una inmediata o paulatina integración entre ellos hacia un modelo pinado.

Con frecuencia este modelo no aparece en su forma elemental o pura, por ejemplo puede estar condicionado por lineamientos estructurales originados por estratos inclinados biselados por una superficie de erosión, pero en este caso, frecuentemente, solo los cursos principales o subsecuentes son paralelos, en tanto que el modelo tiende a ser del tipo emparrado.

En algunos casos y en escalas pequeñas pueden deberse a un gradiente regional muy homogéneo o a la presencia de fallas paralelas.

A pesar de lo dicho es importante considerarlo como modelo elemental ya que participa en muchas combinaciones.

2.14.Red Cribada (c)

Se caracteriza por una serie de depresiones aisladas donde se puede insumir el agua o por donde puede afluir, indicando en ese caso la existencia de una red subterránea.

Es típica del karst y del pseudokarst, en las cuales el escurrimiento superficial y el subterráneo están íntimamente vinculados. También puede aparecer en algunas planicies paleoclizadas y glaciarias sobre depósitos de morrenas de fondo o frontales.

Por extrapolación se usa el término de red cribada para designar a un conjunto de depresiones aisladas con presencia de agua, de manera transitoria o permanente. En algunas llanuras, como en las argentinas, frente al exceso de precipitaciones estas depresiones pueden conectarse entre si modificando el modelo. Como podemos ver en la Fig. N° 2 esta red no presenta la posibilidad de ser integrada, convergente y/o divergente, pero en algunos casos si se tiene en cuenta el escurrimiento subterráneo ello puede ocurrir, en el caso de paleorredes o redes fantasmas, pero evidentemente se trata de redes compuestas.

2.15.Redes Compuestas

El emplear redes elementales o puras da la posibilidad de combinarlas para obtener redes compuestas. Si tenemos en cuenta que aquellas son catorce y se pueden combinar de a dos, de a tres o hasta de a catorce, el número de combinaciones es inmenso, de manera que se puede representar cualquier red y escribir la leyenda correspondiente.

En la Fig. N° 2 hemos indicado una matriz formada por las catorce redes tomadas de a dos donde la diagonal representaría las redes puras y aparentemente sería simétrica. Debemos destacar que no es así; por ejemplo en la Fig. N° 3 se indica las características de una red dendrítica ortogonal y su simétrica ortogonal-dendrítica; pudiendo apreciarse no solamente su diferencia topológica sino también las características estructurales que estarían representando.

FIGURA 2. MATRIZ CRUZADA DE TIPOS ELEMENTALES DE REDES

	d	p	o	a	e	b	r	an	pb	co	l	f	pa	c
	dendrítica	pinada	ortogonal	angular	emparrada	bayoneta	radial	anular	parabólica	collar de cuentas	laberíntica	flabeliforme	paralela	cribada
d	dendrítica	dp	do	da	de	db	dr	dan	dpb	dco	dl	df	dpa	dc
p	pinada	pd	po	pa	pe	pb	pr	pan	ppb	pco	pl	pf	ppa	pc
o	ortogonal	od	op	oa	oe	ob	or	oan	opb	oco	ol	of	opa	oc
a	angular	ad	ap	ao	ae	ab	ar	aan	apb	aco	al	af	apa	ac
e	emparrada	ed	ep	eo	ea	eb	er	ean	epb	eco	el	ef	epa	ec
b	bayoneta	bd	bp	bo	ba	be	br	ban	bpb	bco	bl	bf	bpa	bc
r	radial	rd	rp	ro	ra	re	rb	ran	rpb	rco	rl	rf	rpa	rc
an	anular	and	anp	ano	ana	ane	anb	anr	anpb	anco	anl	anf	anpa	anc
pb	parabólica	pbd	pbp	pbo	pba	pbe	pbb	pbr	pban	pbco	pbl	pbf	pbpa	pbc
co	collar de cuentas	cod	cop	coo	coa	coe	cob	cor	coan	copb	col	cof	copa	coc
l	laberíntica	ld	lp	lo	la	le	lb	lr	lan	lpb	lco	lf	lpa	lc
f	flabeliforme	fd	fp	fo	fa	fe	fb	fr	fan	fpb	fco	fl	fpa	fc
pa	paralela	pad	pap	pao	paa	pae	pab	par	paan	papb	paco	pal	paf	pac
c	cribada	cd	cp	co	ca	ce	cb	cr	can	cpb	cco	cl	cf	cpa



FIGURA 3. MODELOS DE REDES DENDRÍTICA ORTOGONAL Y/O ORTOGONAL DENDRÍTICA

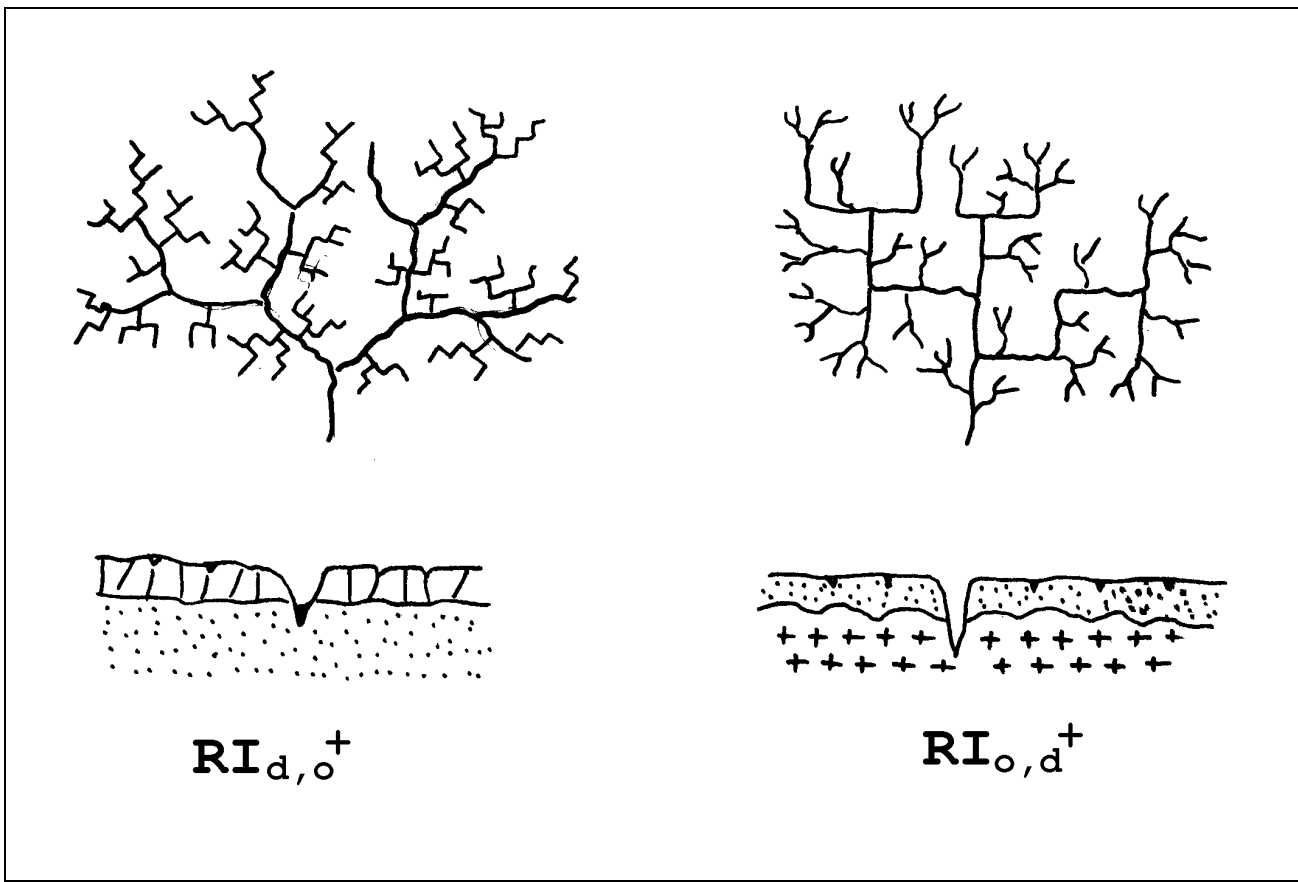
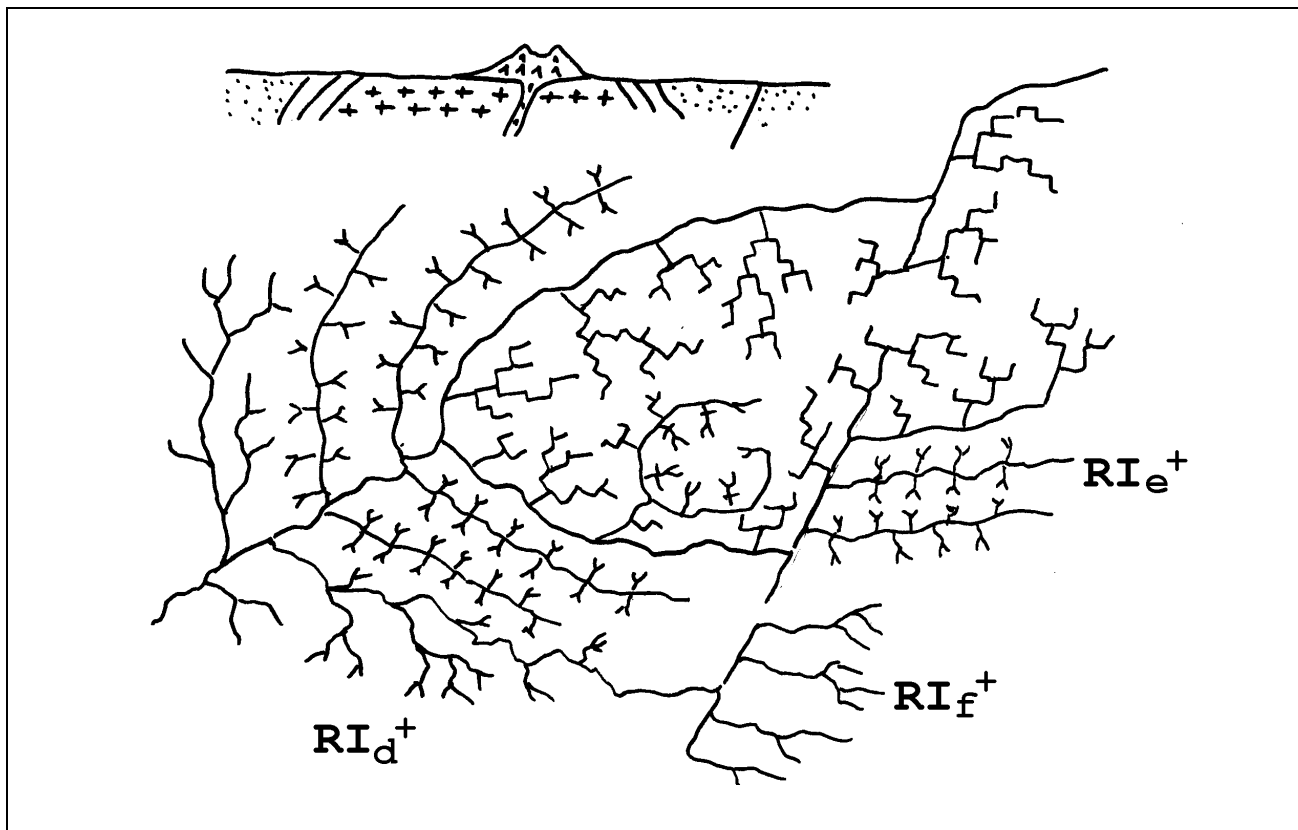


FIGURA 4. MODELO DE REDES EN UN AMBIENTE VOLCÁNICO



En el primer caso la red está indicando que los cursos principales están trabajando, a mayor profundidad, una roca subyacente isotrópica del tipo de las sedimentarias no compacta y los cursos secundarios, menos profundos, están controlados por una roca compacta diaclasada.

En el segundo caso los cursos principales sufren un fuerte control estructural, a causa de fallas o geoclasas, de una roca masiva, en tanto que los cursos secundarios se desarrollan sobre un profundo manto meteorizado que determina isotropía superficial. El sistema permite también, mediante la leyenda empleada, indicar la existencia de redes superpuestas mediante el signo más (+), por ejemplo una red integrada dendrítica que tiene subyacente una red fantasma integrada dendrítica-cribada, ambas convergentes pero con diferente sentido y se escribiría:

$$RI_d^+ + FRI_{d,c}^+$$

También el sistema permite mediante flechas indicar la tendencia evolutiva de las redes. Por ejemplo una red desintegrada cribada podría pasar a una red integrada, dendrítica, dendrítica, collar de cuentas, convergente y finalmente a una típica dendrítica lo cual se escribiría de la siguiente manera:

$$RD_c \quad RI_{d,co}^+ \quad RI_d^+$$

Finalmente y a título de ejemplo se indica en la Fig. N° 4 un modelo esquemático donde, mediante el análisis de las redes se puede deducir que existe un aparato volcánico sobre una planicie de erosión, debajo de la cual se encuentra un anticlinal cuya proa es perfectamente reconocible y que está afectado por una falla casi transversal que ha dislocado la estructura.

### 3. CONCLUSIONES

Creemos que la clasificación propuesta puede ser de gran utilidad evitando la multiplicación de nombres para cada tipo de red mediante el empleo de los modelos combinatorios.

El empleo del método en escalas pequeñas y grandes, como por ejemplo en imágenes satelitarias y fotografías aéreas permite comparar las inferencias logradas a diferente escala de trabajo obteniendo una mayor aproximación a la realidad, especialmente cuando se está trabajando en áreas relativamente extensas.

Finalmente no se puede dejar de destacar que el sistema propuesto permite indicar, mediante la leyenda, la tendencia natural o antrópica lo cual tiene enorme importancia en la Geomorfología Prospectiva, indispensable en los trabajos de aplicación.



## Estimación de la recarga de las aguas subterráneas a partir de la elaboración y análisis de mapas de suelo

Rivas, Raúl <sup>1</sup> - Varni, Marcelo - Entraigas, Ilda - Usunoff, Eduardo

### Resumen

*La recarga del agua subterránea es el proceso por el cual la precipitación que infiltra el suelo y no es perdida por evapotranspiración, drena a través del perfil no saturado y pasa a formar parte del agua subterránea. La determinación de la recarga es de vital importancia para la planificación y gestión de los recursos hídricos. Dada la alta variabilidad espacial de los parámetros climáticos, biológicos y geológicos, las medidas puntuales no permiten obtener estimaciones adecuadas de la recarga areal. Por lo tanto, es necesario recurrir a metodologías que tengan en cuenta la variabilidad espacial de los factores más relevantes para el cálculo de la recarga.*

*La zona de estudio es el partido de Salliqueló, de 794 Km<sup>2</sup> de superficie, ubicado al oeste de la provincia de Buenos Aires, Argentina. La metodología propuesta en este trabajo utiliza la información proveniente de la clasificación del uso del suelo a partir de imágenes registradas por Landsat TM 5, digitalización de las cartas de suelos a escala 1:50000 e información meteorológica de la zona para el período 1983-1996 (precipitación y temperatura).*

*Para las diferentes combinaciones entre el uso y tipo de suelo se calcularon balances de agua a escala mensual según la metodología de Thornthwaite y Mather. Como resultado de los balances mensuales se obtuvo la distribución espacial de la recarga, con valores anuales comprendidos entre 124 y 149 mm. Estos valores pueden cambiar si se modifica el uso del suelo, y es en estos casos que se puede recurrir a la clasificación de imágenes de satélite actualizadas y así recalculan la recarga para cada zona mediante el uso de un sistema de información geográfica.*

*La metodología presentada contribuye a evaluar la recarga al acuífero permitiendo discriminar su variación espacial, convirtiéndose en una poderosa herramienta para la gestión y protección del recurso hídrico subterráneo en el partido de Salliqueló, ya que es el único disponible para el consumo humano, animal y el uso industrial. Además, considerando que el agua dulce en la zona es escasa, merece resaltarse la importancia del resultado obtenido.*

### 1. INTRODUCCIÓN

La recarga del agua subterránea es el proceso por el cual la precipitación que infiltra el suelo y no es perdida por evapotranspiración, drena a través del perfil no saturado y pasa a formar parte del agua subterránea. El conocimiento de la recarga es de vital importancia para estudios y para la planificación y gestión de los recursos hídricos. Dada la variabilidad espacial de este parámetro se hace necesario recurrir a técnicas que no involucren medidas puntuales las cuales conducen a estimaciones

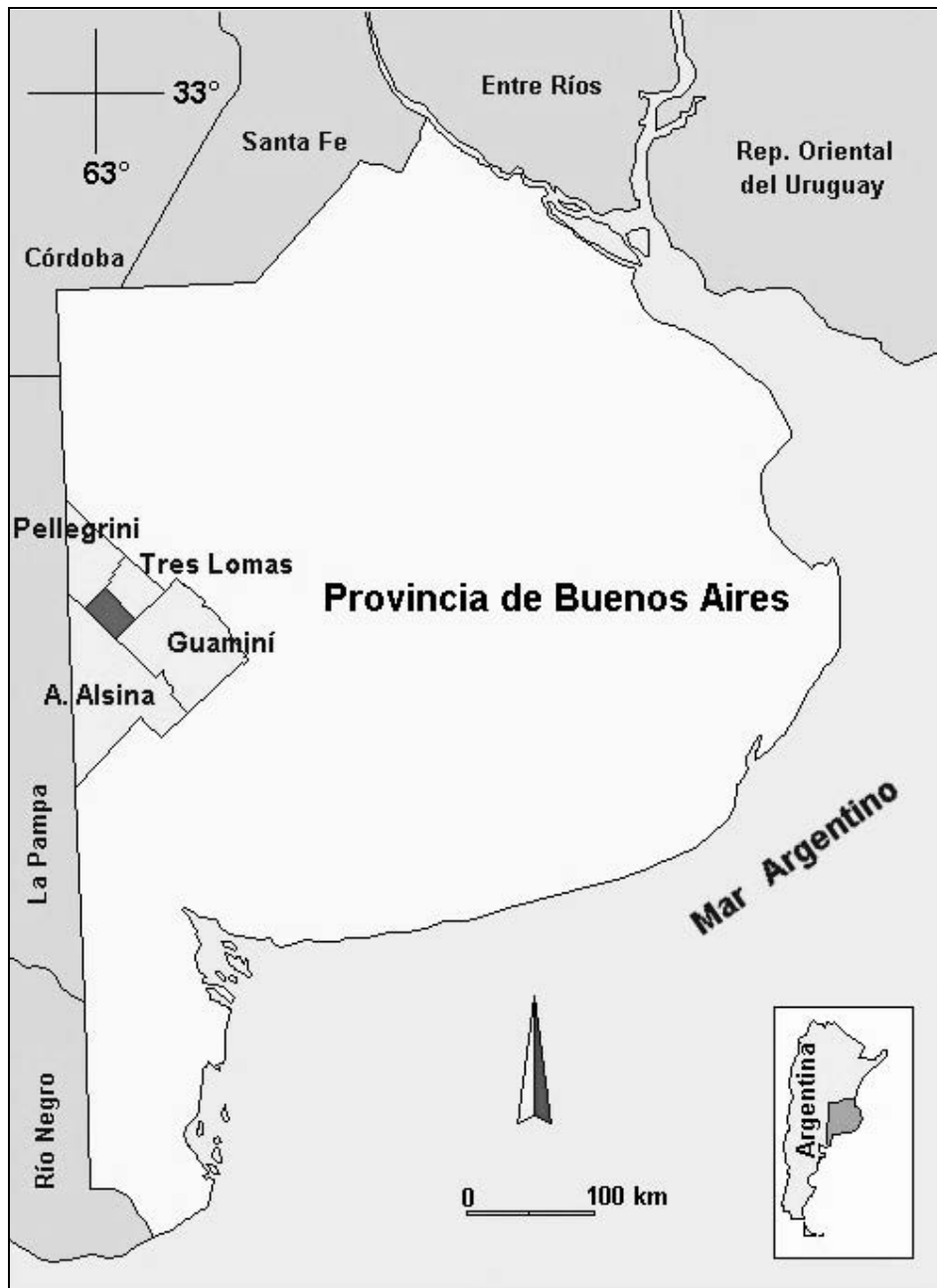
inadecuadas. El presente trabajo intenta evaluar la distribución espacial de la recarga de agua al acuífero utilizando mapas temáticos elaborados a partir de información satelital, datos meteorológicos y cartas de suelo.

El sector de estudio se ubica en la región centro oeste de la provincia de Buenos Aires, Argentina más específicamente en el partido de Salliqueló. Abarca una superficie de 794 km<sup>2</sup>, y limita con los partidos de Guaminí, Adolfo Alsina, Tres Lomas y Pellegrini. Tiene forma de rectángulo alargado, con su eje mayor en dirección NO-SE, extendiéndose por sus vértices extremos entre los 36° 28' 50" y 36° 51' 50" de latitud sur y 62° 48' 40" y 63° 16' 50" de longitud oeste (Fig. 1).

Entregado: 15 de Agosto de 2001 ■ Aceptado: 10 de Setiembre de 2001

<sup>1</sup> Instituto de Hidrología de Llanuras,  
CC 44 (7300) Azul, Bs. As.,  
ilda@faa.unicen.edu.ar

FIGURA 1. UBICACIÓN DEL PARTIDO DE SALLIQUELÓ EN LA PROVINCIA DE BUENOS AIRES, ARGENTINA



La geomorfología de la región corresponde a una planicie arenosa ondulada generada fundamentalmente por fenómenos hídricos (de escurrimiento difuso) y eólicos (de acumulación-deflación) (Salazar Lea Plaza 1980). Estos han dado lugar a la morfología actual, arenosa y ondulada con planicies intermedias y frecuentes áreas deprimidas que albergan lagunas freáticas (González 1986). Este relieve de pequeñas áreas positivas y negativas se corresponde con una marcada variación de calidad en las aguas subterráneas. Las áreas positivas contienen agua de bajo contenido en sales debido a su posibilidad de favorecer la infiltración del agua de lluvia, actuando como áreas de recarga, mientras que en las partes bajas (áreas negativas) las aguas aumentan su contenido salino por ser zonas de descarga de agua subterránea (Varni et al. 2000).

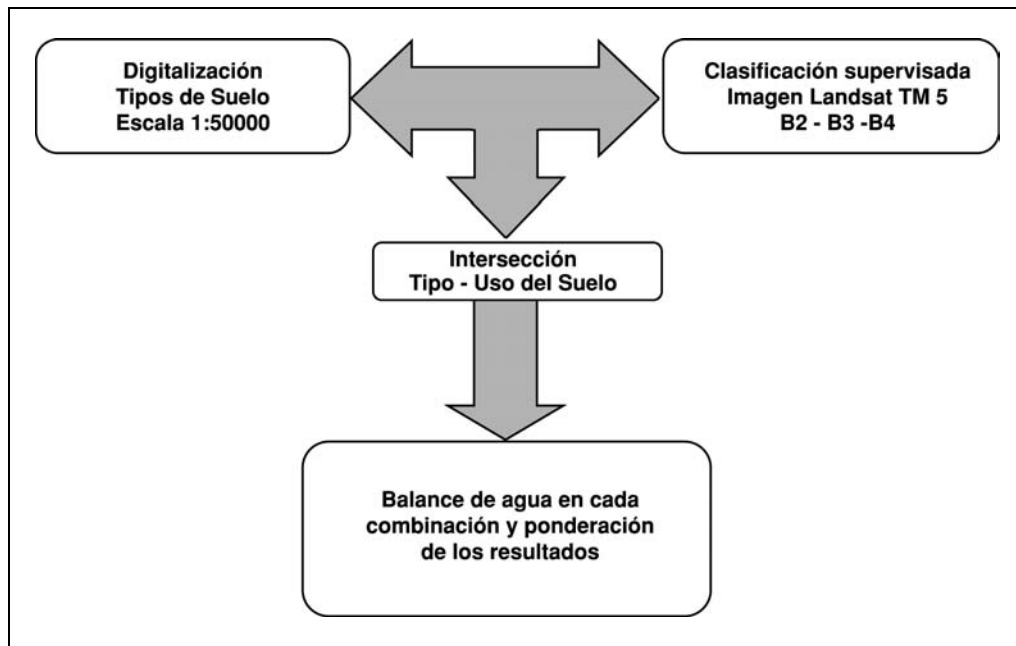
En este paisaje de llanura, alejado de montañas, los sedimentos que lo componen son limosos y loessoides, cubiertos en

parte por arenosos (médano invasor) (Tapia 1935). Estos, cuando son de poco espesor, no influyen fuertemente en las condiciones hidrogeológicas; pero donde originan cuerpos de un volumen y morfología marcada presentan características locales interesantes para la extracción de agua dulce para consumo humano (Sala 1981).

La profundidad de los niveles freáticos medidos en los pozos de la región es función de la ubicación topográfica de la perforación. Para las zonas altas el desarrollo de la zona de aireación está comprendida entre 3 y 7 metros, mientras que para los sectores bajos es cercana al metro, pudiendo en períodos lluviosos aflorar el agua freática.

El clima, de acuerdo a la clasificación climática de Thornthwaite es subhúmedo seco, mesotermal, con nulo o pequeño exceso de agua y con baja concentración de la eficiencia térmica (Morosi et al. 1987).

FIGURA 2. ESQUEMA DE LA METODOLOGÍA DEL TRABAJO



## 2. METODOLOGÍA

Se utilizaron las imágenes registradas por Landsat TM 5, cartas de suelos del partido de Salliqueló a escala 1:50.000, información meteorológica de la zona para el período 1983-1996 (precipitación y temperatura), e información estadística de uso del suelo en el partido.

El diagrama siguiente (Fig. 2) muestra esquemáticamente la metodología de trabajo.

Para la clasificación supervisada de la imagen satelital se identificaron parcelas de control en la composición color obtenida por combinación de las bandas 2, 3 y 4 de Landsat TM 5. Las clases seleccionadas (usos del suelo) fueron: laguna, bajo, pastura, pasto llorón, rastrojo-arado-sembrado, campo natural y urbano. Se analizaron las matrices de confusión para cada clase y se crearon las respuestas espectrales para cada una de ellas. Una vez obtenida las curvas espectrales, se clasificó la imagen correspondiente al partido utilizando la regla de Bayes, que reposa en la hipótesis de la normalidad de los valores radiométricos (Muller 1996).

La digitalización de las cartas de suelo del INTA (1993, 1994) se realizó utilizando el programa Ilwis 2.2 (ITC 1998). Las series de suelo fueron reclasificadas de acuerdo a su composición textural de la siguiente manera: 25 de Mayo y Phajouapé, arenosos; Bolívar y Piedritas, franco arenosos y Epecuén, franco. Por último se procedió a la intersección de los mapas temáticos de suelos y de usos del suelo.

Para el cálculo de la evapotranspiración potencial (ETP) se utilizó la fórmula de Thornthwaite (Thornthwaite 1955) que requiere disponer de los valores de temperatura media mensual. Se calcularon los valores de ETP media mensuales y por sumatoria de los anteriores la ETP media anual. Para la estimación de la evapotranspiración real (ETR) se utilizó el método de Thornthwaite y Mather (1957), con el que se realiza un balance de agua a nivel del suelo. Para aplicar este método se requiere conocer la capacidad de almacenamiento de agua del suelo por unidad de espesor y la profundidad radicular.

Se calculó para cada combinación de suelo y uso del mismo el agua útil disponible para las plantas según:

$$AU = Da * (CC - PMP) * Hr \quad (1)$$

donde,

AU: agua útil,  
Da: densidad aparente,  
CC: capacidad de campo,  
PMP: punto de marchitez permanente, y  
Hr: profundidad radicular.

De la diferencia entre capacidad de campo y el punto de marchitez permanente se obtiene el agua útil porcentual (peso en peso) por metro de profundidad. Su producto por la densidad aparente permite pasar de proporciones en peso a proporciones en volumen. Finalmente, la profundidad radicular lleva el agua útil por metro a agua útil total.

Los usos del suelo considerados y su profundidad radicular correspondiente fueron: pastura y/o cereal (1.05 m), pasto llorón (1.30 m), rastrojo (1.17 m) y campo natural (0.80 m). Existe un quinto uso del suelo con pequeña representatividad areal, que es el uso urbano, al que se le asignan los mismos parámetros que al campo natural. La profundidad radicular fue tomada de los valores promedio de la vegetación preponderante en cada zona (Doorembos y Pruitt 1977).

Los tipos de suelo definidos fueron: arenoso, franco arenoso y franco. Las áreas lagunares no fueron consideradas en el análisis. Para cada uno de estos suelos se tomaron de Hillel (1982) la densidad aparente, la capacidad de campo y el punto de marchitez permanente.

Por último, se calcularon los excesos hídricos de agua en cada conjunto suelo-uso según la metodología de Thornthwaite y Mather (1957) y, que para la región corresponde a la recarga dada la ausencia de escurrimiento superficial. Los valores obtenidos se ponderaron de acuerdo a su representatividad en el partido.

### 3. RESULTADOS

Los valores radiométricos mínimos y máximos para cada banda son los que se presentan en la Tabla 1. Estos corresponden a la imagen de agosto de 1998 que se considera la más representativa del uso del suelo en el área de estudio en relación a las estadísticas productivas del partido.

**TABLA 1. VALORES RADIOMÉTRICOS DE LAS BANDAS CONSIDERADAS**

	Banda 2	Banda 3	Banda 4
Radiometría	8-31	11-51	5-71

El resultado de la clasificación de uso del suelo es presentado en la Fig. 3. Es posible observar que los predios donde se practica agricultura presentan manchones con campo natural o pasto llorón. Ello se debe a la alta susceptibilidad de los suelos a la erosión eólica por lo cual los agricultores evitan el laboreo

de estos sectores y, en casos excepcionales fijan a éstos con la implantación de pasto llorón.

El resultado de la intersección de uso del suelo (Fig. 3) y tipo de suelo luego de la reclasificación de las series (Fig. 4) da como resultado 10 combinaciones (Tabla 3). En la Figura 5 se presenta el mapa obtenido de la intersección.

Los valores de ETP mensual obtenida para el período utilizando la fórmula de Thornthwaite se muestran en la Tabla 2. El valor de ETP media anual es de 787 mm. En la Figura 6 se han graficado los valores de precipitación y de evapotranspiración potencial mensual. Los meses que presentan déficit hídrico son Diciembre, Enero, Febrero y Junio.

En la Tabla 3 se presentan las combinaciones de uso y tipo del suelo, su agua útil, la evapotranspiración real, la superficie de la combinación, el ponderador (Si/St), la recarga, la recarga ponderada por la proporción de área y déficit anual. Se observa que, a pesar de la variedad de combinaciones entre suelo y uso, sólo existe déficit en las combinaciones entre menor profundidad radicular (campo natural y pastura) y el suelo arenoso, dada su menor agua útil por metro de espesor. La ETR es menor que la ETP solamente en el caso que exista déficit.

**TABLA 2. PRECIPITACIÓN Y ETP MEDIAS MENSUALES PARA EL PERÍODO 1983-1996**

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic
P (mm)	128	87	117	82	64	17	42	47	57	87	103	81
ETP (mm)	131	102	87	56	35	19	20	26	39	65	86	121

**FIGURA 3. RESULTADO DE LA CLASIFICACION SUPERVISADA DE LA IMAGEN LANDSAT TM 5**

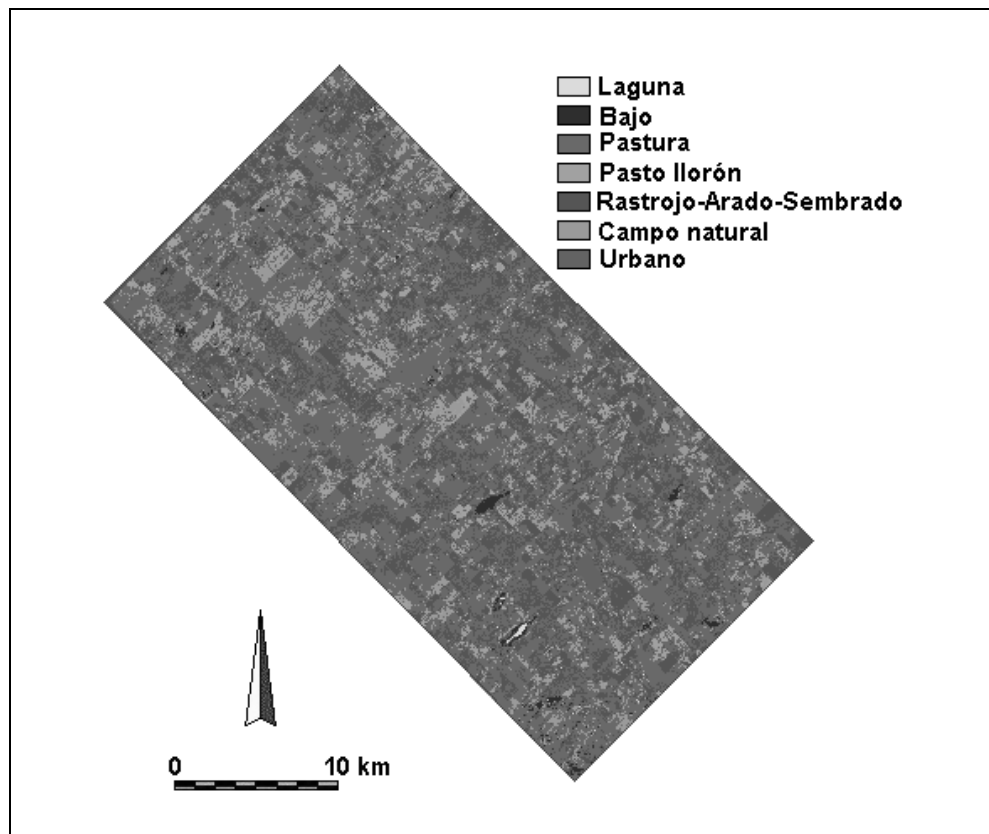


FIGURA 4. DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LOS TIPOS DE SUELOS A PARTIR DE LA RECLASIFICACIÓN DE LAS SERIES

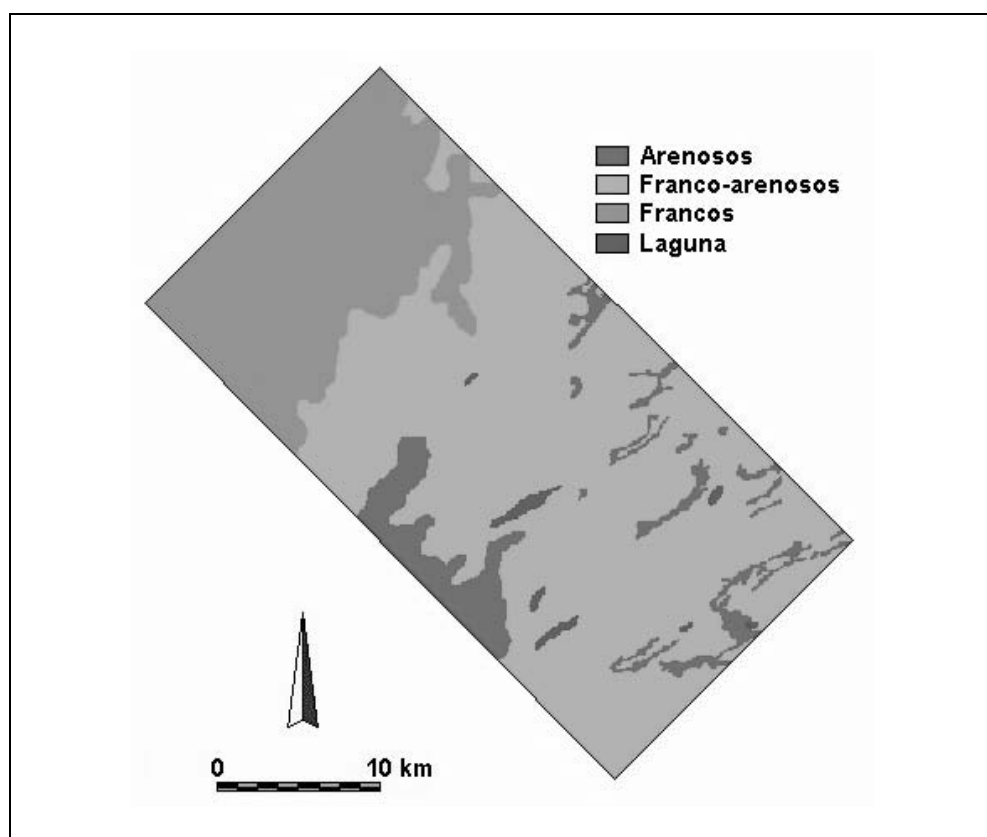


TABLA 3. COMBINACIONES DE USO Y TIPO DE SUELO, AGUA ÚTIL Y RESULTADOS DEL BALANCE CORRESPONDIENTE  
 Los valores de ETR, recarga y déficit son valores medios

Uso del suelo	Tipo de suelo	AU (mm)	ETR (mm)	$S_i$ (km <sup>2</sup> )	$(S_i/S_t)$	Recarga (mm)	$R_i^*(S_i/S_t)$ (mm)	Déficit (mm)
Pastura	Arenoso	54	782	37.8	0.05	129	6	5
Pastura	Franco arenoso	126	787	300.5	0.38	124	47	-
Pastura	Franco	176	787	122.5	0.15	136	21	-
Pasto llorón	Franco arenoso	156	787	31.6	0.04	124	5	-
Pasto llorón	Franco	218	787	19.23	0.02	124	3	-
Rastrojo	Arenoso	60	787	18.45	0.02	124	3	-
Rastrojo	Franco arenoso	140	787	138.9	0.17	124	22	-
Campo natural	Arenoso	34	762	56.78	0.07	149	11	25
Campo natural	Franco arenoso	96	787	36.42	0.05	124	6	-
Campo natural	Franco	134	787	16.9	0.02	124	3	-

FIGURA 5. RESULTADO DE LA INTERSECCIÓN ENTRE USO Y TIPO DEL SUELO.

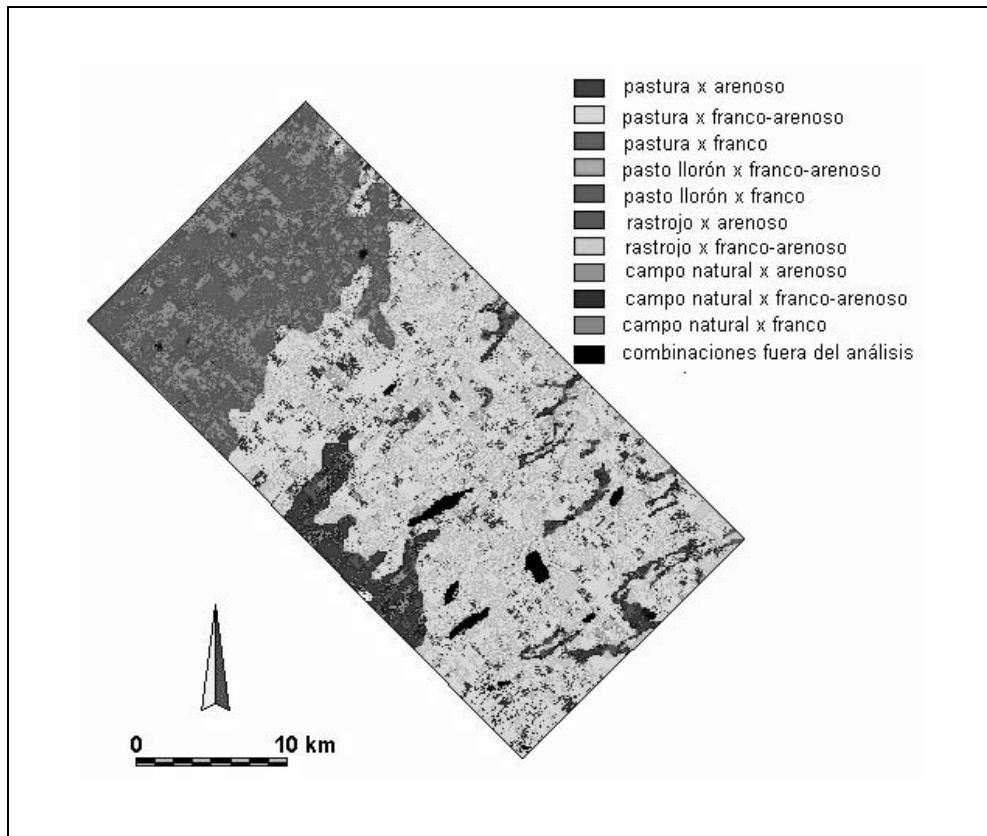
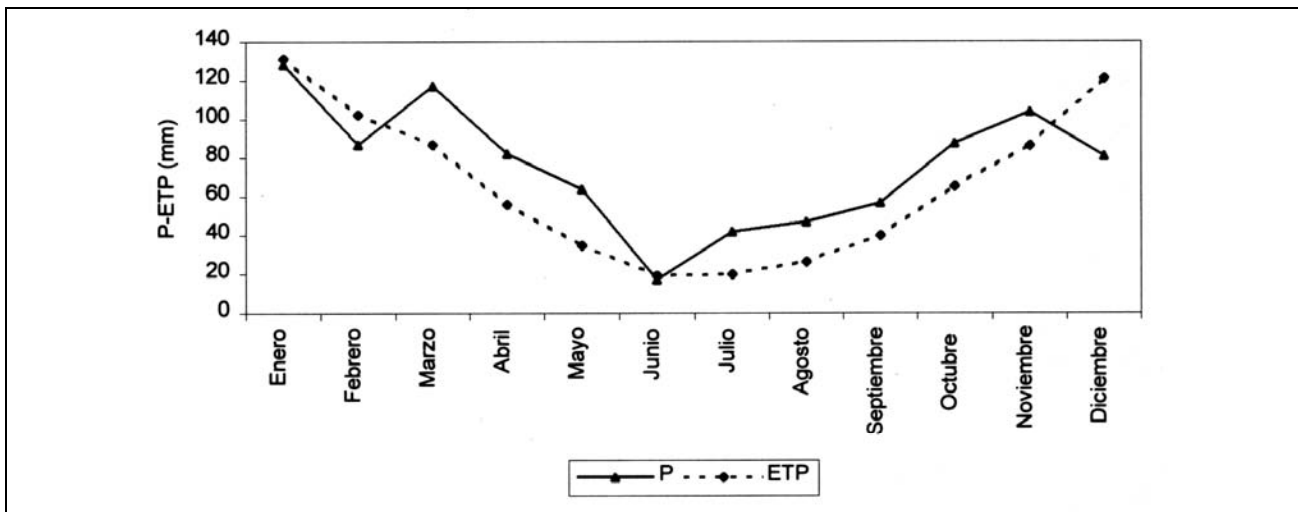


FIGURA 6.



A partir de los resultados observa que es posible distinguir cuatro zonas de recarga diferente. Los valores de recarga son: 124 mm, 129 mm, 136 mm y 149 mm (Fig. 7). La máxima recarga se presenta en las zonas arenosas con campo natural que es coincidente con sectores medianosos. La recarga calculada para la zona de estudio una vez ponderada es de 125 mm.

#### 4. CONCLUSIONES

La metodología propuesta contribuye a evaluar la recarga al acuífero permitiendo discriminar su variación espacial. Evidentemente, un mapa como el obtenido es una poderosa herramienta para la gestión y protección del recurso hídrico subterráneo en el partido de Salliqueló. Este recurso es el único disponible para el consumo humano, animal y el uso industrial.

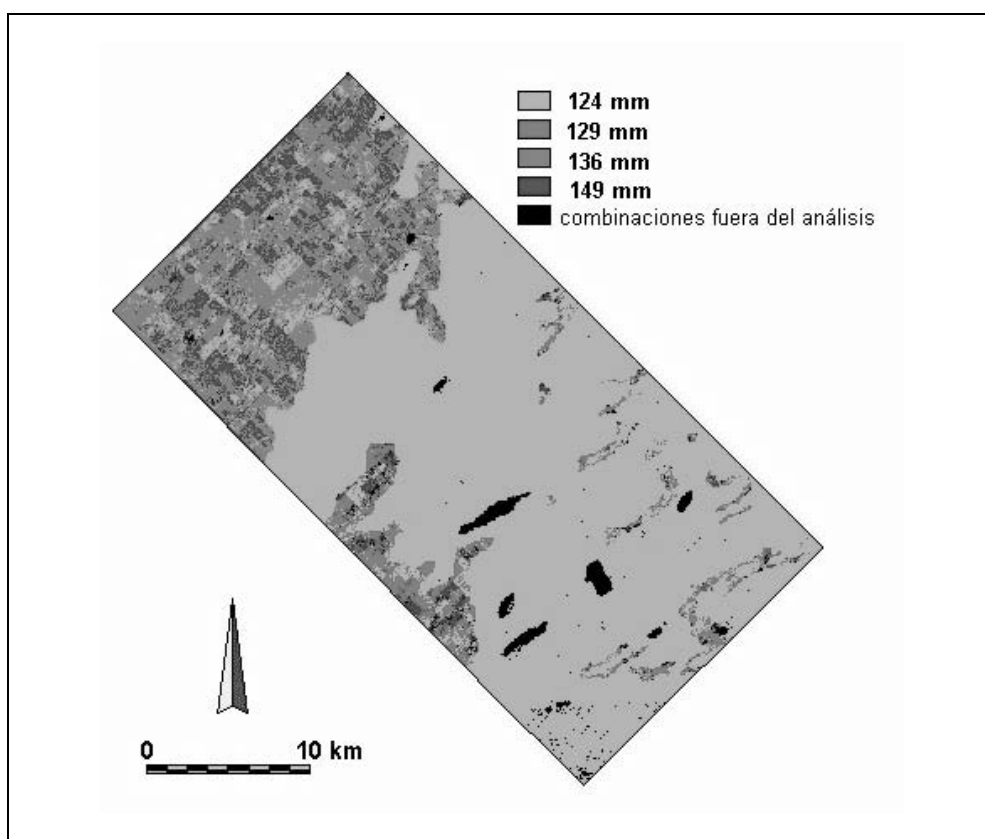
Considerando que el agua dulce en la zona es escasa, merece resaltarse la importancia del resultado obtenido.

Se han identificado zonas con valores de recarga de 124 mm, 129 mm, 136 mm y 149 mm. Estos valores pueden cambiar si se modifica el uso del suelo, y es en estos casos que se puede recurrir a la clasificación de imágenes de satélite actualizadas y así recalculer la recarga para cada zona mediante el uso de un sistema de información geográfica.

Por otro lado, también se destaca la versatilidad permitida por los Sistemas de Información Geográfica para el logro de mapas temáticos originados a partir de las más diversas fuentes, lo que posibilita la utilización de datos de distinta naturaleza para un amplio espectro de objetivos.



FIGURA 7. ZONAS DE RECARGA OBTENIDAS



## 5. TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

- DOOREMBO, J. Y W. PRUITT, 1977.  
Las necesidades de agua de los cultivos.  
*Estudios FAO: riego y drenaje* 24, 144 páginas.
- GONZÁLEZ, N., M. HERNÁNDEZ Y C. VILELA, 1986.  
Léxico Hidrogeológico.  
*Comisión de Investigaciones Científicas de Buenos Aires, La Plata*, 249 páginas.
- HILLEL, D., 1982.  
Introduction to Soil Physics.  
*Academic Press, New York*, 364 páginas.
- INSTITUTO NACIONAL DE TECNOLOGÍA AGROPECUARIA, 1993.  
Carta de Suelos de la República Argentina.  
*Hojas 3763-9, 3763-10 y 3763-15. CIRN. Castelar.*
- INSTITUTO NACIONAL DE TECNOLOGÍA AGROPECUARIA, 1994.  
Carta de Suelos de la República Argentina.  
*Hoja 3763-16. Centro de Investigaciones de Recursos Naturales. Castelar.*
- ITC, 1998.  
ILWIS 2.2. The Integrated Land and Water Information System: User's Manual.  
*Computer Dept, International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences. Enschede, The Netherlands.*
- MOROSI, J., MOGICA N., LAMBERTI D., VITALONE C., COPANI M., AMBROSIS J., GAMALLO, E., ROCA, M. Y G. MOLINARI, 1987.  
Salliqueló. Plan de ordenamiento y desarrollo del partido.  
*CIC, informe 39, La Plata: 326 páginas.*
- MULLER, E., 1996.  
Classification des images de teledetection.  
*Centre d'Ecologie des Systemes Fluviaux. Centre National de Recherche Scientifique, 1-16 páginas.*

- SALA, J.M., 1981.  
Geología en cuencas de llanura con énfasis en hidrogeología.  
*Comité de Cuencas Hídricas, Área del Gran Rosario, 72 páginas.*
- SALAZAR LEA PLAZA, J., 1980.  
Inventario Integrado de los Recursos Naturales de la provincia de La Pampa. Geomorfología.  
*Instituto Salesiano de Artes Gráficas, Buenos Aires, 1- 493.*
- TAPIA, A., 1935.  
Causas geológicas y consecuencias políticas de los cambios del cauce del Pilcomayo, en Formosa.  
*ASAG T IV, 2. Buenos Aires.*
- THORNTHWAITE C. W. Y J. R. MATHER, 1957.  
Instructions and tables for computing the potential evapotranspiration and water balance.  
*Laboratory of climatology. Dresel Institute of technology, 10:185-311.*
- THORNTHWAITE C. W., 1955.  
The water balance.  
*Publication in Climatology 8 (1), Laboratory of Climatology. Centerton.*
- VARNI M., R. RIVAS E I. ENTRAIGAS, 2000.  
Caracterización hidrogeológica y regionalización ecológica de una zona arenosa ondulada del oeste de la provincia de Buenos Aires, Argentina: caso del partido de Salliqueló.  
*I Joint World Congress on Groundwater, Actas en CD.*



## Características hidrológicas de Bahía del Diablo Isla Vega, Península Antártica

Silva Busso, A. <sup>1</sup> - De Angelis, H. <sup>2</sup> - Skvarca, P. <sup>2</sup> - Ermolin, E. <sup>2</sup>

### Resumen

*El estudio de las aguas superficiales y subsuperficiales en áreas subpolares y su relación con el aporte glaciario es un aspecto importante de la investigación en regiones subpolares. Si bien se trata de un estudio preliminar es importante en la caracterización de los ambientes hídricos antárticos. El objetivo del presente estudio es caracterizar el comportamiento hidrológico y su relación con las áreas de aporte y la descarga glaciaria como una base para orientar futuras investigaciones más detalladas. Establecer la presencia de zonas saturadas, no saturadas en los sedimentos y su posible conexión con el agua superficial. Se pretende caracterizar la relación entre las variables meteorológicas, geomorfológicas y geológicas con la descarga glaciaria en el sistema de drenaje relacionado. En términos generales constituye un estudio preliminar del ambiente hídrico con miras a cuantificar las pérdidas por escurrimiento e infiltración para contribuir en un adecuado cálculo del balance glaciario en Bahía del Diablo.*

### 1. INTRODUCCIÓN

Alrededor del 98% de la superficie del continente antártico está cubierto por sábanas de hielo y sólo el 2% corresponde a sectores descubiertos de hielo. Se trata en general afloramientos rocosos, pero existen también áreas ricas en depósitos cuaternarios congelados (permafrost). Estas áreas descubiertas de hielo se encuentran principalmente en dos regiones: los Valles Secos (Dry Valleys) en Tierra Victoria y el noreste de la península Antártica (*Guglielmin y Dramis, 1999*). Los sistemas hídricos superficiales y subsuperficiales que se desarrollan en estas regiones presentan, al igual que en el Ártico, características particulares de aporte, sustrato y régimen que los diferencia claramente de los que existen en regiones más templadas. A diferencia de los sistemas hídricos en regiones polares y subpolares del Hemisferio Norte, los estudios hidrológicos en Antártida son más bien escasos, concentrados principalmente en la región del Mar de Ross (*Chinn, 1981*).

El estudio de los sistemas hídricos superficiales y subsuperficiales en la región noreste de península Antártica es limitado. Recientemente *Fresina et al. (2000)* realizaron estudios similares en la Isla Seymour (Marambio). Los sistemas hídricos de esta isla presentan un régimen particular por la ausencia actual de cuerpos glaciares; el aporte del sistema hídrico se produce principalmente por fusión de nieve superficial y del hielo contenido en el permafrost. *Eraso et al. (1991)* realizaron en las islas Shetland del Sur estudios hidrológicos de un curso superficial de agua alimentado por fusión glaciaria y correlacionaron el comportamiento hídrico observado con las variables meteorológicas locales. Como conclusión, estos autores expresan la necesidad de realizar observaciones hidrológicas en conexión con el balance de masa glaciaria y analizar el posible aporte del permafrost.

La región noreste de península Antártica conforma un ambiente hidrológico único, donde la presencia de áreas descubiertas de hielo propicia el desarrollo de importantes redes fluviales y sistemas lacustres. Además la región se encuentra en zona de permafrost continuo y por ello los sistemas hídricos presentan características únicas que hacen de la región un laboratorio natural de privilegio para estudios hidrológicos. El presente estudio se realizó en Isla Vega, que tiene un desarrollo longitudinal de 32 Km en la dirección este-oeste, y un ancho máximo

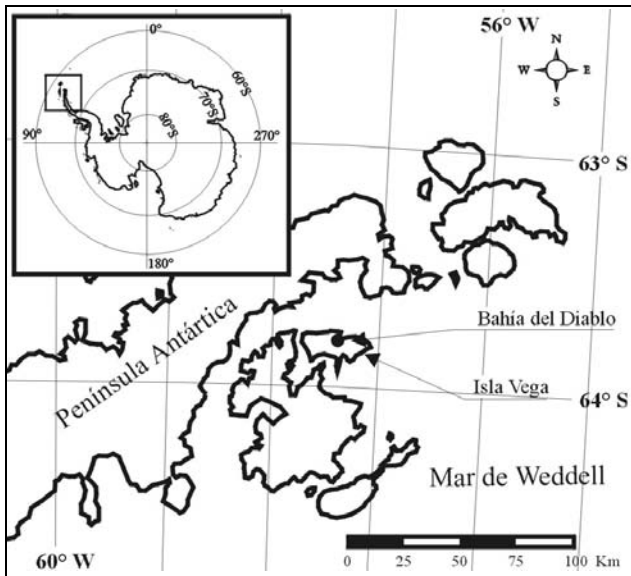
Entregado: 28 de Octubre de 2002 ■ Aceptado: 30 de Diciembre de 2002

1. Instituto Nacional de Agua, Autopista Ezeiza-Cañuelas tramo J. Newbery Km 1,620 Ezeiza, Bs. As., pntsas@ina.gov.ar

2. Instituto Antártico Argentino, Cerrito 1248, 1010 Buenos Aires, Argentina, glacio@dna.gov.ar

de 16 Km en la dirección norte-sur. Su máxima elevación se encuentra en Sandwich Bluff (~700 m s.n.m.). El 70% (188 Km<sup>2</sup>) de la superficie total de la isla (268 Km<sup>2</sup>) se encuentra cubierta de hielo (Figura 1).

FIGURA 1. MAPA DE UBICACIÓN



La zona de trabajo es una pequeña planicie ondulada de 4.5 Km<sup>2</sup>, ubicada en el sector más septentrional de Isla Vega, inmediatamente al sudeste del Cabo Buen Encuentro, en Bahía del Diablo. El clima es subpolar, marcadamente continental, caracterizado por una precipitación anual estimada en unos 450 mm y una temperatura media anual de alrededor de -4.5 °C.

La vegetación es escasa y está constituida por algunas variedades de musgos y líquenes, que ocupan pequeños sectores húmedos. Geológicamente, la isla Vega está compuesta en su mayor parte por vulcanitas básicas alcalinas del Grupo Volcánico James Ross Island (Nelson, 1966), de edad pliocena a pleistocena, las que se encuentran apoyando en discordancia sobre las sedimentitas cretácicas de la Cuenca James Ross (Elliot, 1988). Complejos depósitos glaciares y fluvio-glaciares, depositados desde el Pleistoceno hasta el presente, completan la sucesión estratigráfica. En el área de trabajo no se hallaron afloramientos cretácicos, aunque se demuestra su presencia bajo la suela del Glaciar Bahía del Diablo a partir de la composición litológica de la morena frontal del mismo. Los afloramientos de vulcanitas están confinados a las alturas que limitan la planicie al sur, salvo minúsculos afloramientos de diamictitas plio-pleistocenas, integrantes del Grupo Volcánico James Ross Island. Por lo demás, todo el sector no englazado de Bahía del Diablo comprende depósitos posteriores al Pleistoceno inferior. En la planicie proglacial de Bahía del Diablo se reconoce la presencia dominante de depósitos morénicos y depósitos fluvio-glaciares, los que representan el sustrato más común de los sistemas hídricos presentes. Los depósitos morénicos se ubican al sur de la planicie y están representados por elevaciones bajas, muy crioturbadadas, que muestran prominentes fenómenos geocriogénicos (polígonos de piedras, domos de solifluxión, etc). Litológicamente son cuerpos diamictíticos compuestos por clastos en su mayor parte de origen volcánico con proporciones variables de material cretácico. Su composición granulométrica va de gravas muy gruesas con bloques de varios metros cúbicos a limo, hallándose en ocasiones sectores que contienen bolsillos

arenosos y/o limosos bien seleccionados. Los depósitos fluvio-glaciares forman la planicie ubicada al norte del área estudiada. Se caracterizan por poseer una muy buena estratificación y estar constituidos por estratos delgados de granulometrías que van de gravas finas a arena, con presencia ocasional de niveles arcillosos.

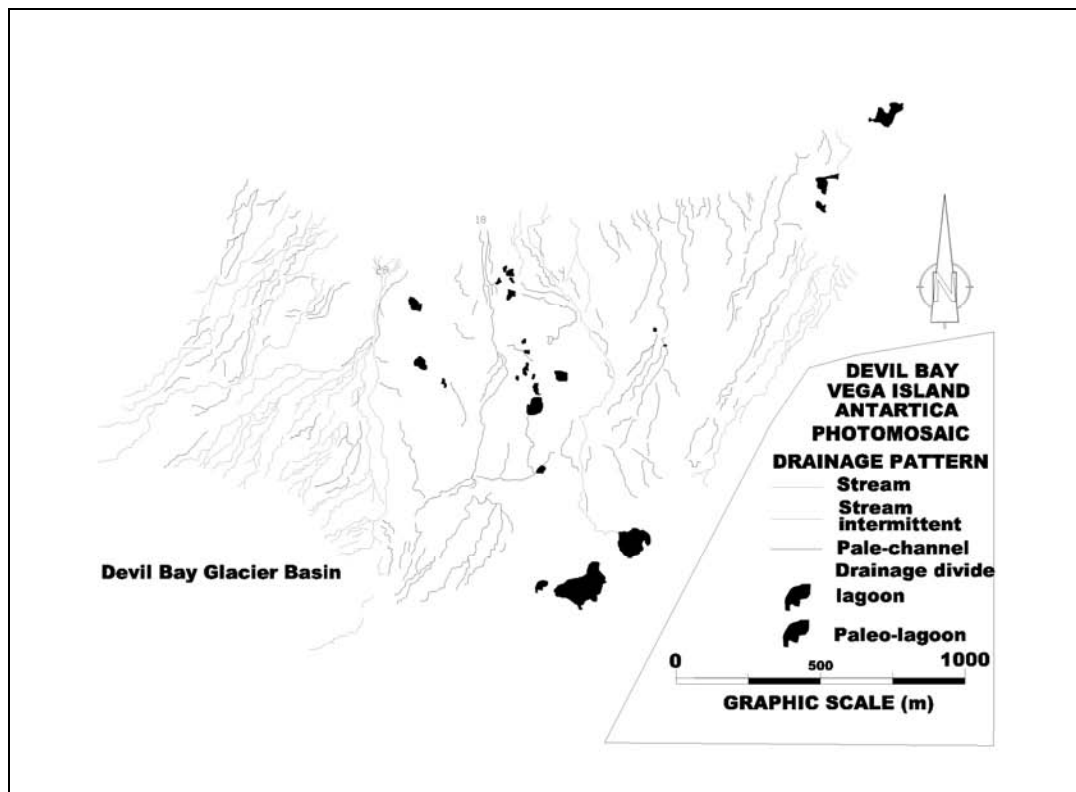
Los glaciares que se encuentran en el área corresponden al tipo politermal (Paterson, 1994), caracterizados por zonas distales y marginales en condiciones de base seca y sectores centrales en condiciones de base húmeda. Su régimen de alimentación se encuentra en gran medida controlado por fuertes vientos, que dan lugar a patrones de acumulación y ablación anómalos que difieren sustancialmente de la distribución altitudinal clásica de los glaciares templados. En los glaciares subpolares del área estudiada los patrones de alimentación están caracterizados por pequeñas zonas de acumulación, localizadas principalmente a sotavento de obstáculos topográficos y rodeadas por sectores más extensos de ablación. Otro factor que contribuye substancialmente al balance de masa de estos glaciares es, por su particular régimen térmico, el desarrollo de importantes espesores de hielo sobreimpuesto. Según datos meteorológicos de la Estación Meteorológica Automática (EMA) instalada en la Bahía del Diablo el 16 de Febrero 1999, la temporada de ablación puede extenderse desde fines de Octubre hasta mediados de Abril. Durante este período se produce una intensa ablación superficial, la cual alimenta una compleja red hidrológica supraglacial y proglacial. Por lo tanto el ciclo hidrológico local se desarrolla en forma estacional acorde a la duración de la temporada de ablación anual que controla la fusión superficial de los glaciares, como así también de la capa activa del permafrost. Todos los glaciares de la región presentan casi invariablemente un comportamiento recesivo sostenido, acelerado en las últimas dos décadas a causa de un consistente aumento de la temperatura en la región (Skvarca et al., 1995; Skvarca et al., 1998).

## 2. RESULTADOS. ASPECTOS DE HIDROLOGÍA SUPERFICIAL Y SUBSUPERFICIAL

El reconocimiento hidrológico preliminar de la zona de estudio incluye la cartografía de la red de drenaje a partir de fotografías aéreas tomadas en Enero de 2000. Con las mismas se confeccionó un fotomosaico corregido y georeferenciado, que permitió realizar una detallada cartografía y un análisis geomorfológico cuantitativo de la red de drenaje del Glaciar Bahía del Diablo (Figura 2). A partir del mosaico fotográfico se pudo dividir la zona en tres cuencas hídricas relacionadas con la descarga glaciaria: la cuenca del Glaciar Bahía del Diablo, la cuenca del Glaciar A y la cuenca del Glaciar C. La cuenca del Glaciar Bahía del Diablo ocupa una superficie aproximada de 1.12 Km<sup>2</sup>, de los cuales 0.46 Km<sup>2</sup> corresponden a la paleocuenca del mismo.

La cuenca del Glaciar C posee un área aproximada de 1.10 Km<sup>2</sup> similar a la anterior y la cuenca del Glaciar A tiene un área aproximada de 0.40 Km<sup>2</sup>. En conjunto todas suman un área total aproximada de 2.62 Km<sup>2</sup>. A partir de las fotografías aéreas se puede realizar un análisis cualitativo de la red de drenaje actual y antigua. La red actual del Arroyo Bahía del Diablo presenta un diseño dendrítico, con un drenaje bien integrado, que discurre sin interrupción sobre los depósitos fluvio-glaciares. La antigua red de drenaje ubicada al este de la anterior presentaba características similares. El abandono de la paleored de drenaje y el cambio hacia el sistema actual se produjo en respuesta al retroceso del Glaciar Bahía del Diablo. La evidencia geomorfológica sugiere que este cambio habría sido rápido, dado que sólo

FIGURA 2. RED DE DRENAJE ACTUAL, DIVISORIA DE CUENCAS Y PALEOCAUCES



existen dos redes de drenaje claramente separadas entre sí. La red actual del curso proglacial del glaciar C se encuentra controlada por depósitos morénicos y discurre entre los mismos como cauces rectilíneos con drenaje poco integrado. Al sudoeste se observa el arroyo consecuente de desagüe de los cuerpos de agua del frente del glaciar C, estos se han reencauzado sobre los paleocauces de la cuenca. El corrimiento de la red de drenaje hacia el este ha sido gradual considerando el gran número de paleocauces existentes que formaron una red de drenaje mejor integrada que la actual.

La red del curso proglacial del glaciar A también se encuentra controlada por morenas y discurre entre las mismas como cauces rectilíneos con drenaje poco integrado. A diferencia de las demás cuencas los paleocauces y los cauces actuales se intercalan entre sí. El sostenido retroceso del glaciar C no ha sido aún lo suficientemente importante para permitir el desarrollo de una red de drenaje bien integrada. Los cuerpos de agua de la zona de estudio se pueden dividir en tres grupos: a) los relacionados con el sistema hídrico actual, como las lagunas marginales ubicadas contra el Glaciar C; b) los que no se relacionan con la red de drenaje actual y c) las paleolagunas. Estas últimas pueden

relacionarse con la red de paleocauces, y recibir por ende un drenaje subsuperficial o bien pueden haberse originado como depresiones de termokarst, por fusión del permafrost. La identificación de la cuenca actual y la paleocuenca del sistema hídrico del curso proglacial Bahía del Diablo permite realizar un análisis morfológico cuantitativo de la red de drenaje actual y la paleored de drenaje. Este análisis tiene como objetivo eliminar las descripciones subjetivas y comparar las características de la red de drenaje actual con la red anterior independientemente del área abarcada por ellas. Además permite también establecer las bases de una posible correlación con los cambios en la dinámica glaciar. Aplicando algunas de las metodologías desarrolladas por Horton (1945), Strabler (1952), Shumm (1956) y Tricart (1965) se calcularon los parámetros morfométricos de las redes de drenaje a partir de la jerarquización de los cauces. Las Tablas 1 y 2 presentan los resultados del análisis morfométrico de cada cuenca. Se ha considerado el número de orden de los cauces  $Nu$  (Horton, 1945), la sumatoria de la longitud de los cauces de cada orden  $Lu$ , la longitud media de los cauces de cada orden  $Lu_m$ , la relación de bifurcación  $Rb$  (Strabler, 1952) y la relación de longitud  $Rl$  (Horton, 1945).

TABLA 1. CURSO PROGLACIAL BAHÍA DEL DIABLO CUENCA HÍDRICA ACTUAL

N° Orden	$Nu$	$Lu$ (mts.)	$Lu_m$ (mts.)	$Rb$	$Rs$
1	31	4164	134.32		
2	8	1529	191.12	3.87	1.42
3	3	1496	498.66	2.66	2.60
4	1	215	215.00	3.00	0.43
<b>Totales</b>	43	7404	1039.08	9.51	4.45
<b>Promedios</b>			259.77	3.17	1.48

TABLA 2. CURSO PROGLACIAL BAHÍA DEL DIABLO PALEOCUENCA

N° Orden	$Nu$	$Lu$ (mts.)	$Lu_m$ (mts.)	$Rb$	$Rs$
1	18	2457	136.50		
2	8	1007	125.87	2.25	0.92
3	2	463	213.50	4.00	1.69
4	1	914	914.00	2.00	4.28
<b>Total</b>	29	4841	1389.87	8.25	6.89
<b>Promedios</b>			347.46	2.75	2.29

Los cauces no superan el cuarto orden y tanto  $Lu$  como  $Lu_m$  correspondientes a cada orden tienden a incrementarse geométricamente tal como lo predicen las leyes de Horton (1945). La red de drenaje actual posee un valor anómalo de  $Lu$  y  $Lu_m$  de cuarto orden, posiblemente relacionado con los cambios recientes de cauce o con la juventud de la red de drenaje.  $Rb$  tiende a mantenerse constante en una cuenca uniforme (Strabler, 1952), situación que se cumpliría en la cuenca actual y en menor medida en la paleocuenca. Los valores medios son mayores en la cuenca actual (3,17) que en la anterior (2,75), lo que podría relacionarse con un mayor número y grado de conexión de sus afluentes. El  $Rs$  que también debería crecer geométricamente (Horton, 1945) presenta anomalías en el cuarto orden de la cuenca actual también atribuido a la juventud del sistema.

Se han calculado también los parámetros morfométricos que caracterizan a las cuencas, como son la densidad de drenaje  $Dd$  y la magnitud de la cuenca  $M$  según Strabler (1952), la constante de mantenimiento de canal  $Mc$  y la frecuencia de cauces  $Fu$  según Tricart (1965). Los resultados se presentan en la Tabla 3.

**TABLA 3. MORFOMETRÍA DE CUENCAS**

C.P. Bahía del Diablo	$Dd$	$M$	$Mc$	$Fu$
Red de drenaje actual	11.08	29	0.090	64.37
Paleo red de drenaje	10.52	18	0.095	63.04

Los parámetros de  $Dd$ ,  $Mc$  y  $Fu$  son similares indicado las semejanzas entre la cuenca y la paleocuenca. La densidad de drenaje es elevada e indicaría que se trata de cuencas con una litología uniforme, poco consolidada, de baja permeabilidad y escasa vegetación (Horton, 1945; Strabler, 1952 y Tricart, 1965). Esto coincidiría con las características del área de estudio considerando la baja permeabilidad de las litologías que componen el sustrato que además se encuentran en condiciones de permafrost. El  $Mc$  que indicaría la posibilidad de crecimiento hacia la cabecera posee valores pequeños correspondientes a cuencas jóvenes como las estudiadas (Strabler, 1952). El índice  $Fu$  estaría relacionado con la  $Dd$  y con la litología. Según Tricart (1965) esto indica la capacidad de erosión del sistema que sería elevada y similar en ambas cuencas. La  $M$  de la red de drenaje indica el número de afluentes del mismo, o sea es una medida del aporte. En este caso la cuenca actual tiene un  $M$  superior a la paleocuenca lo que indicaría cierto grado de aumento en el aporte de agua al sistema.

Este análisis morfométrico de la cuenca actual y de paleocuenca del curso proglacial Bahía del Diablo permite determinar que la red de drenaje de ambas es y ha sido un sistema no equilibrado, poco maduro y con una elevada capacidad erosiva. La red de drenaje actual es muy reciente, poco integrada y posee un mayor aporte y número de afluentes que la paleored de drenaje. Estas características indican una gran inestabilidad y un cambio reciente en el comportamiento del sistema hídrico relacionado con el retroceso reciente del Glaciar Bahía del Diablo.

**3. MONITOREO HIDROLÓGICO PRELIMINAR DEL CURSO PROGLACIAL PRINCIPAL DEL GLACIAR BAHÍA DEL DIABLO**

Con el objeto de evaluar la descarga del sistema fluvial, su relación con los posibles aportes glaciares y las variables climáticas de verano, se procedió al reconocimiento de los cauces

en busca del perfil más adecuado en la cuenca para las mediciones de caudal. La ubicación del mismo puede verse en Figura 2, donde se señala la estación de aforo (AF). Por no disponer del limnógrafo se empleó un caudalímetro de molinete de precisión (AOTT). Se tomaron mediciones periódicas durante un periodo de 15 días que comprendieron dos aspectos:

- Medición de perfil de cauce, cota del pelo de agua y velocidad de la sección central del flujo con frecuencia horaria durante las 24 hs.
- Medición de perfil de cauce, cota del pelo de agua y velocidad de la sección central del flujo con frecuencia diaria.

Se considerarán sólo estos 15 días ya que durante este período no se registraron precipitaciones como así tampoco en los 30 días anteriores. La Figura 2 muestra claramente la ausencia total de nieve. Esta consideración nos permite estudiar la descarga del cuerpo glaciario y analizar su aporte sin considerar el proveniente de la fusión de nieve. Asumiendo como válida esta condición las series que se presentan, si bien no extendidas en el tiempo, pueden considerarse descriptivas del proceso. Es importante hacer notar que durante la etapa de observación se presentaron frecuentes condiciones de viento cálido (*föhn*). Las condiciones meteorológicas propias de estos eventos se caracterizan por vientos fuertes a muy fuertes, con temperaturas que pueden superar los +10 °C y humedades relativas muy bajas (alrededor del 30%). Durante eventos de este tipo la ablación de hielo y nieve se acelera dramáticamente tanto por fusión (debido a altas temperaturas) como por evaporación (debido a la baja humedad relativa y al intercambio energético turbulento producido por fuertes vientos), dando lugar a importante caudales en los cursos proglaciales. La energía disponible para la fusión de hielo en la superficie de un glaciar está dada por la ecuación de balance energético (Hooke, 1998):

$$(1) \quad \sum Q = R + H + V$$

Donde  $Q$  es la energía en  $KJ m^{-2} d^{-1}$ ,  $R$  la radiación neta (incidente + reflejada),  $H$  la entrada de calor sensible y  $V$  la entrada de calor latente. La exacta evaluación y pronóstico de la escorrentía de cursos proglaciares requiere un conocimiento profundo de éstas variables (Braithwaite, 1981). Sin embargo su medición directa no es simple y requiere de complejo instrumental. Por esto generalmente sólo se dispone, como en el presente estudio, de parámetros meteorológicos básicos como temperatura del aire (medida a 2 m de altura), humedad relativa, radiación solar incidente, dirección e intensidad de viento y presión. Teniendo en cuenta esta limitación común gran parte de los estudios de hidrología glaciar se basa en la correlación de la fusión y la temperatura del aire, por ejemplo mediante el empleo de índices grado-día positivos (Braithwaite, 1995). En este trabajo sólo se presentarán correlaciones con los parámetros meteorológicos básicos (temperatura, humedad relativa, radiación solar incidente, velocidad del viento). El resultado de las mediciones realizadas se muestra en la Figura 3.

La Figura 4 muestra una correlación lineal ( $r = 0.78$ ) entre el caudal medio y la temperatura media a lo largo del periodo de observación. La correlación entre el caudal medio y la humedad relativa se muestra en Figura 5, donde se aprecia su carácter inverso y su alto grado de significancia ( $r = -0.92$ ). Esta característica se halla muy probablemente relacionada con las condiciones presentes durante los eventos tipo *föhn* registrados durante el tiempo de observación, es decir altas temperaturas y bajas humedades relativas.

FIGURA 3. RELACIÓN CAUDAL-TEMPERATURA EN LA ESTACIÓN DE AFORO, DEL CURSO PROGLACIAL DEL GLACIAR BAHÍA DEL DIABLO, ISLA VEGA

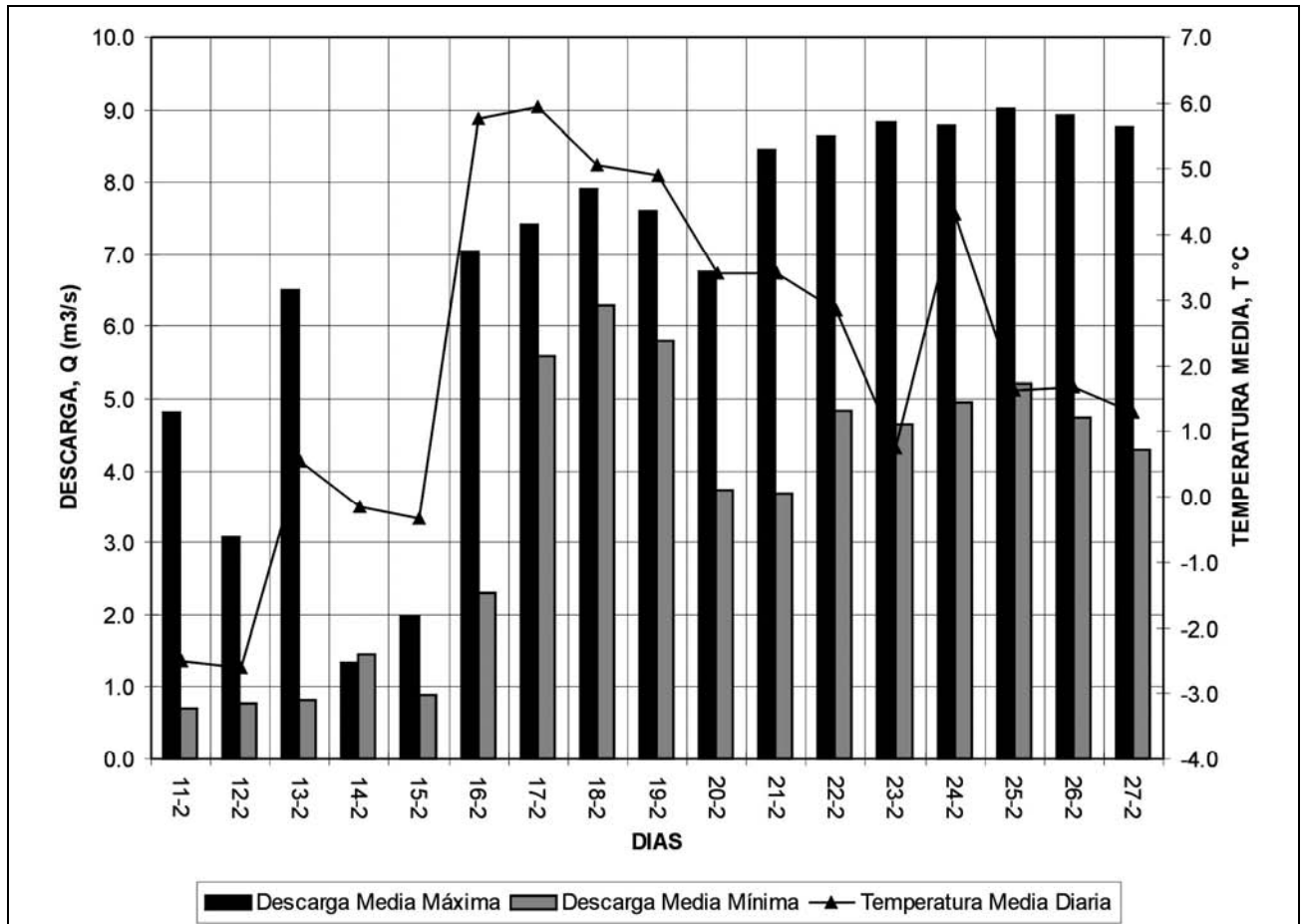


FIGURA 4. RELACIÓN ENTRE CAUDALES MEDIOS Y TEMPERATURAS MEDIAS DIARIAS

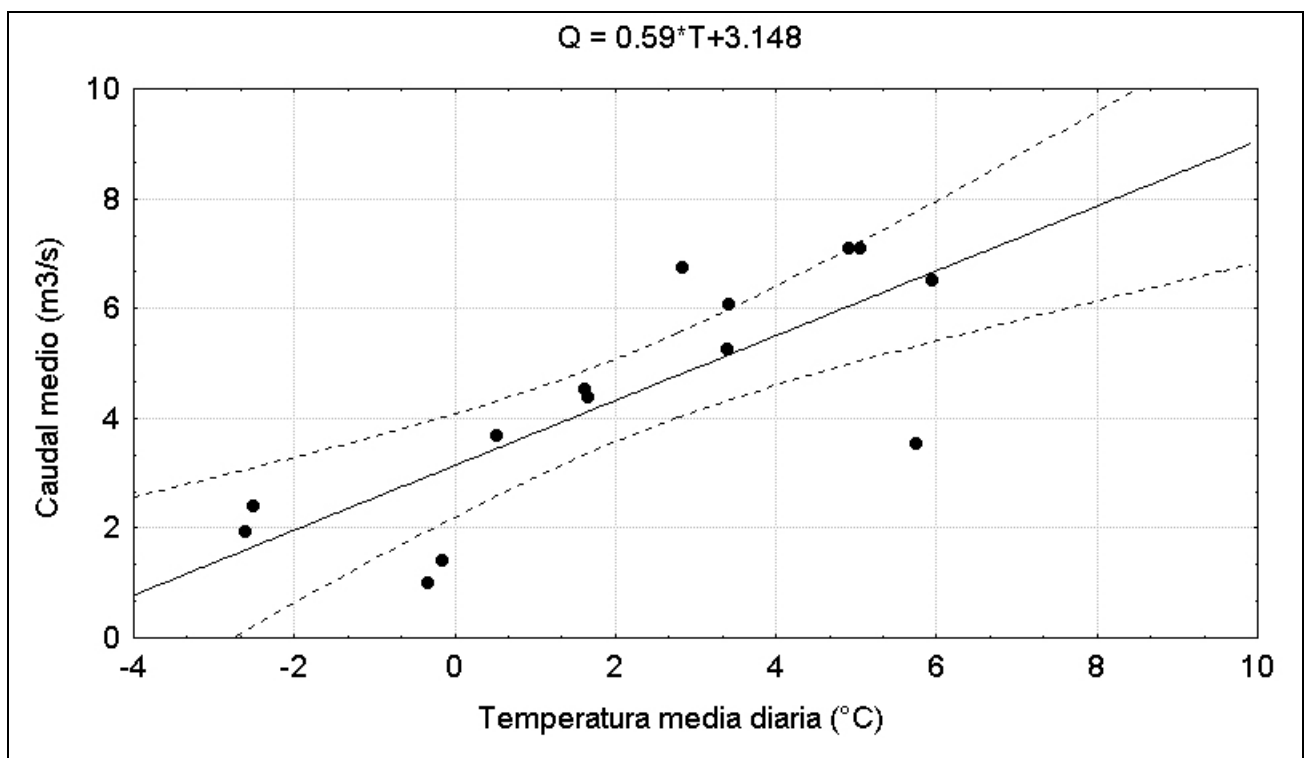
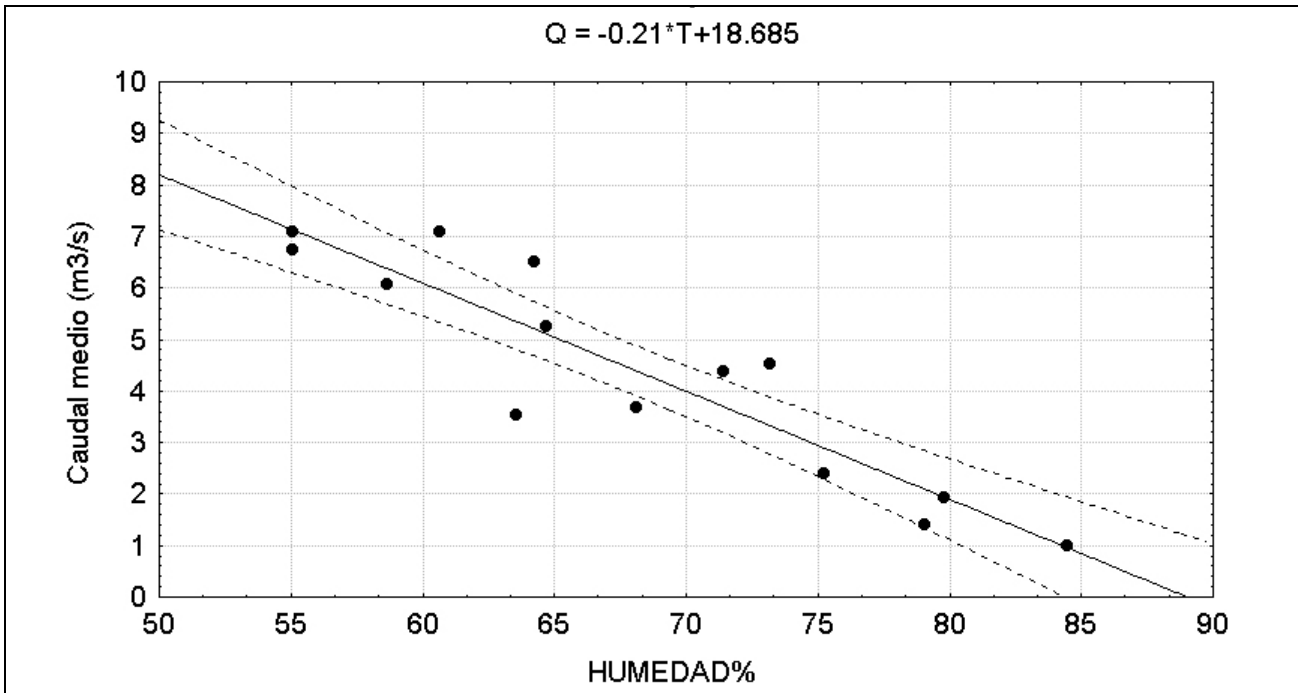


FIGURA 5. RELACIÓN ENTRE CAUDALES MEDIOS Y HUMEDADES RELATIVAS DIARIAS



Las correlaciones entre caudal medio y radiación solar incidente y entre caudal medio e intensidad del viento son bajas ( $r = 0.54$  y  $0.56$ , respectivamente), si bien la influencia de ambas en la fusión glaciaria está ampliamente reconocida (Braithwaite, 1981; Paterson, 1994). La baja correlación observada puede atribuirse en parte a la insuficiencia del conjunto de datos y en parte a que la influencia de esas variables en la ablación se produce como consecuencia de complejos intercambios energéticos que escapan al presente análisis.

La evolución diaria de los caudales también muestra correlación con la temperatura media del aire y del agua aunque con ciertas horas de desfase entre ambas, como muestra la

Figura 6. Dicho desfase permite apreciar temperaturas del agua más elevadas que el aire durante las primeras horas del día con un gradual incremento de los caudales que se hacen máximos cuando la temperatura del aire supera a la temperatura del agua a lo largo del día. Esto indicaría que la descarga glaciaria no ocurre en forma permanente durante todo el día sino que alcanza un pico después del medio día junto con la temperatura del aire. Es decir, existe un determinado volumen de agua de otro origen relacionada con el sistema subsuperficial (permafrost, talik, hielo fósil, termokarst, etc.). Las sales totales disueltas en el agua de descarga varían también a lo largo del día, de forma inversa con el caudal tal como lo indica la correlación ( $r = -0.95$ ) de la Figura 6.

FIGURA 6. VARIACIONES HORARIAS DE CAUDALES Y TEMPERATURAS DEL AIRE Y AGUA EN BAHÍA DEL DIABLO

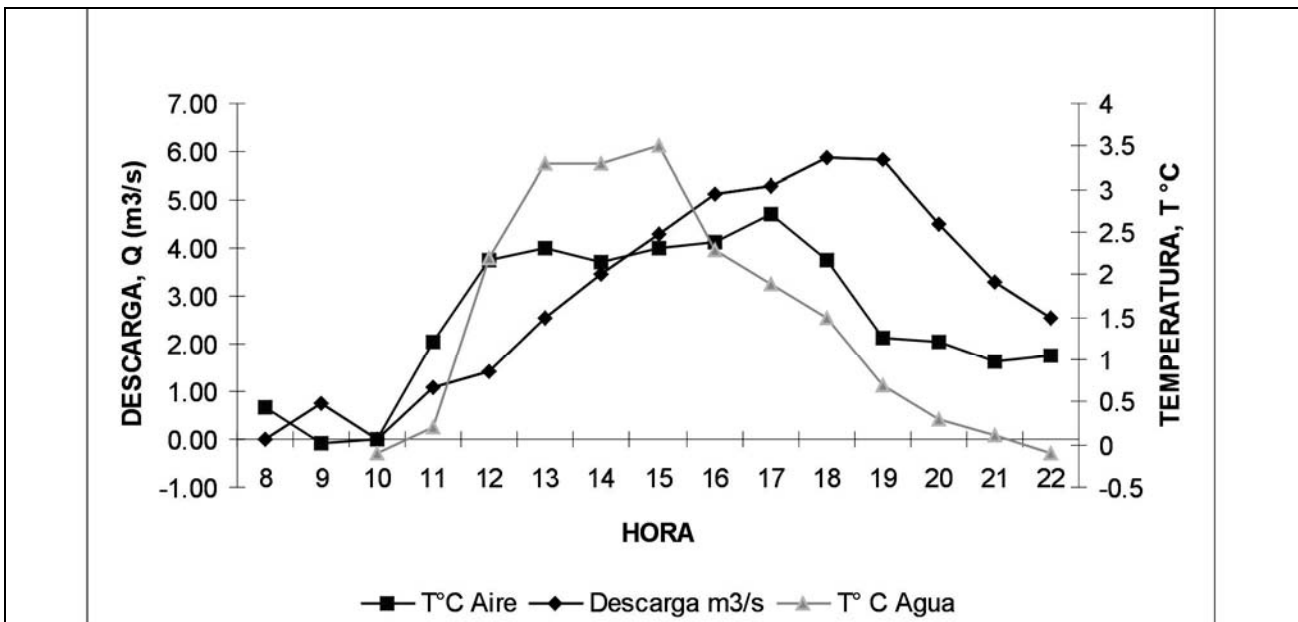
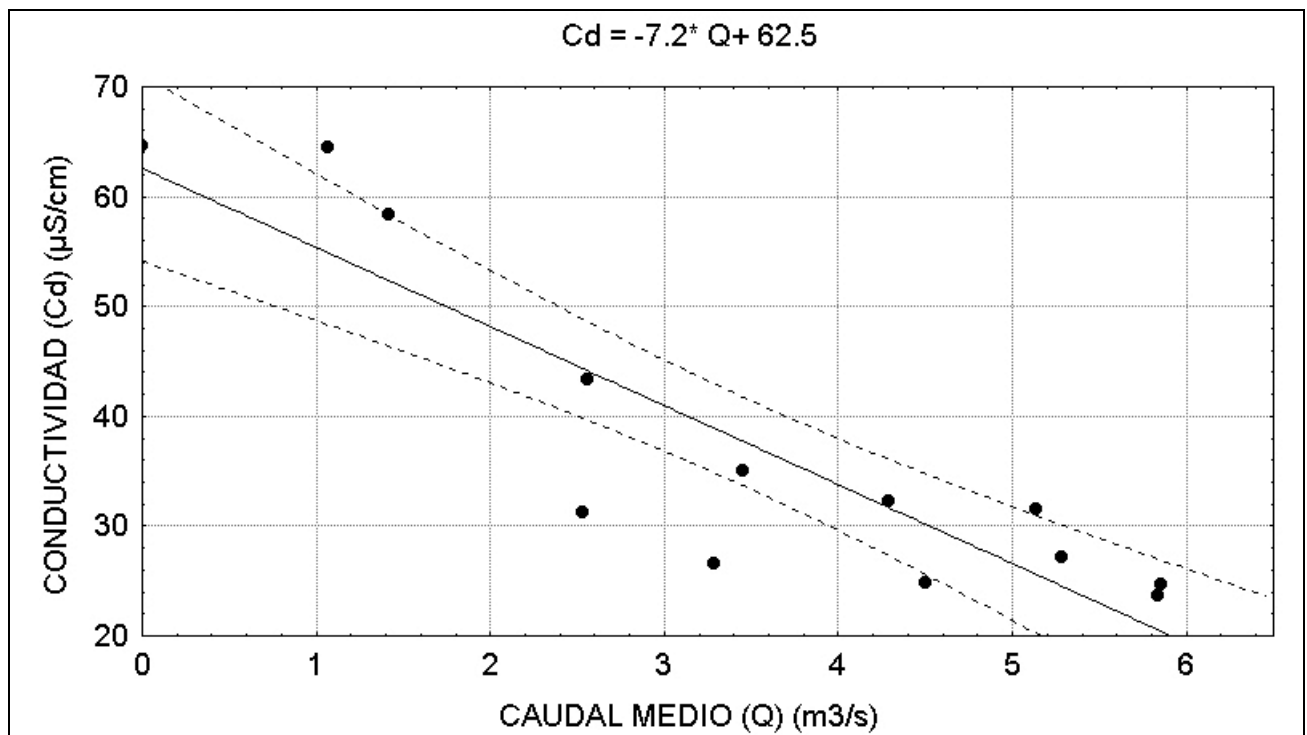




FIGURA 7. RELACIÓN ENTRE CAUDALES MEDIOS DIARIOS Y CONDUCTIVIDAD DEL AGUA



Esto podría tener relación con el aporte glaciar ya que en las aguas de fusión de los cursos supraglaciarios el contenido salino es de 3-5 mg/dm<sup>3</sup>. El aumento del volumen de agua de origen glaciar disminuiría el contenido salino en casi uno a dos ordenes de magnitud durante el día. Es importante mencionar que en Isla Seymour (Marambio), donde los arroyos no poseen alimentación glaciar ocurre que el caudal y la salinidad aumentan progresivamente a lo largo del día a causa del aporte del sistema subsuperficial (Silva Busso et al., 2000). Dado que durante las primeras horas del día se registran aguas de elevado contenido salino en comparación a aguas de ablación glaciar, se estima que el sistema subsuperficial puede tener una participación importante en el aporte del agua a la red hídrica de la Cuenca Bahía del Diablo.

#### 4. SISTEMA HÍDRICO SUBSUPERFICIAL Y SU RELACIÓN CON LA CRIOGÉNESIS LOCAL

Toda el área de estudio se halla en zona de permafrost continuo. En años favorables la capa activa del mismo alcanza un espesor máximo de aproximadamente 1.5 metros. En la planicie de la Bahía del Diablo se han identificado, entre otras, las siguientes formas criogénicas: glaciares de escombros, icing, mantos de soliflucción, cuña compuesta y levantamiento por congelamiento. De todas estas formas criogénicas el proceso de "icing" es el de mayor importancia para comprender el comportamiento del sistema hídrico subsuperficial de la región. Las restantes formas sólo tienen una influencia localizada en la hidrología de la cuenca.

El fenómeno de icing está relacionado con el congelamiento y descongelamiento estacional del permafrost. Los procesos de icing han sido clasificados según sus fuentes de alimentación y su situación en el relieve (Alekssev, 1985). En Bahía del Diablo se pueden apreciar dos tipos de icing: fluvial y glaciar.

El icing fluvial es un proceso cuya fase de congelamiento comienza en otoño, en forma aislada en los sistemas fluviales. Habitualmente el proceso de descongelamiento de icing de este tipo desaparece en el verano debido a la fusión. El icing glaciar está normalmente situado cerca de los bordes glaciarios, en lugares donde existe descarga de aguas de fusión glaciar y sobre la superficie de la planicie fluvio-glacial. La dinámica del proceso de icing determina las áreas donde se desarrolla la formación de la zona no saturada y el acuífero libre durante el verano y el grado de conexión con el curso fluvial.

Dada la intensa dinámica hídrica superficial es de esperar el desarrollo de un sistema subsuperficial en las áreas cercanas a los cauces y posiblemente cerca de los paleocauces más importantes sobre la planicie fluvio-glacial. El sistema subsuperficial requiere de estudios específicos que se realizarán en el futuro con el objeto de evaluar el desarrollo del sistema subsuperficial y su relación con los cursos fluviales de la región.

#### 5. CONCLUSIONES

El área descubierta de hielo de la planicie en Bahía del Diablo presenta un conjunto de cuencas hídricas actuales con redes de drenaje activas y sistemas abandonados o paleoredes de drenaje íntimamente relacionadas entre sí. Las características paramétricas de los sistemas hídricos así como la evidencia geomorfológica, sugieren que los mismos son claramente inestables. La geometría y la dinámica de la red de drenaje de las diferentes cuencas mencionadas tienen una estrecha relación con la dinámica glaciar. Sin embargo es importante destacar que existe la posibilidad un aporte significativo de otras fuentes, como por ejemplo el producto de la fusión de la capa activa del permafrost y del núcleo de hielo de la morena del Glaciar Bahía del Diablo.

Se concluye también que las mediciones realizadas son suficientes para establecer correlaciones significativas entre el caudal medio diario y la temperatura media diaria del aire y entre el caudal medio diario y la humedad relativa. Estos estudios servirán de apoyo para un programa de monitoreo hidrológico más detallado que se planifica llevar a cabo en el futuro.

## 6. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen la colaboración de Teodoro Tocatás y Juan Carlos Quinteros en las tareas de campo y al personal de la Base Vcom. Marambio de la Fuerza Aérea Argentina por el apoyo logístico prestado. Este trabajo es una contribución al proyecto conjunto entre el Instituto Antártico Argentino y el Instituto Nacional de Agua y Ambiente.

## 7. TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

- ALEKSEYEV, V.R. 1985.  
Naledi i nalednye protsessi (Icings y procesos de icing).  
*Academia de Ciencias de la USSR, Irkutsk*, 287 pp (en ruso).
- BRAITHWAITE, R.J. 1981.  
On energy balance, ablation, and air temperature.  
*Journal of Glaciology*, Vol. 27, No. 97, 381-391.
- BRAITHWAITE, R.J. 1995.  
Positive degree-day factors for ablation on the Greenland ice sheet studied by energy-balance modelling.  
*Journal of Glaciology*, Vol. 41 No. 137, 153-160.
- CHINN, T.H.J. 1981.  
Hydrology and climate in the Ross Sea area.  
*Journal of the Royal Society of New Zealand*, 11 (4), 373-386.
- FRESINA, M., R. SÁNCHEZ Y A. SILVA BUSSO. 2000.  
Aproximación Metodológica al Monitoreo del Ambiente Hídrico en la Isla Marambio, Antártida.  
*Revista del Comité Argentino para la Investigación del Cuaternario (CADINCUA)*. Volúmen I, pag:89-93
- ELLIOT, D.H., 1988,  
Tectonic setting and evolution of the James Ross Basin, northern Antarctic Peninsula.  
*In: Geology and Paleontology of Seymour Island, Antarctic Peninsula. Memoir of the Geological Society of America*, 169, 541-555.
- ERASO, A., I. ANTIGÜEDAD Y A. MAGIN. 1991.  
Time Series Correlogramme and Spectral Análisis of the Cazadora Glacier Drainage and Meteorológic Parameters.  
*First International Symposium of Glacier Caves and Karst in Polar Regions, Madrid, España*, 69-91.
- GUGLIELMIN, M. Y F. DRAMIS. 1999.  
Permafrost as a climatic indicator in northern Victoria Land, Antarctica.  
*Annals of Glaciology*, Vol.29, 131-135.
- HOOKE, R.LEB. 1998.  
Principles of Glacier Mechanics.  
*Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey*, 248 pp.
- Horton, R.E. 1945.  
Erosional development of streams and their drainage basin: hydrophysical approach to cuantitative morphology.  
*Bulletin of the Geological Society of America*. Vol. 56, 275-370.
- NELSON, P.H.H. 1966.  
The James Ross Island Volcanic Group of north-east Graham Land.  
*British Antarctic Survey Scientific Reports*, 54.
- PATERSON, W.S.B. 1994.  
The physics of glaciers.  
*Third edition, Oxford, etc. Elsevier*. 497 pp.
- SCHUMM, S.A. 1956.  
Evolution of drainage systems and slopes in badlans at Perth Amboy. New Jersey.  
*Geological Society of America Bulletin* I, 597-646.
- SKVARCA, P., H. ROTT Y T. NAGLER. 1995.  
Satellite imagery: a baseline for glacier variations study on James Ross Island, Antarctica.  
*Annals of Glaciology*, 21, 291-296.
- SKVARCA, P., W. RACK, H. ROTT Y T. IBARZÁBAL Y DONÁNGELO. 1998.  
Evidence of recent warming on the eastern Antarctic Peninsula.  
*Annals of Glaciology*, 27, 628-632.
- STRAHLER, A.V. 1952.  
Hypsometric analysis of erosional topography.  
*Geological Society of America Bulletin*, Vol 63, 923-938.
- TRICART, J. 1965.  
Principes et méthodes de la Geomorphologie.  
*Ed. Mason París*, 496 pp.



## Geomorfología de la cuenca del Río Purmamarca Jujuy - Argentina

Soler, Ramiro Daniel<sup>1</sup>

### Resumen

*Se analizan las características geomorfológicas del sector correspondiente a la totalidad de la cuenca hídrica del río Purmamarca ubicada sobre el flanco occidental de la quebrada de Humahuaca en la provincia de Jujuy. El escurrimiento fluvial constituye el principal agente modelador del relieve al que se subordinan la remoción en masa y la acción eólica.*

*La compleja evolución tectónica regional ha determinado la formación de rasgos estructurales particulares los que, junto con las variaciones espaciales y temporales del clima, han actuado como elementos de control en la evolución morfogenética de la comarca dando lugar a un variado conjunto de geformas.*

*El fuerte control que ejerce la orografía sobre el clima y especialmente sobre las precipitaciones provoca que existan dos sectores morfogenéticamente diferenciados ubicados por encima y por debajo de los 3.500 m de altitud. En los relieves ubicados a menores altitudes predominan la acción del escurrimiento superficial y los flujos densos siendo característicos los relieves accidentados y con fuertes pendientes donde son frecuentes, además, las formas de acumulación aluvial. Los sectores ubicados a mayor altitud presentan morfologías suaves y redondeadas y predominan las geformas heredadas de un ambiente criogénico activo probablemente durante el Pleistoceno. Localmente, en las cumbres ubicadas por encima de los 4.000 m de altitud, aparecen formas glaciarias de escaso desarrollo actualmente sometidas a una marcada degradación.*

### 1. INTRODUCCIÓN

La cuenca hídrica del río Purmamarca se desarrolla sobre el flanco occidental de la quebrada de Humahuaca en la provincia de Jujuy abarcando una extensión de 596 km<sup>2</sup> (Fig.1). El colector fluvial principal es el río Purmamarca que vierte sus aguas al río Grande de Jujuy. El régimen hidrológico de la totalidad de los cursos es marcadamente torrencial concentrándose los mayores picos de descarga durante los meses de verano como respuesta al régimen de precipitaciones de la región. Al tratarse de una cuenca de alta montaña, gran parte de los elementos naturales que componen el medio físico están controlados por la altitud y orientación de los cordones montañosos. Del mismo modo los procesos morfogenéticos suelen mostrar un

comportamiento diferencial pudiéndose reconocer dos ámbitos con características particulares ubicados por encima y por debajo de los 3.500 m sobre el nivel del mar aproximadamente.

Los relieves que ocupan las mayores altitudes se caracterizan por presentar morfologías redondeadas, pendientes suaves y un escaso desarrollo de la red fluvial. Los procesos morfogenéticos dominantes en estos sectores se asocian principalmente a la criogénesis y a los procesos gravitacionales (especialmente a la geliflucción) y en forma subordinada a la acción eólica. Localmente, en lugares ubicados por encima de los 3.800 m s.n.m., suelen aparecer relictos de geformas glaciales, actualmente sometidas a una acelerada degradación, las que se encuentran asociadas a una condición climática fría que habría afectado a la región durante el Pleistoceno. Por su parte aquellos relieves ubicados por debajo de los 3.500 m de altitud, al recibir la mayor parte de las precipitaciones se ven afectados principalmente por la acción del escurrimiento superficial (erosión hídrica) y los flujos densos. Estos últimos especialmente en los años en los

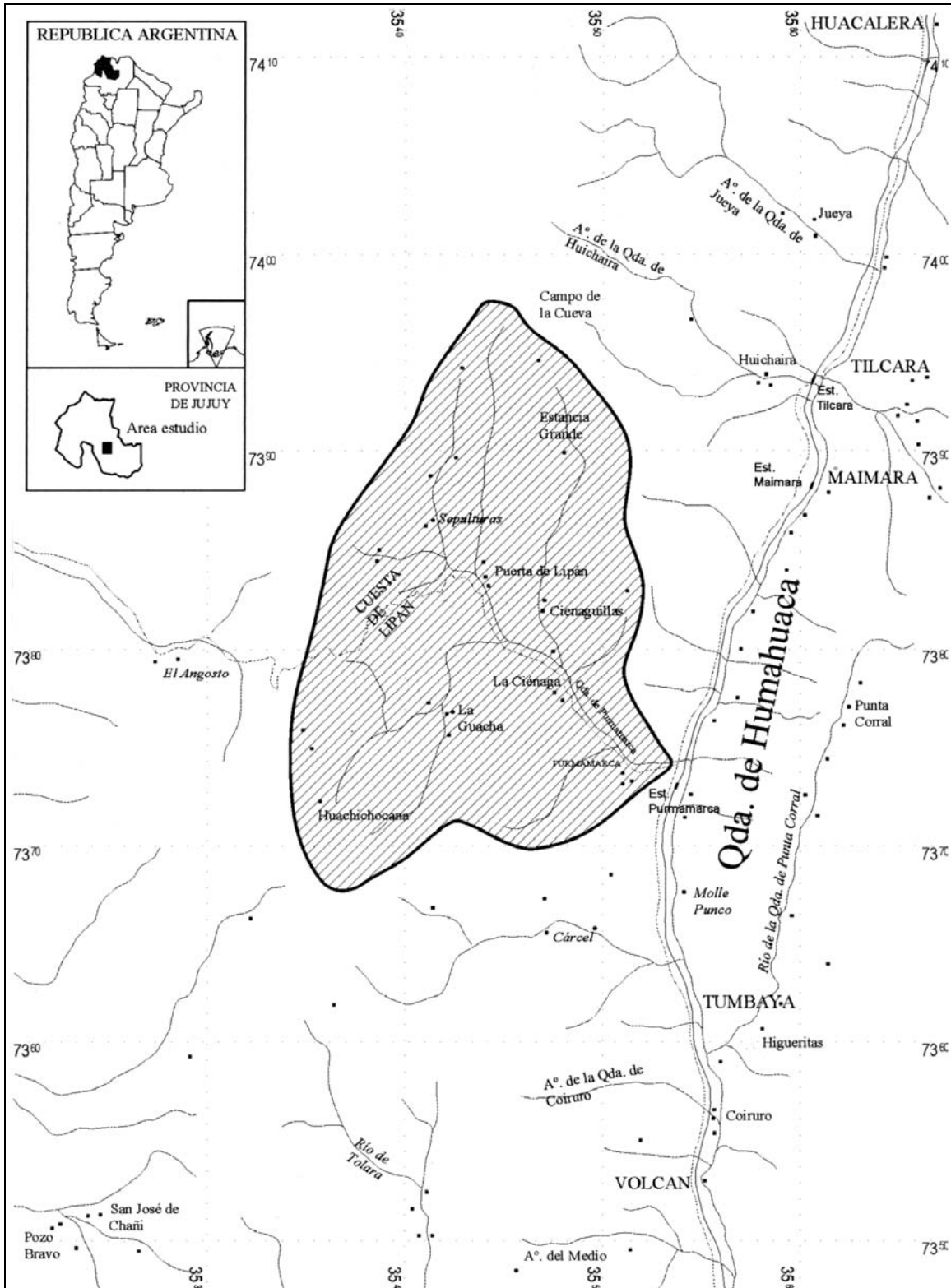
Entregado: 15 de Marzo de 2002 ■ Aceptado: 12 de Julio de 2002

<sup>1</sup> Comisión Nacional de Energía Atómica.  
Departamento Regional Noroeste.  
Av. Bolivia 4.650. CP: 4400. Salta. E-mail: rsoler@unsa.edu.ar

que predominan lluvias de fuerte intensidad que suelen afectar seriamente la infraestructura civil y las áreas de cultivo convirtiéndose en verdaderas amenazas para la economía de la región. La evolución tectónica y el estilo estructural de la región jugaron un papel fundamental en la evolución morfológica de la región como así también en la distribución y magnitud de los diferentes procesos morfogenéticos y geoformas.

En el presente trabajo se describen las principales características geomorfológicas de la cuenca del río Purmamarca analizando los principales factores que controlan la distribución de las geoformas y procesos actualmente activos. Asimismo, se plantean algunas consideraciones sobre la influencia que habrían tenido la historia tectónica y las oscilaciones climáticas acaecidas en la región durante el Cuaternario.

FIGURA 1. CROQUIS DE UBICACIÓN



## 2. RASGOS FISIográfICOS

La cuenca del río Purmamarca se desarrolla sobre el flanco occidental de la quebrada de Humahuaca la que constituye una depresión intermontana de aproximadamente 150 km de longitud, extendida en sentido N-S desde las cercanías de la ciudad de San Salvador de Jujuy, en el sur, hasta la localidad de Tres Cruces en el norte (Fig. 1). Su rasgo morfológico más destacable es la marcada asimetría existente entre la vertiente oriental de escaso desarrollo areal e hidrográfico y la occidental más extensa, tendida y drenada.

Los afluentes occidentales principales son los ríos Yacoraite, en el norte, Purmamarca y Tumbaya Grande en el sector central y León, Lozano y Reyes hacia el sur.

El colector troncal es el río Grande de Jujuy que desagua en el río San Francisco perteneciente al Sistema del Plata. El río Purmamarca tiene sus nacientes a una altura cercana a los 4.100 m sobre el nivel del mar y desde este punto hasta su desembocadura en el río Grande presenta un desnivel cercano a los 1.700 m.

El cordón montañoso que ocupa el sector occidental de la cuenca corresponde a las estribaciones meridionales de la Sierra Alta, una cadena de orientación N-S, con altitudes que superan los 4.000 m sobre el nivel del mar y constituye el límite físico entre las regiones de la Cordillera Oriental y la Puna. Sobre esta cadena se desarrollan las mayores altitudes de la cuenca, las que descienden progresivamente hacia el E hasta alcanzar el cierre de la cuenca a aproximadamente 2.400 m de altitud.

La orientación predominantemente meridiana de los cordones montañosos define una dirección predominante N-S para los cursos tributarios que ocupan la porción norte de la cuenca tales como los ríos de las quebradas de Estancia Grande (o Cienaguillas), Lipán y Sepulturas. Esta característica es el reflejo del fuerte control que ejerce la estructura regional -donde son característicos los bloques montañosos limitados por fallas de dirección meridiana- en la configuración del relieve y el drenaje. Muchas de estas estructuras se encuentran relacionadas a fases deformativas ocurridas desde el Paleozoico inferior, las que habrían sufrido sucesivas reactivaciones durante el ciclo Andino.

Los ríos tributarios que ocupan el sector sur de la cuenca muestran algunas diferencias con respecto a aquellos que drenan el sector septentrional. Tales diferencias se relacionan principalmente a la variabilidad en la orientación de los colectores principales, la morfología de las cuencas y el diseño de las redes de drenaje. Así, mientras en el sector norte predomina las cuencas de morfologías alargadas y angostas, en la porción sur son características las formas más redondeadas. Del mismo modo el típico diseño rectangular de las redes de drenaje del sector norte es reemplazado por diseños dendríticos con una mayor sinuosidad del colector principal lo que respondería a un control relacionado más directamente con la litología que con la estructura regional.

Los principales afluentes del sector sur de la cuenca son los ríos de las quebradas de Coquena, Chalala y Huachichocana.

La distribución de los elementos orográficos de la cuenca se caracteriza por la presencia de cordones montañosos de orientación general N-S presentándose las mayores altitudes hacia el sector occidental. Entre los picos montañosos más destacados de la cuenca pueden mencionarse: el Cerro Morado de Purmamarca (3.050 m s.n.m), el Cerro del Cobre (3.650 m s.n.m),

el Cerro Estancia Grande (3.650 m s.n.m) y el Cerro Lipán (3.550 m s.n.m) en el norte y el cerro Azul Alto (3.800 m s.n.m) hacia el sur.

La cobertura vegetal de la zona es escasa y corresponde, desde el punto de vista fitogeográfico, a la zona de transición entre las provincias Puneña y Prepuneña (Cabrerá 1971). El tipo de vegetación dominante es la estepa arbustiva xerófila encontrándose, además, cardonales, bosquecillos enanos y cojines de bromeliáceas, entre otras.

La comunidad clímax está compuesta por numerosas especies arbustivas las que se combinan en forma diversa; especies dominantes son la sacanza (*Gobmatia glutinosa*), la sumalahua (*Cassia crassiramea*), el áfido (*Caesalpinia trichocarpa*) y otras.

Los sectores bajos de los valles, debido a su cercanía con los cursos fluviales, suelen soportar una vegetación arbórea de mayor desarrollo al igual que los sectores ubicados sobre las planicies aluviales principales, las que se constituyen en las principales áreas de cultivo bajo riego.

Los suelos presentan un escaso a nulo desarrollo pedogenético a causa del condicionamiento ejercido por el clima árido y presentan pendientes que varían entre 13 y 25% y un grado de erosión entre moderado y grave (Nadir y Chafatinos 1990).

El sistema hidrográfico tiene en el río Purmamarca al colector principal de la cuenca, siendo los tributarios más destacados los arroyos Estancia Grande, Lipán y Sepulturas en el sector norte y los arroyos de las quebradas de Coquena, Chalala, Quisquiri y Huachichocana en la porción sur. Sus características morfosedimentarias permiten clasificarlo como un río de hábito entrelazado o *braided* (Leopold y Wolman 1957) con una moderada multiplicidad de canales fluviales de baja sinuosidad (Rust 1978) separados por barras de material aluvial. El desarrollo areal de la llanura de inundación es variable a lo largo del perfil longitudinal, especialmente en lo que respecta a su sección transversal, siendo frecuente la presencia de estrechamientos producidos tanto por causas naturales (Ej., Progradación de abanicos aluviales desde las quebradas laterales) como antrópicas (Ej., Incorporación de sectores de la llanura aluvial como áreas de cultivo).

La variabilidad de la descarga fluvial a lo largo del año define un carácter marcadamente torrencial para los cursos que drenan la cuenca. Durante los meses de verano de años lluviosos suelen presentarse elevados picos de crecienta como respuesta al ingreso de importantes frentes de tormenta que producen intensas precipitaciones. No obstante, suelen presentarse años de escasa lluvias durante los cuales los caudales fluviales son muy exigüos. Durante estos períodos el escurrimiento superficial suele presentar una corta duración debido a la rápida infiltración en el subálveo de los ríos.

La importante carga sólida producida dentro de la cuenca es movilizadada casi con exclusividad durante los años de fuertes lluvias. El mecanismo de transporte es esencialmente de "a pulsos" y predominantemente como carga de fondo. Debido a las características texturales del aporte sólido y a la corta duración de las crecientes los canales de descarga fluvial presentan una alta relación ancho/profundidad. El material de granulometría más fina (limo-arcillosa), por su parte, es transportado en suspensión y puede ser evacuado de la cuenca con caudales sensiblemente menores.

### 3. CLIMA

Las características climáticas de la zona de estudio corresponden a las de un clima de tipo árido, mesotermal, con nulo exceso de agua y baja concentración estival de la eficiencia térmica de acuerdo con la clasificación de *Thornthwaite* (1948). El régimen térmico está condicionado principalmente por la latitud y la altitud. Esta última adquiere fundamental importancia debido a que a mayores alturas la temperatura desciende

según un gradiente función del contenido de humedad del aire, el mayor albedo y la presencia de vientos de altura (*Buitrago y Larrán 1994*). Como en muchos sectores del noroeste argentino la información termo-pluviométrica es escasa y la mayor parte de los registros se encuentran incompletos. Los datos de temperatura para la localidad de Purmamarca, obtenidos entre los años 1988 y 1995, arrojan una media anual de 16,3 °C (Fig. 2) registrándose los valores máximos (19,1 °C) y mínimos (12,1 °C) durante los meses de diciembre y julio respectivamente.

FIGURA 2. TEMPERATURAS DE LA LOCALIDAD DE PURMAMARCA (Serie 1988 -1995)

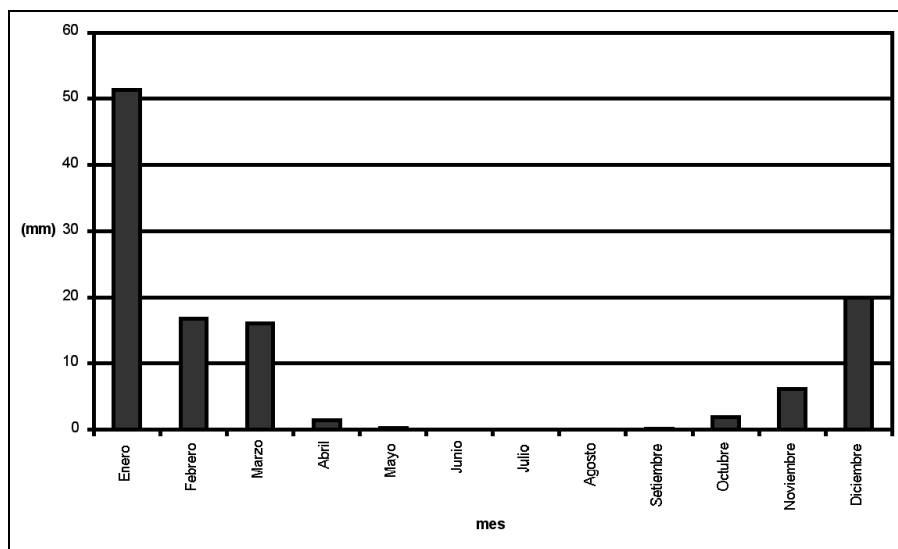
Año	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Setiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Media
1988	19,9	17,2	19	16,1	11,2	12,4	10,6	14,4	13,7	16,3	18,3	18,5	15,6
1989	18,4	18,8	17,1	16,5	13,7	13,4	12,2	16,2	13,4	16,6	18	19,6	16,2
1990	18,6	17,3	18,7	17,5	15	12,3	10	14,5	14,3	17,6	18,7	18,6	16,1
1991	18,3	17,8	17,7	17,5	16,9	13,9	14,2	18,3	16,8	15,8	17	19,9	17
1992	18	18,2	18,1	16,3	16	15,1	10,2	12,9	13,6	16,3	16,3	19	15,8
1993	18,8	16,5	18	16,8	16	14,9	11,2	13,4	14,4	16,8	18,1	18,4	16,1
1994	18,7	17,9	17	16	15,7	14,6	12,8	14	16,6	17,5	18,1	20	16,6
1995	19,6	18	17,8	16,4	13,7	14,9	15,3	14,8	15,1	16,8	18,1	18,7	16,6
Media	18,8	17,7	17,9	16,6	14,8	13,9	12,1	14,8	14,7	16,7	17,8	19,1	16,3

En lo que respecta a las temperaturas extremas, la variación anual registrada para los valores mínimos es mucho más marcada que aquella mostrada por los registros máximos o medios. Según *Buitrago y Larrán (1994)* la explicación a este fenómeno debe buscarse en la escasa variación del goce de radiación, que determina pocas diferencias entre las máximas de verano y las de invierno. Las temperaturas mínimas, en cambio, dependen de la irradiación térmica nocturna, que se acentúa marcadamente en invierno debido a la mayor duración de la noche y al menor contenido de humedad en la atmósfera, sumándose a esto, la llegada de masas de aire frío procedentes del sur.

La amplitud térmica promedio oscila entre 4,7 y 25 °C para los meses de julio y diciembre respectivamente. El régimen de heladas aumenta con la altitud y oscila en los 200 días al año. El fuerte control del relieve sobre las masas de aire que ingresan en la región determina que las precipitaciones sean de tipo orográfico con una distribución de tipo monzónico.

La precipitación media anual de Purmamarca es de 96 mm y se concentra casi con exclusividad entre los meses de noviembre y marzo (Fig.3).

FIGURA 3. HISTOGRAMA DE PRECIPITACIONES MEDIAS MENSUALES DE LA LOCALIDAD DE PURMAMARCA (Serie temporal 1987 -1995)



Sólo cada ciertos años -en coincidencia con los efectos de perturbaciones del patrón climático global- se registran valores que superiores a los 200 mm. En tal sentido resulta necesario destacar la influencia del fenómeno ENSO (*El Niño/Southern Oscillation*) sobre el noroeste argentino, el que provoca sensibles modificaciones tanto en los volúmenes como en la distribución de las precipitaciones (*Bianchi y Yañez 1992*). Del análisis de pluviogramas correspondientes a distintos sectores de la región NOA (*Bianchi y Yañez 1992; Soler 1996*) surge como tendencia general que durante un evento ENSO de gran intensidad los años inmediatamente anteriores presentan bajas precipitaciones. Al segundo año de comenzar a manifestarse el fenómeno a escala global las precipitaciones de la región se incrementan notablemente para alcanzar los picos máximos al año siguiente. Una hipótesis que explicaría tal comportamiento del sistema climático es presentada por *Bianchi y Yañez (1992)* donde señalan que durante un evento ENSO llueve copiosamente en Ecuador y Perú al igual que en la selva amazónica del centro y oeste del Brasil; gran parte de estos volúmenes excedentarios provocarían intensas crecidas en los ríos y la inundación de miles de km<sup>2</sup>, en las tierras bajas del Gran Pantanal, la que al año siguiente se convertiría en una enorme superficie evaporante que sobrealimentaría de humedad a las masas de aire ecuatorial continental provocando a su ingreso en el noroeste argentino -por el noreste- lluvias de excepcional volumen. La influencia del ENSO también queda puesta de manifiesto en la generación de importantes movimientos de remoción en masa a lo largo de toda la quebrada de Humahuaca.

La humedad relativa registra los mayores valores durante los meses de otoño debido a la menor temperatura respecto del verano y a la alta humedad que permanece remanente con posterioridad a la estación lluviosa.

El régimen de vientos -fuertemente condicionado por el relieve- muestra un predominio de las denominadas "brisas de valle y montaña" caracterizadas por un movimiento ascendente de las masas de aire caliente hacia la montaña durante el día y el descenso de brisas frescas por la noche. Otro viento de influencia local es el "viento norte" típicamente seco, cálido y raflagoso. Durante los meses de verano, la entrada de aire húmedo del océano Atlántico responde a la circulación de la alta atmósfera y, si bien no registran velocidades de importancia, son los vientos proveedores de las lluvias orográficas de la región.

En el invierno adquiere importancia el desplazamiento de masas de aire frías (polares) procedentes del sur que llegan a la región algunas veces húmedas y otras secas.

#### 4. MARCO GEOLÓGICO-ESTRUCTURAL

Desde el punto de vista morfoestructural la comarca en estudio pertenece a la provincia geológica de la Cordillera Oriental (*Turner y Mon 1979*). Esta unidad, que presenta la configuración típica de una faja plegada y corrida, está caracterizada por una tectónica de corrimientos de rumbo N-S los que produjeron estructuras imbricadas vergentes hacia el E. Se trata de un cinturón orogénico joven, afectado por diferentes fases diastólicas desde el Paleozoico inferior hasta el Cenozoico, las que alcanzaron su mayor intensidad (levantamiento) durante el período Plioceno-Pleistoceno.

Las fases diastólicas precenozoicas han condicionado la distribución y geometría de las entidades litológicas y han influido decididamente en la localización de las estructuras más recientes. El basamento metamórfico de la región corresponde a las metasedimentitas de bajo grado de la Formación Puncoviscana

las que, junto con las unidades cámbricas del Grupo Mesón, forman la mayor parte de los cordones montañosos de la cuenca. El contacto discordante entre ambas unidades se atribuye a la fase Tiltárica (*Turner y Méndez 1979*) del Ciclo Geotectónico Pampeano (= Panamericano de Harrington 1975).

Las sedimentitas ordovícicas pertenecientes al Grupo Santa Victoria afloran principalmente en el sector sur de la cuenca y sólo localmente en las cabeceras de la quebrada de Estancia Grande. Forman fajas alargadas en sentido submeridional compuestas por lutitas y areniscas arcillosas de coloración amarillenta a gris amarillenta, muy fosilíferas e intensamente diaclasadas.

Con posterioridad a la depositación de estas unidades se produce un extenso hiatus hasta el Cretácico superior, momento en el cual se inicia la sedimentación de las unidades del Grupo Salta. Este grupo está compuesto por areniscas calcáreas, medianas a gruesas, friables y de color blanquecino (Formación Lecho) y calizas oolíticas, estromatolíticas y margas de coloración amarillenta (Formación Yacoraite).

Las unidades del Grupo Salta afloran en el tramo inferior y sobre ambas márgenes de la quebrada de Purmamarca y también en la quebrada de Estancia Grande. En la localidad de Cienaguillas la Formación Lecho se asienta en discordancia sobre las unidades ordovícicas (*Salfity 1980*).

Los depósitos cuaternarios de la cuenca de estudio corresponden esencialmente a sucesiones de conglomerados de color rosado, mal seleccionados entre los que alternan escasos niveles de areniscas gruesas a conglomerádicas y bancos de pelitas de color verdoso. Estos niveles corresponden a abanicos aluviales dominados por fenómenos gravitatorios de sedimentos -esencialmente *debris flows*- actualmente infuncionales.

Los depósitos modernos, representados por las actuales planicies y abanicos aluviales junto con las espesas formaciones coluviales ubicadas el pie de las vertientes, están compuestos principalmente de bloques, gravas y arenas con escasa a nula consolidación.

#### 5. PROCESOS GEOMORFOLÓGICOS Y GEOFORMAS

Las características geomorfológicas de la cuenca del río Purmamarca son el resultado de la compleja interacción entre la evolución tectónica y la acción de los agentes externos, principalmente del escurrimiento fluvial y la remoción en masa; aunque en forma subordinada merece destacarse la constante actividad del viento.

Pueden reconocerse dentro de la cuenca dos ambientes diferenciados a partir de sus características morfológicas ubicados por encima y debajo de los 3.500 m de altitud.

En aquellas áreas que se ubican en las mayores altitudes la morfogénesis es escasa y predominan las formas suaves y redondeadas. La acción del escurrimiento fluvial es poco importante y los sectores intermontanos se encuentran recubiertos por un espeso manto de escombros (*campo de derrubios*) compuesto por bloques angulosos de granulometría variada el que respondería a una condición criogénica pasada. Localmente y por encima de los 4.000 m de altura puede observarse la presencia de relictos de geoformas de origen glacial. En contraposición, la porción de la cuenca que se ubica por debajo de los 3.500 m se encuentra sometida a una intensa morfogénesis dominada por los procesos fluviales y la remoción en masa elementos que le imprimen al paisaje un aspecto accidentado donde dominan las pendientes pronunciadas y las divisorias agudas y accidentadas.

FIGURA 4. MAPA GEOMORFOLÓGICO DE LA CUENCA DEL RÍO PURMAMARCA (A)

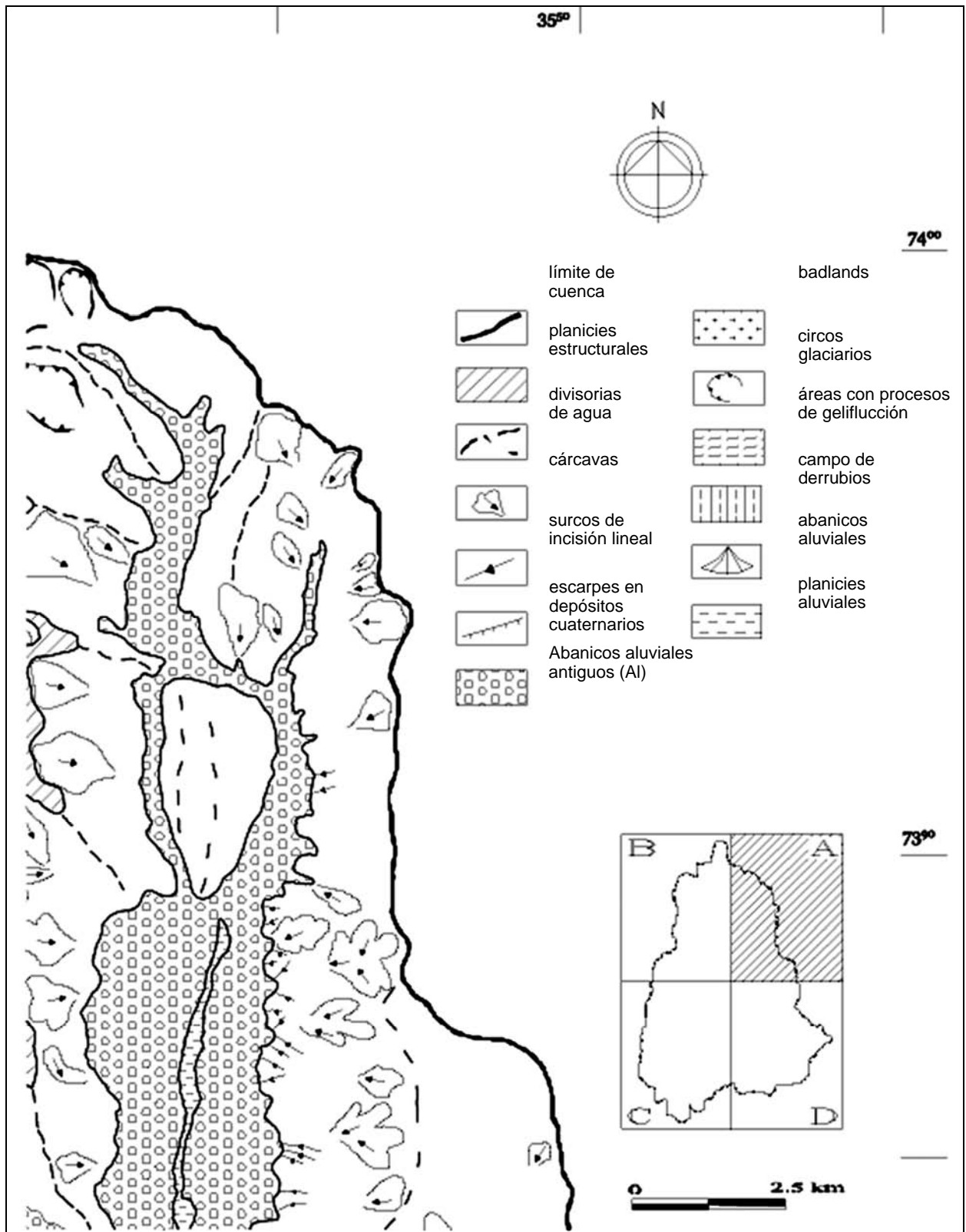




FIGURA 4. MAPA GEOMORFOLÓGICO DE LA CUENCA DEL RÍO PURMAMARCA (B)

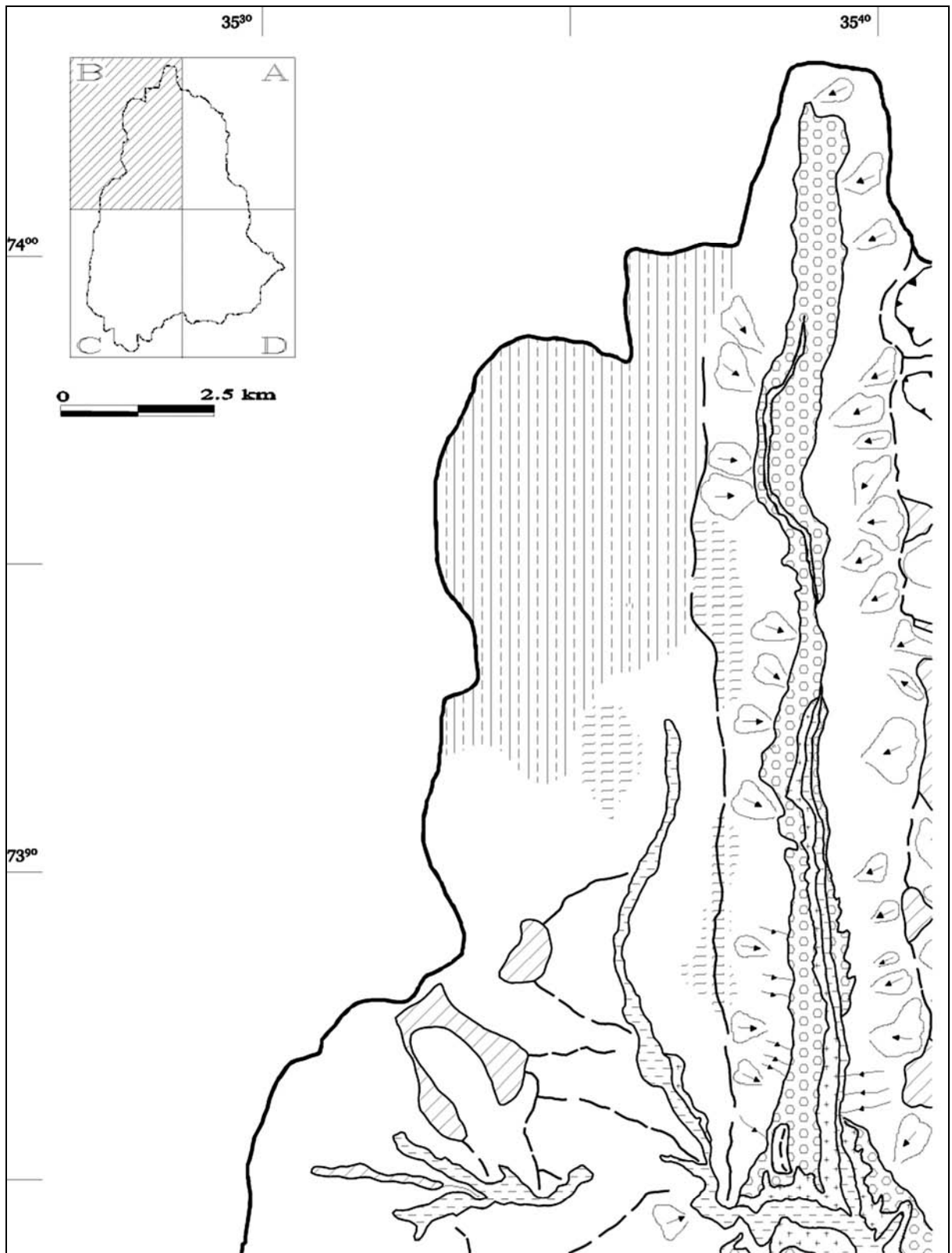


FIGURA 4. MAPA GEOMORFOLÓGICO DE LA CUENCA DEL RÍO PURMAMARCA (C)

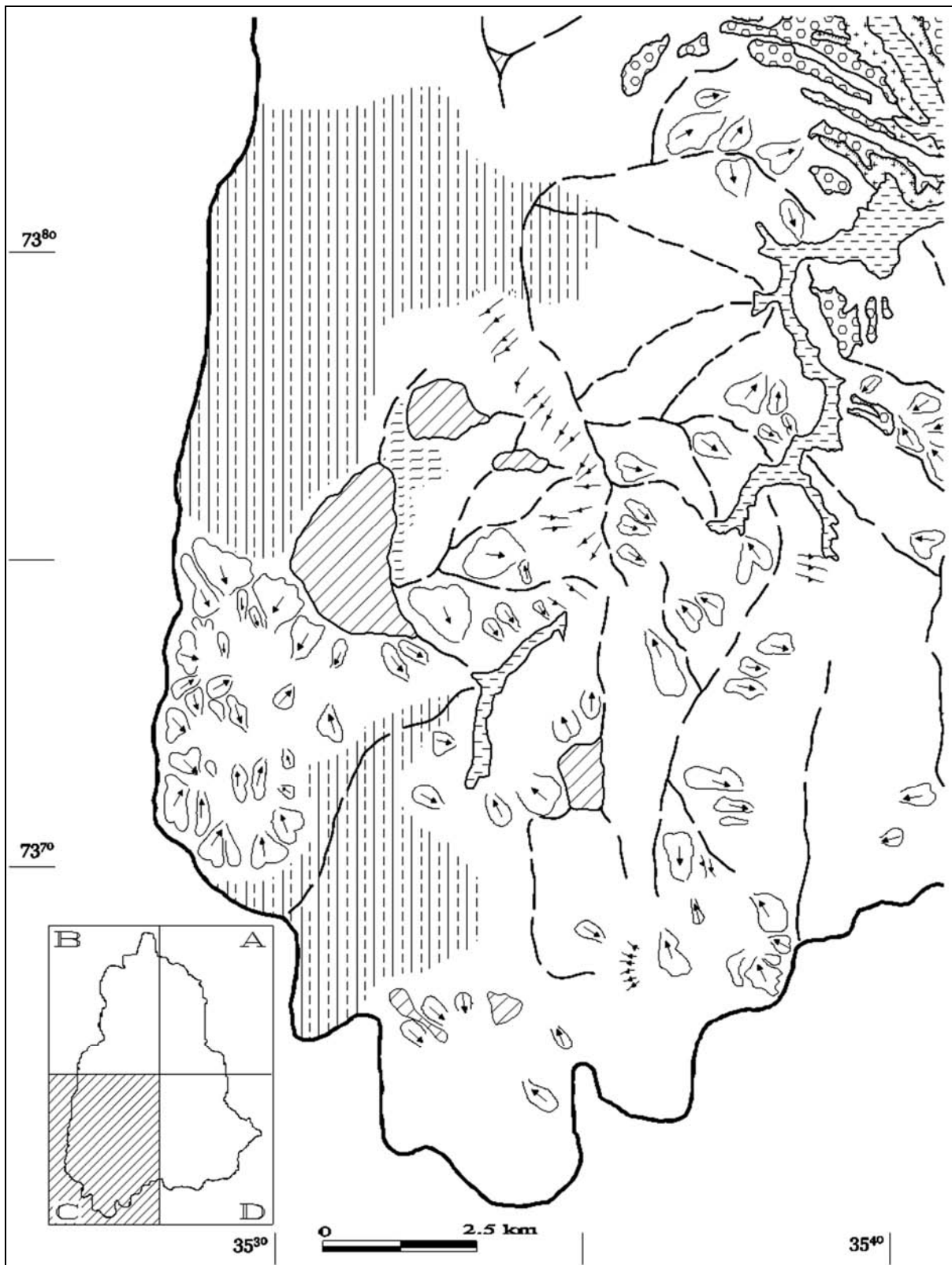
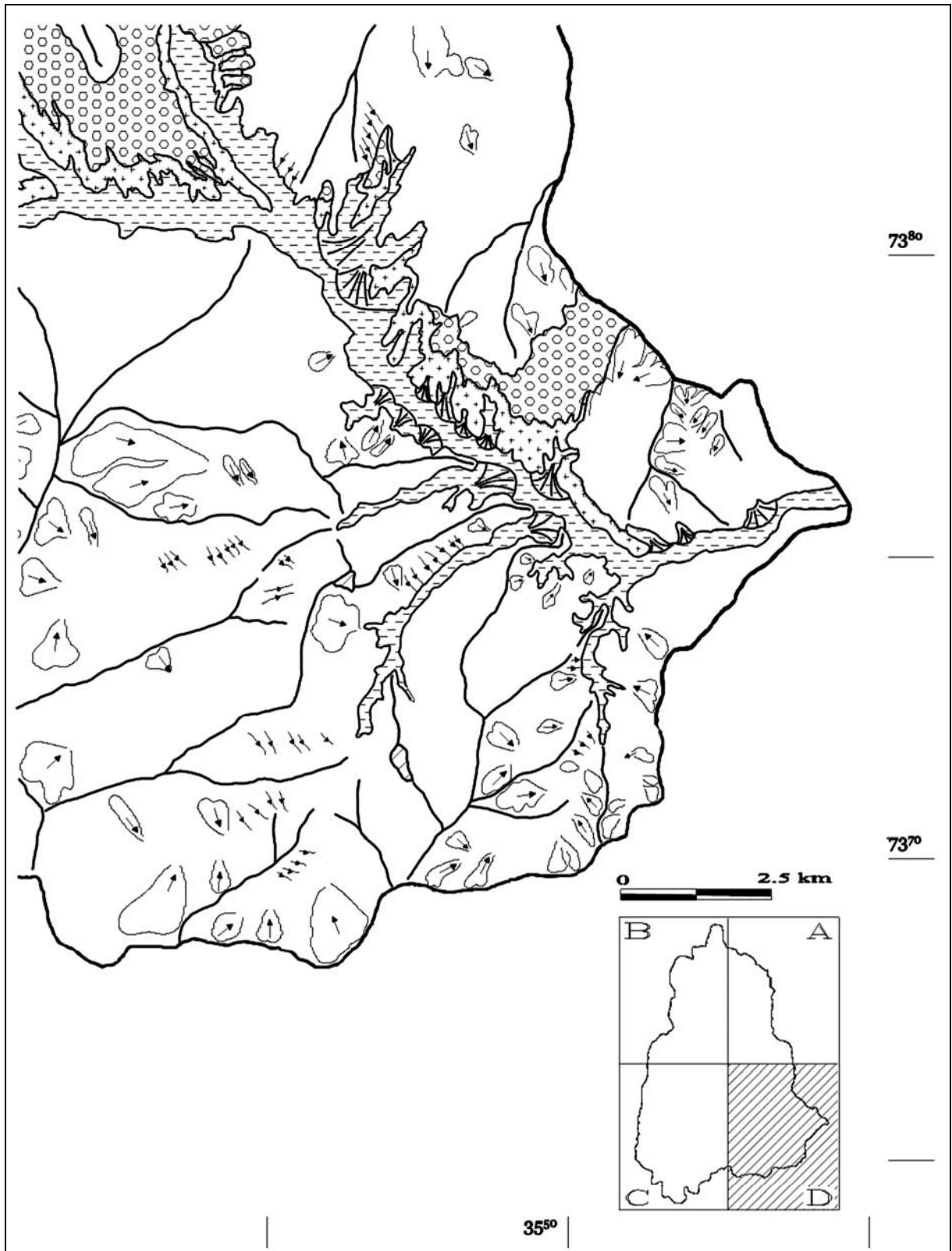


FIGURA 4. MAPA GEOMORFOLÓGICO DE LA CUENCA DEL RÍO PURMAMARCA (D)



### Procesos y geofomas de origen fluvial

El escurrimiento fluvial de la cuenca se encuentra organizado en torno a valles cuya geometría y evolución estuvo fuertemente controlada por la estructura regional y las fluctuaciones climáticas ocurridas durante el Cuaternario. En el sector norte de la cuenca se destaca la presencia de valles de orientación meridional a submeridional, de tipo subsecuente, controlados por la presencia de frentes de corrimiento tectónico.

De este a oeste, se presentan los valles de Estancia Grande (o Cienaguillas), Lipán y Sepulturas (Fig. 4). La hidrografía de la porción sur de la cuenca muestra algunas diferencias respecto al sector norte principalmente en lo que respecta a la geometría de las redes fluviales y a la morfología de las subcuencas. Mientras que en el sector norte predominan las redes de drenaje de diseño rectangular a angular en la porción sur suelen dominar las de tipo dendrítico. La morfología de las subcuencas, por su parte, muestra una clara tendencia hacia formas más circulares y con una mayor sinuosidad de los colectores principales. Entre las principales subcuencas del sector sur pueden mencionarse las de Coquena, Chalala y Huachichocana.

Las principales geofomas de origen fluvial son los abanicos aluviales, los que se distribuyen principalmente a lo largo de la quebrada principal y en las quebradas laterales del sector septentrional. Pueden reconocerse tres generaciones de abanicos ubicados a diferentes alturas respecto del piso actual de los valles.

Los más antiguos (AI) corresponden a un conjunto de abanicos coalescentes de importante desarrollo espacial y vertical. Se presentan aterrazados respecto a los cursos actuales formando desniveles que pueden superar la centena de metros, dando lugar a un nivel de agradación muy regular, el que constituye un nivel morfológico de referencia dentro de la cuenca (*sediaplano*). El espesor aflorante de esta sucesión aluvial varía entre 20 y 115 m, mostrando un aumento progresivo de potencia hacia el eje del valle y hacia el valle de Purmamarca donde adquieren la máxima potencia (Ej., Quebrada de Cienaguillas: 115 m). Están compuestos mayoritariamente por conglomerados macizos, de color rosado dispuestos en bancos que pueden alcanzar varios metros de espesor, intercalados con esporádicos niveles de areniscas conglomerádicas. En ciertos sectores se presentan bancos pelíticos de coloración más clara. El esqueleto de los conglomerados está formado por clastos angulosos a subangulosos, de granulometría variada y carentes de estructuración interna. Son frecuentes los bloques de tamaño métrico que tienden a ubicarse hacia la parte superior de los bancos (Soler, *en prep.*).

La matriz varía de areno-limosa a limo-arcillosa. Los contactos de base y techo de los estratos son esencialmente no erosivos y en muchos casos difíciles de definir. Sobre la base de sus características sedimentológicas han sido interpretados como depósitos de *debris flows* y flujos efímeros hiperconcentrados (Soler y May 2000, com. pers.).

En algunos sectores suelen encontrarse cerca de la superficie horizontes calcáreos con escasa continuidad lateral, los que suelen ser observables en surcos producidos por la erosión hídrica. Sobre el frente de estas acumulaciones es destacable la presencia de una densa y ramificada red de canales angostos, profundos y pronunciados, que en conjunto forman un paisaje de *bad lands* altamente funcionales durante la estación lluviosa. Estos canales suelen concentrar rápidamente las aguas de precipitación, encauzándolas y dando lugar a flujos con alta capacidad de transporte y velocidad.

En su acelerado descenso estos flujos suelen incorporar gran cantidad de material detrítico de las paredes laterales del canal, proceso que provoca la desestabilización y posterior caída de la columna litológica suprayacente por pérdida de sustentación. Estos flujos dan lugar a nuevas acumulaciones aluviales en la zona pedemontana a causa del cambio abrupto de la pendiente y la pérdida de confinamiento.

La superficie de estos abanicos suele presentar en muchos sectores una cobertura coluvial de espesor variable producto de la acción de los mecanismos regularizadores de las vertientes aledañas. La acción continuada de estos procesos ha permitido una suave articulación de la pendiente entre la superficie de los depósitos y el frente montañoso.

Los abanicos aluviales intermedios (AII), ubicados a un nivel topográfico más bajo que los AI, presentan espesores que pueden variar entre 2 y 20 m y muestran por lo general una mayor cobertura vegetal. Algunos exhiben sobre su superficie una incipiente red de drenaje secundaria de diseño dendrítico formada por canales de escurrimiento de escasa profundidad, la que evacúa las precipitaciones producidas directamente sobre los abanicos. Los abanicos aluviales actuales (AIII) pueden presentarse de acuerdo a su ubicación en la cuenca y a las características del área de aporte, cubriendo tanto los abanicos antiguos e intermedios como las llanuras de inundación actuales. Pueden tener sus cuencas de recepción ubicadas directamente sobre las áreas de *bad lands* o recibir el aporte sólido a partir de cárcavas ubicadas en los frentes montañosos. Son frecuentes también aquellos que reciben un aporte mixto desde ambos sectores.

Corresponden a cuerpos de escaso desarrollo espacial compuestos esencialmente de material grueso con matriz arenosa asociados por lo general a un único canal de descarga. La intensa actividad de estas geofomas provoca que en ciertas ocasiones el avance de los flujos logre endicar los valles, provocando la interrupción temporal del escurrimiento fluvial y la formación de cuerpos de agua efímeros en los que se produce la decantación del material fino. Ejemplos de este tipo de depósitos pueden observarse en varios puntos de la quebrada de Humahuaca (Ej., Volcán), en otros sectores de la cuenca de Purmamarca y también parecen haber sido frecuentes a lo largo del Cuaternario, tal como lo demuestra la presencia de niveles areno-limosos y limo-arcillosos dentro de la columna litológica de los abanicos antiguos, donde fueron identificados varios niveles cuya geometría y escasa distribución areal indicarían un origen similar. Los flujos densos (*debris flows*) muestran un claro predominio sobre los flujos netamente fluviales. En este sentido es característica la presencia de "albardones laterales" sobre las márgenes de los canales de descarga de numerosos abanicos actuales ubicados tanto dentro de la cuenca como en otros sectores de la quebrada de Humahuaca. Los procesos fluviales propiamente dichos suelen ser poco frecuentes debido a la enorme disponibilidad de material detrítico en prácticamente todos los sectores de la cuenca y a las marcadas características torrenciales de los cursos. Sólo adquieren un carácter típicamente fluvial aquellos pequeños arroyos que son alimentados por manantiales durante los meses de invierno.

Los flujos densos suelen dominar también la dinámica de las llanuras aluviales actuales, las que suelen ser invadidas durante los eventos de gran magnitud asociados a años con lluvias elevadas. Estos años, aparentemente anómalos, responderían a perturbaciones climáticas de carácter global asociadas con el fenómeno ENSO (*El Niño/Southern Oscillation*), las que provocarían modificaciones en la distribución y volumen de las

precipitaciones de la región (Bianchi y Yañez 1992). Según estos autores, los años de grandes precipitaciones en el noroeste argentino guardarían un cierto retraso (de cerca de 2 años) respecto de los años coincidentes con el fenómeno ENSO. Esta situación ha sido corroborada en los registros de diferentes estaciones pluviométricas localizadas en el noroeste (Bianchi y Yañez 1992; Soler 1996). La acción fluvial también ejerce su acción a partir de la incisión lineal de las acumulaciones coluviales que tapizan la porción media a inferior de las vertientes, mientras que, hacia la cuenca baja, los efectos tienden a ser mucho más intensos, especialmente en las áreas de cárcavas. Estas áreas constituyen, junto con los *bad lands*, las zonas de mayor erosión de la cuenca a partir de las cuales se aporta la mayor cantidad de material a los flujos densos que se producen durante los meses lluviosos.

Están formadas por una densa y ramificada red de cursos fluviales de primer orden, con gran pendiente y capacidad erosiva, los que aportan la carga sólida y líquida hacia un colector principal. Como se observa en el mapa geomorfológico (Fig. 4) presentan una amplia distribución espacial en la cuenca

#### Procesos y geformas de origen criogénico y glacial

En los relieves ubicados a una altitud superior a los 3.500 m predominan las formas asociadas a un ambiente criogénico el que estaría relacionado a una condición climática más fría y húmeda, la que habría afectado a la región durante el Pleistoceno.

Las vertientes de las serranías, tal como ocurre en la sierra de Lipán u otros sectores del sudoeste de la cuenca, suelen mostrar en su porción superior conspicuos lóbulos y terracillas de soliflucción. Juntamente con estas geformas aparecen extensas áreas cubiertas por un manto de detritos compuesto esencialmente de bloques angulosos (*campo de derrubios o campo de escombros*).

Estas formaciones tapizan casi completamente las antiguas depresiones fluviales y las laderas de las serranías, soportando una escasa vegetación debido a la escasez de precipitaciones que caracteriza a estos sectores.

El espesor de estos mantos puede superar la decena de metros y estarían vinculados genéticamente a procesos crioclásticos que habrían sido activos durante una etapa de enfriamiento regional durante el Cuaternario. Se desarrollan principalmente sobre afloramientos de edad cámbrica y precámbrica.

Formas de posible origen glacial han sido observadas exclusivamente en la parte alta de la quebrada de Estancia Grande, donde aparecen depresiones interpretadas como pequeños "circos glaciares". Tales cubetas habrían sustentado la presencia de glaciares de circo de escasa representación areal y su orientación -esencialmente este-noreste- respondería a la dirección de ingreso predominante de los frentes húmedos los que habrían tenido, al igual que en la actualidad, un fuerte control orográfico.

En lo que respecta a las formas de acumulación glaciaria no pudieron ser definidas con claridad y sólo sobre la base de criterios fotogeológicos fueron identificados cuerpos alargados que podrían corresponder a morenas laterales fuertemente degradadas por efectos de la remoción en masa y la erosión hídrica.

Las principales evidencias de la existencia de una glaciación cuaternaria en la región se localizan fuera de la zona de estudio sobre relieves ubicados por encima de los 5.000 m (Nevado de Chañi, 6200 m) (Igarzábal 1981). Aunque resulta altamente probable que las fluctuaciones climáticas globales ocurridas durante el Cuaternario hayan tenido su correlato en el noroeste argentino, las condiciones climáticas áridas a semiáridas

imperantes en la región habrían permitido sólo un escaso desarrollo de la actividad del hielo (Tchilinguirian y Pereyra 2001). No obstante la inexistencia de elementos que permitan ubicar cronológicamente estos períodos glaciares, los depósitos interpretados como de origen glacial del noroeste argentino corresponderían al Último Máximo Glaciar (UMG) (Tchilinguirian y Pereyra 2001).

#### Procesos y geformas relacionadas a la remoción en masa

Las pronunciadas pendientes, la intensa fracturación de las rocas aflorantes, la escasa cobertura vegetal y las intensas precipitaciones estivales son los principales elementos que controlan y favorecen la ocurrencia de frecuentes fenómenos de remoción en masa dentro de la cuenca. Dentro del amplio grupo de procesos gravitatorios definidos en la literatura predominan los flujos y especialmente los de tipo *debris flow*.

Estos fenómenos son los principales mecanismos constructores de los actuales abanicos y bajadas aluviales que ocupan las áreas pedemontanas y la desembocadura de las principales quebradas.

La porción media a inferior de las vertientes se encuentra recubierta por conspicuos conos de deyección, muchos de los cuales suelen presentar cierto grado de desarrollo edáfico evidenciado por horizontes calcáreos indicadores de una cierta antigüedad y estabilidad.

Suelen presentarse densamente disectados por surcos de erosión lineal los que suelen actuar como canales de descarga durante las lluvias estivales.

En diferentes sectores de la cuenca media e inferior pueden observarse deslizamientos rotacionales parcialmente estabilizados y otros que en apariencia han tenido una actividad reciente. Los paquetes movilizados suelen verse afectados por nuevos deslizamientos más modernos, producidos a expensas del movimiento principal y también eventos que comienzan como deslizamientos y culminan como flujos. Por su reducido tamaño y el escaso desarrollo de la vegetación en muchos casos suelen no ser tan evidentes.

La complejidad estructural de la región contribuye también a que muchos procesos gravitatorios hayan sido interpretados como tectónicos, especialmente como fallas directas.

El factor disparador de los flujos de mayor magnitud parece estar ligado a las fuertes precipitaciones estivales, las que presentan un comportamiento diferencial según el año en que se considere. En este sentido es posible constatar -a partir del análisis de los registros de precipitaciones- que existen años en los que predominan las lluvias persistentes y de poca intensidad mientras que en otros las lluvias suelen presentar altas intensidades y corta duración. Este contraste en el comportamiento de las precipitaciones parece estar relacionada a perturbaciones climáticas globales como el fenómeno ENSO y daría lugar a distintos tipos de flujos con notables variaciones de magnitud y poder destructivo sobre la infraestructura civil (Soler 2000). De acuerdo con este criterio pueden definirse dos tipos característicos de fenómenos: por un lado se encuentran los *debris flows* de gran magnitud que responden a precipitaciones "excepcionales" de alta intensidad dentro de la cuenca los que tendrían una recurrencia variable de entre 10 y 20 años. Su alta velocidad, capacidad de transporte y movilidad les permite recorrer distancias relativamente largas e inclusive abandonar los límites de las subcuencas de origen e inclusive de la misma cuenca

de Purmamarca. El segundo tipo, más frecuente, corresponde a *debris flows* de menor magnitud, con moderada a baja movilidad y de recurrencia prácticamente anual. En este caso la masa movilizada y la distancia recorrida es considerablemente menor.

Otros fenómenos gravitatorios más localizados se observan a lo largo de la ruta nacional N° 52, que continúan en la Cuesta de Lipán donde se producen caídas de rocas y detritos originadas principalmente en la desestabilización de las vertientes afectadas por el corte del camino.

#### Planicies estructurales en sectores cumbrales serranos

Sobre las áreas cumbrales de las sierras se desarrollan relieves con muy baja pendiente desarrollados principalmente sobre rocas de edad cámbrica y precámbricas que corresponderían a antiguas planicies estructurales y superficies de erosión regional.

Tales superficies se presentan dislocadas por los efectos de las diferentes fases de la orogenia andina (*Tchilinguirian y Pereyra 2001*) por los que suelen aparecer a diferentes niveles altitudinales. Son claramente identificables sobre los cordones que separan las quebradas de Estancia Grande, Lipán y Sepulturas y también en el sector occidental y sudoccidental de la cuenca. La asociación de estos niveles con relieves cumbrales redondeados y de suaves pendientes (etapa de madurez o senilidad) indicaría una etapa de estabilidad tectónica probablemente pre-orogénica (pre-Fase Quechua) (*Tchilinguirian y Pereyra 2001*).

## 6. EVOLUCION GEOMORFOLÓGICA DE LA CUENCA

La historia tectónica y las oscilaciones climáticas ocurridas durante el Cuaternario constituyen los principales factores que controlaron la evolución geomorfológica de la cuenca. Durante una etapa inicial de estabilidad orogénica la morfogénesis habría provocado que el relieve alcance un estado de "madurez" (o "senectud") evidenciado por una morfología suave y redondeada de las cumbres y la existencia de superficies de erosión a escala regional. El posterior ascenso de la Sierra Alta y sus estribaciones meridionales, junto con la actividad de las estructuras de rumbo norte-sur ubicadas hacia el este, habría dado lugar a una primitiva organización de la red drenaje en torno a valles de rumbo esencialmente meridional.

La acción del escurrimiento fluvial habría comenzado a producir la incisión y posterior ensanchamiento de los valles por erosión lateral dando lugar a los primeros depósitos aluviales de fondo plano y a las primeras acumulaciones coluviales sobre las vertientes de los cordones serranos. Posteriormente, y probablemente por efectos tectónicos, se habría iniciado una onda de rejuvenecimiento fluvial que habría dado lugar a una nueva incisión y ensanchamiento de los valles. Las estructuras transversales al rumbo andino habrían completado para este momento la integración de la red fluvial en torno a un colector principal como el río Grande.

Las espesas acumulaciones aluviales correspondientes a los abanicos más antiguos (AI) habrían comenzado a depositarse durante este período para culminar con la completa colmatación de los valles por efectos de una activa remoción en masa. Esta marcada tendencia agradacional de los cursos se debió muy probablemente a que el sistema fluvial troncal (río Grande) carecía de suficiente energía de transporte para evacuar todo el material aportado por las pendientes y relieves aledaños. Esta situación como lo señalan *Tchilinguirian y Pereyra (2001)* pudo

haberse debido a que el perfil de equilibrio del sistema fluvial troncal no se habría alcanzado totalmente, a que los cursos presentaban bajos caudales (cambios climáticos) o a que el aporte de material de las laderas era muy grande debido a la existencia de procesos que originaban gran cantidad de detritos (crioclastismo, procesos glaciogénicos y criogénicos).

Con posterioridad y a causa del inicio de un nuevo episodio de rejuvenecimiento se habría producido la generalizada incisión de los abanicos antiguos y, a expensas de ellos, la generación de los abanicos intermedios (AII). La generación de los abanicos actuales (AIII), finalmente, podría estar relacionada con cambios normales en el régimen hidráulico de los cursos fluvial que drenan la cuenca y a la concentración preferencial del escurrimiento sobre una de las márgenes del valle. Este comportamiento del sistema fluvial habría contribuido también a la profundización de la llanura aluvial en determinados sectores favoreciendo, además, los procesos de remoción en masa por socavamiento de la base de los abanicos intermedios.

La actual y generalizada tendencia de los cursos a la agradación tendría su principal factor en el balance negativo de la cuenca respecto a la evacuación de los detritos producidos juntamente con la intervención del hombre sobre el sistema fluvial.

La intervención antrópica en la cuenca está relacionada principalmente a la ocupación de importantes sectores de la llanura aluvial actual y de los abanicos aluviales intermedios como áreas de cultivo. La necesidad de protección de estos sectores de las inundaciones promovió la instalación de diversos sistemas de defensas de rudimentaria factura e ineficiente funcionalidad. Asimismo la construcción de obras civiles como las carreteras y el puente sobre el río Purmamarca en la salida de la cuenca de Huachichocana contribuirían a acelerar los procesos descritos. La consecuencia de estas acciones es la progresiva reducción del área efectiva de pasaje de la descarga fluvial y la generación de sectores de erosión y sedimentación.

Con respecto a las oscilaciones climáticas que habrían afectado a la región desde el Plioceno existen evidencias claras de que las condiciones glaciales documentadas para los Andes de Bolivia (*Clapperton 1993*) no habrían sido de idéntica magnitud en el noroeste argentino. En apariencia, la ausencia de glaciaciones pliocenas en la región podría estar relacionada con la insuficiente altura de los cordones serranos de la región en este momento (*Clapperton 1991*). Existiría, sin embargo, una correlación entre los avances glaciarios en los Andes Centrales y Altiplano y condiciones climáticas más húmedas y frías tanto para sectores de la Puna, Altiplano y Norte Grande de Chile (*Grosjean y Nuñez 1994; Geyth et al. 1998*) como para la región del noroeste argentino.

La existencia de estas condiciones, como lo señalan *Tchilinguirian y Pereyra (2001)*, podría estar relacionada con la generación de los abanicos aluviales antiguos (AI) e intermedios (AII). Las condiciones de desecamiento regional, posterior a cada evento de retroceso glaciario, habría sido la probable causa de la disección de los niveles aluviales.

La tendencia del clima hacia condiciones más favorables durante el Neoglacial, habría generado condiciones propicias para la reactivación de la red fluvial y la acción de los procesos pedogenéticos en la región (*Tchilinguirian y Pereyra 2001*).

## 7. CONCLUSIONES

La geomorfología de la cuenca del río Purmamarca es el resultado de la superposición e interacción de diversos procesos exógenos y endógenos (tectónicos) ocurridos principalmente durante el Cuaternario. La acción del escurrimiento fluvial representa el principal modelador del relieve, actuando en forma subordinada la remoción en masa y los procesos eólicos. En diferentes sectores de la cuenca están presentes geoformas de origen criogénico (campos de detritos y terracillas y lóbulos de soliflucción) asociadas a una condición climática característica de un ambiente periglacial el que habría afectado a la región durante el Pleistoceno.

Las características altimétricas (insuficiente altitud) y morfológicas del relieve durante este período habrían permitido que la acción glaciaria haya estado localizada exclusivamente en pequeños "glaciares de circo", ubicados exclusivamente en sectores por encima de los 4.000 m de altitud.

Los abanicos aluviales son las formas más desarrolladas de la región. Pueden reconocerse tres generaciones de cuerpos: dos actualmente infuncionales (AI y AII) y la correspondiente a los cuerpos actuales (AIII) cuya dinámica es muy activa.

Los abanicos antiguos e intermedios se encuentran atezados respecto a las llanuras aluviales modernas formando

desniveles que pueden superar los 100 m para los primeros, producto de diferentes ondas de rejuvenecimiento del sistema fluvial.

Los procesos de remoción en masa, tanto en los abanicos antiguos como en los activos, predominan ampliamente sobre los puramente fluviales

La intensa dinámica de los abanicos y llanuras aluviales modernas afecta notablemente la actividad antrópica de la cuenca a causa de las frecuentes inundaciones y aluvionamiento de las parcelas de cultivo, carreteras y áreas urbanizadas. Otros fenómenos de remoción en masa frecuentes, aunque más localizados, están relacionados a deslizamientos rotacionales.

Las evidencias de movimientos tectónicos recientes, a diferencia de otros sectores de la quebrada de Humahuaca, no resultan tan evidentes.

## 8. AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo forma parte del estudio "Geología ambiental de la cuenca del río Purmamarca (Jujuy - Argentina)" y del Proyecto 876/4 del Consejo de Investigación de la UNSa. El autor desea expresar su más sincero agradecimiento al Dr. José Salfity, director del trabajo, por sus oportunos comentarios y recomendaciones durante todo el desarrollo del mismo.

## 9. TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

- BIANCHI, A.R. Y YAÑEZ, C.E., 1993.  
Las precipitaciones en el Noroeste Argentino.  
383 p. *Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria*.
- BUITRAGO, L.G Y LARRÁN, M., 1994.  
El Clima de la Provincia de Jujuy.  
*Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Jujuy, 38 pp., Jujuy*.
- CABRERA, A.L., 1971.  
Fitogeografía de la República Argentina.  
*Boletín de la Sociedad Argentina de Botánica, XIV: 1-3. Buenos Aires*.
- CLAPPERTON, CH., 1991.  
Influence of tectonics in the extents of Quaternary glaciations in the Andes.  
*IG-USP, Special Publication, 8:98-108*.
- CLAPPERTON, CH., 1993.  
Quaternary geology and geomorphology of South America.  
*Elsevier, 779 p. Amsterdam*.
- GEYTH, M., GROSJEAN, M., KRUK, W. Y SCHOTTERER, U., 1998.  
Sincronopsis del desarrollo morfológico y climatológico del Chaco Boreal y de Atacama en los últimos 35.000 años.  
*Memorias del 12º Congreso Geológico de Bolivia, 1267-1276, Cochabamba*.
- GROSJEAN, M. Y NUÑEZ, L., 1994.  
Lateglacial, Early and Middle Holocene environments, human occupation and resource use in the Atacama.  
*Geoarchaeology, 9:271-286*.
- HARRINGTON, H.J., 1975.  
South America.  
*In: Fairbridge, R. (Ed.) The encyclopedia of World Regional Geology, 1: 456-465, Reinhold Book Co.*
- IGARZÁBAL, A.P., 1981.  
El sistema glaciolítico de la cuenca superior del río Juramento, provincia de Salta.  
*Actas del 8º Congreso Geológico Argentino, IV:167-183*.
- LEOPOLD, L.B. Y WOLMAN, M.G., 1957.  
River Channel patterns: braided, meandering and straight.  
*U. S. Geological Survey Professional Paper, 282B, 39-85*.

- NADIR, A. Y CHAFATINOS, T., 1990.  
Los suelos del NOA (Salta y Jujuy).  
I y II, *Universidad Nacional de Salta. Salta.*
- RUST, B.R., 1978.  
A classification of alluvial channel systems.  
*In: Miall, A.D (Ed.): Fluvial Sedimentology. Can. Soc. Pet. Geol. Mem, 5, 187-198*
- SALFITY, J.A., 1980.  
Estratigrafía de la Formación Lecho (Cretácico) en la cuenca andina del norte argentino.  
*Facultad de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Salta. Tesis de Doctorado, 91 p.*
- SALFITY, J.A., BRANDAM, E.M., MONALDI, C.R. Y GALLARDO, E.F., 1984.  
Tectónica compresiva cuaternaria en la cordillera Oriental Argentina, latitud de Tilcara (Jujuy).  
*Actas del Noveno Congreso Geológico Argentino, II: 427-434.*
- SEGEMAR-ITGE, 1998.  
Estudio geológico integrado de la Quebrada de Humahuaca. Geología Regional y Geomorfología.  
*Anales 30. Buenos Aires.*
- SOLER, R.D., 1996.  
Geohidrología de la cuenca del Río Yacones, Departamento La Caldera, Provincia de Salta, República Argentina.  
*Trabajo Final de Licenciatura. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires. Inédito.*
- SOLER, R.D., (EN PREP.).  
Geología ambiental de la cuenca del río Purmamarca (Jujuy - Argentina).  
*Tesis Doctoral. Universidad Nacional de Salta, Facultad de Ciencias Naturales.*
- SOLER, R.D. Y MAY, J.H., 2000.  
Debris flows en la quebrada de Purmamarca (Jujuy - Argentina): mecanismos de generación y riesgos geológicos.  
*Actas del II Taller de Sedimentología y Medio Ambiente, pp. 57-58, Resúmenes. Buenos Aires*
- TCHILINGUIRIAN, P. Y PEREYRA, F.X., 2001.  
Geomorfología del sector Salinas Grandes-Quebrada de Humahuaca, provincia de Jujuy.  
*Revista de la Asociación Geológica Argentina, 56(1): 3-15. Buenos Aires.*
- THORNTHWAITE, C.W., 1948.  
An approach toward a rational classification of climate.  
*Geographical Review 28(1) : 55-94.*
- TURNER, J.C.M. Y MON, R., 1979.  
Cordillera Oriental.  
*En: Turner, J.M.C. (Ed.) Segundo Simposio de Geología Regional Argentina, I, pp. 57-94. Academia Nacional de Ciencias. Córdoba.*





# Estudio de sistematización de las cuencas de ríos y arroyos del faldeo oriental de la sierra de San Javier

## Importancia de la geología, geotecnia, hidrología y sismicidad Provincia de Tucumán, República Argentina

Suayter, Luis - Sirombra, Martín - Torres de Plaza, Marta - Benítez de Parra, Lidia - Toscano, Victoria -  
Fernández, Rubén - López García, María Delfina

### Resumen

*La expansión demográfica de la ciudad de San Miguel de Tucumán, hacia el Oeste (Departamento Yerba Buena), y hacia el Noroeste (Municipio de las Talitas y Tafí Viejo), y la ampliación de la frontera agrícola y sustitución de áreas cultivadas con cañas de azúcar por citrus, ha provocado, junto a la incontrolada explotación de áridos de los ríos y arroyos pedemontanos de la Sierra de San Javier, un drástico incremento de la escorrentía superficial y del aporte de materiales sólidos, potenciando la vulnerabilidad geológica de la ciudad de San Miguel de Tucumán a las descargas aluvionales de la mencionada Sierra.*

*Ante tan grave situación, se ha ingresado en una instancia crítica que obliga a un replanteo global de la situación con miras a corregir el acentuado deterioro de la infraestructura de desagües, y la incorporación de nuevas obras hidráulicas destinadas a preservar las existentes.*

*Se propone: La revisión y actualización del Plan Director de Desagües Pluviales realizado por la empresa Decio Constanzo en la década de 1960.*

*La determinación y priorización de las áreas críticas de erosión en las cuencas para lo cual se considerarán los aspectos hidrológicos, topográficos, geológicos, vegetación y socioeconómicos en base a la información existente y a generar.*

*Una vez obtenido un diagnóstico objetivo del problema, se realizarán proyectos ejecutivos de obras de protección, a corto, mediano y largo plazo.*

*Es prioritario:*

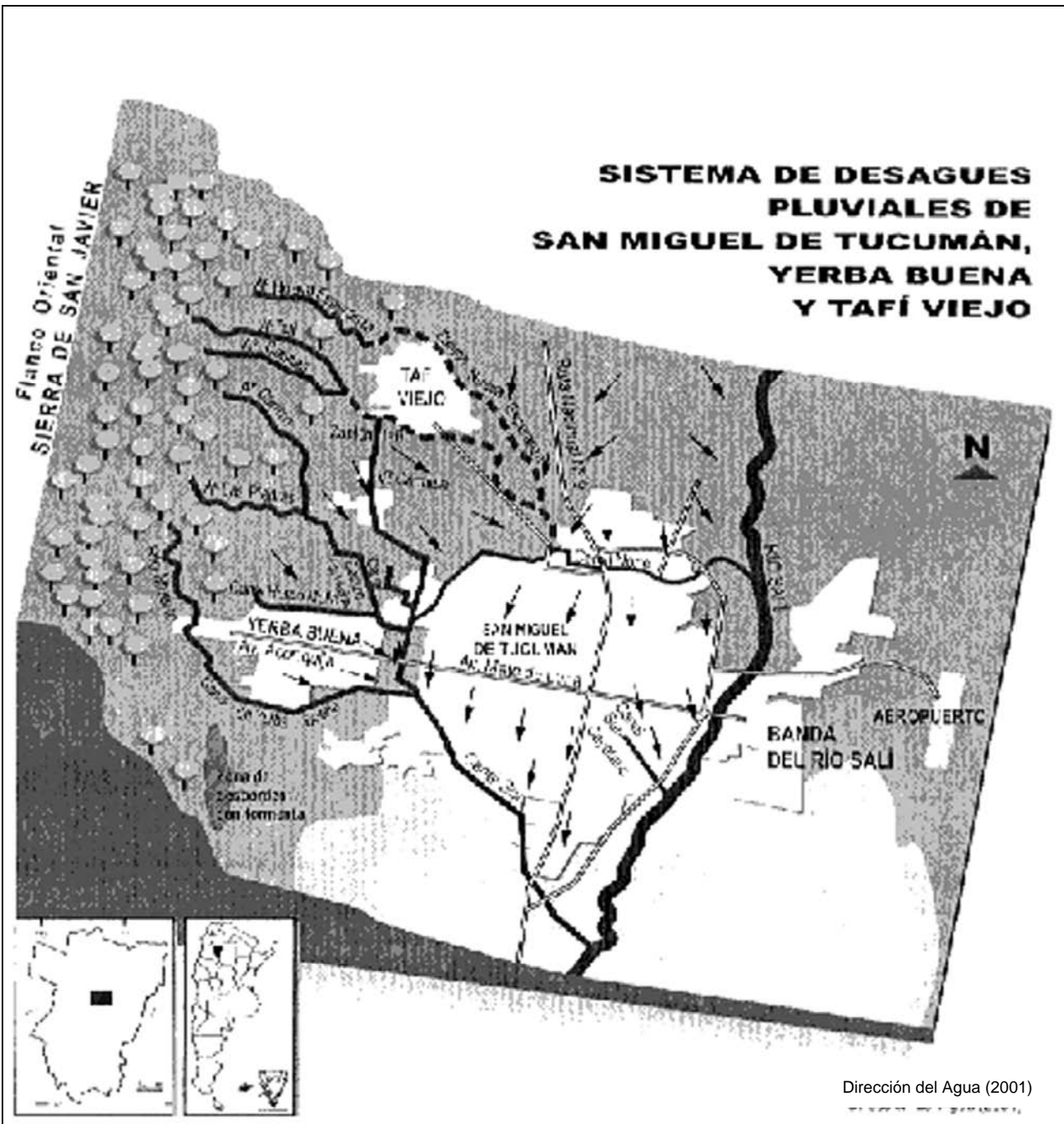
- 1. Preservar las obras construidas del avance del proceso destructivo.*
- 2. Limitar al máximo el acceso de los materiales sólidos a los canales de desagües.*
- 3. Redimensionar las obras denominadas "Canal Norte y Canal Sur" adecuándolas a las nuevas exigencias del sistema General de Desagües que se defina para el futuro.*
- 4. Redimensionar: el Canal "Cainzo - Las Piedras" en función de las necesidades de descargas resultantes de los nuevos estudios, particularmente las asociadas a la sistematización de las cuencas de aporte a ese canal.*
- 5. La unión o confluencia del Canal mencionado en el punto 4 con el "Canal San José". Como así también la confluencia del Canal "Yerba Buena" con el "Canal Sur".*

Entregado: 03 de Agosto de 2001 ■ Aceptado: 29 de Octubre de 2001

Instituto de Riesgo Geológico y Sistematización Territorial.

Facultad de Ciencias Naturales  
e Instituto Miguel Lillo Universidad Nacional de Tucumán.  
Miguel Lillo 205 - (4000) Tucumán - República Argentina.  
rosasuayter@ciudad.com.ar  
matcat@csnat.unt.edu.ar

FIGURA 1. SISTEMA DE DESAGÜES PLUVIALES DE SAN MIGUEL DE TUCUMÁN, YERBA BUENA Y TAFÍ VIEJO



## 1. INTRODUCCIÓN

La expansión demográfica de la ciudad de San Miguel de Tucumán, hacia el Oeste (Departamento Yerba Buena), y hacia el Noroeste (Municipio de las Talitas y Tafí Viejo), ha provocado con la ampliación de la frontera agrícola, la sustitución de las áreas con cañas de azúcar por citrus y la incontrolada explotación de los áridos de los ríos y arroyos pedemontanos de la Sierra de San Javier, un drástico incremento de la escorrentía superficial y del aporte de los materiales sólidos, potenciado por la vulnerabilidad geológica de la Ciudad de San Miguel de Tucumán a las descargas de aluviones de la mencionada Sierra.

No obstante que las inversiones históricas de la provincia en su red de drenaje pluvial, tanto en secciones de los conductos

como en la calidad constructiva, han sido adecuadas, oportunas y con visión de futuro, durante las tres últimas décadas las obras complementarias relacionadas con el mantenimiento, optimización y funcionamiento de esta red, no se realizaron en base a un buen diagnóstico ni con planificaciones a corto, mediano y largo plazo.

Consecuentemente, se ha ingresado desafortunadamente en una instancia crítica con graves consecuencias para la comunidad, que obliga de manera inmediata a realizar un replanteo global de la situación, con el fin de corregir el acentuado deterioro de la infraestructura de desagües mediante el diseño y la futura implementación de nuevas obras hidráulicas. Destinadas a preservar las existentes y a modificar los impactos negativos

originados en la manifiesta degradación del medio, en el orden social y ambiental.

Se puede observar en (Fig. 1) el Sistema de desagües pluviales de San Miguel de Tucumán, Yerba Buena y Tañí Viejo.

Frente al grave y realista panorama, sintéticamente planteado, surge como imprescindible desarrollar un Programa de Acciones Inmediatas, de tipo estructurales y no estructurales, según se propone a continuación:

## 2. ACCIONES

1. Recopilar, revisar, ordenar, jerarquizar y sintetizar la información existente.
2. Preservar las obras construidas del avance del proceso destructivo.
3. Limitar al máximo el acceso de los materiales sólidos a los canales de desagües, que se generan en las cuencas de aporte, faldeo oriental de la Sierra de San Javier.
4. Orientar las acciones estructurales a la reducción del grave riesgo geológico en las áreas rurales y urbanas localizadas hacia el oeste de camino del Perú y de la avenida Solano Vera.
5. Redimensionar las obras denominadas "Canal Norte" y "Canal Sur" adecuándolas a las nuevas exigencias del sistema general de desagües existente o del que se defina para el futuro como resultado de los nuevos estudios a realizar.
6. Analizar la factibilidad de carga del canal Yerba Buena en el arroyo El Manantial, el cual fue siempre su desagüe natural, modificado con las obras existentes .
7. Redimensionar: el "Canal Cainzo - Las Piedras" en función de las necesidades resultantes de los nuevos estudios,

particularmente las asociadas a la sistematización de las cuencas de aporte a ese canal; y el nudo de unión o confluencia del canal "Yerba Buena" con el "Canal Sur", compatibilizándola con la resultante del punto 5.

8. Desarrollar la sistematización de las cuencas de los siguientes cursos de agua de norte a Sur: Nueva Esperanza, El Cochucal, Tañí, Las Cañitas, Cainzo, Las piedras, Anta Yacu, Las Cañas, Doña Hortensia, Aguas Blancas, Frontino, El Parque, Río Muerto.

## 3. ESTUDIO DE CASO: CANAL CAINZO - LAS PIEDRAS - CANAL YERBA BUENA- CANAL SUR

### Modificación de Obra

Según el plano de ubicación estos canales conducen el agua hacia el sur, produciéndose dos ingresos conflictivos del desagüe en una amplia zona urbana, que incluye al canal Yerba Buena con su nudo de unión con el canal sur, sobrepasando el agua la sección de escurrimiento de los mismos, inundando la zona de servicio en época de fuertes precipitaciones en un espacio corto de tiempo.

El conflicto se agrava cuando por los canales el agua transporta vegetales de grandes fustes y sobre todo basura, que tapan la luz de las alcantarillas y los puentes del sector sur del Gran San Miguel de Tucumán.

El agua al rebalsar la capacidad de calzada, sube por el sector del espacio verde de la margen de los canales y al llegar a su berma, en parte ingresa al interior del mismo, pero al encontrarse con el espacio de losa de la berma, de 0,10m, se genera paulatinamente una erosión lineal, paralela ésta que ocasiona el ingreso de agua por detrás de la losa de talud.

FOTO 1



## FOTO 2



Este ingreso de agua, según las frecuencias de las lluvias, produce erosión, ahuecamiento y descalce que altera las condiciones de sollicitación estática del elemento. De una sollicitación a comprensión simple, pasos a una flexocompresión, para los cuales la losa no está preparada, pues su armadura solo distribuye tensiones de comprensión, y tensiones térmicas de dilatación o retracción.

La flexocompresión produce fisuramiento localizado donde las condiciones de sustentación cambiaron, y en consecuencia la destrucción de la losa es en el corto plazo. Pueden ocurrir durante el pico de la crecida empujes localizados por detrás de la losa, precisamente donde se origina el ahuecamiento, lo que explicaría el levantamiento y combado de los paños. Se evidencia que la rotura se agudiza cuando el agua que ingresa por detrás de la berma se suma a la corriente de agua que conduce el propio canal, acelerando así el proceso de destrucción.

Si una fracción de losa o un paño completo es desalojado por el agua, se genera un frente de autodestrucción, los cuales pueden ser tantos como roturas se hayan producido, y en esta situación arribamos al riesgo de máxima destrucción posible, el levantamiento simultáneo de la losa por las aguas conducidas por el propio canal. Ver fotografías adjuntas (Foto 1, Foto 2).

El proceso de infiltración destructiva no es evidente y se hace visible cuando se observan grietas en el tercio inferior de las losas, o sea cuando el daño está consumado. Estas pequeñas infiltraciones determinan, si no se corrigen los factores que las favorecen, la autodestrucción de los canales en el largo plazo o

de una forma tan repentina como desconcertante, con frentes de destrucción múltiples y simultáneos.

Los costos de mantenimiento son pequeños en relación con los daños que evitan, y su urgencia y prioridad no son evidentes sino se comprende el fenómeno descrito, que guarda directa relación con la intensidad de las lluvias y su cumplimiento por el imperio de la Ley de la Gravedad.

El Canal "Yerba Buena" está prácticamente destruido y el costo de su reparación es de 1.000.000 de dólares, de acuerdo al llamado a Licitación por parte de la Dirección del Agua de la provincia de Tucumán.

Por lo tanto, para la reformulación de los diseños estructurales de los canales cuya capacidad de evacuación del escurrimiento ha sido superada, se hace necesario reformular la capacidad de todo el sistema.

Se propone el siguiente plan de trabajo, en donde se introducen parámetros que a nuestro entender son vitales para la reformulación integral de las obras, como ser en primer lugar la sistematización de los ríos y arroyos del faldeo oriental de la sierra de San Javier, teniendo en cuenta además de los estudios hidrológicos, aspectos geotécnicos y sísmicos, las fallas presuntamente activas que controlan la neotectónica de la Sierra de San Javier.

De acuerdo a nuestros estudios, el sistema colapsó en el tramo del canal sur que va desde la calle San Juan a la Ruta 301 (ex 38) y la rotura no se debió a una lluvia extraordinaria, sino a la conjunción de factores naturales y antrópicos.

## Descripción de las Tareas

### A) *Hidrología*

En relación con los caudales líquidos de aplicación a los Estudios y proyectos de obras complementarias para preservar la infraestructura del desagüe de Tucumán.

Determinación de las características generales y parámetros hidrológicos de las Cuenca.  
 Identificación de la subcuenca de aporte.  
 Distribución de la red hidrológica de los afluentes principales.  
 Identificación de potenciales lugares naturales para construir endicamientos.  
 Identificación de potenciales lugares adecuados para el emplazamiento de presas para embalse de regulación de crecientes.  
 Preparación de las curvas de áreas volúmenes de los potenciales vasos.  
 Régimen de caudales líquidos.  
 Análisis de caudales estacionales.  
 Relleno de registros. Transformación de la precipitación en escorrentía.  
 Desarrollo de un esquema hidrológico con identificación de los nudos y caudales.  
 Estudio de crecidas.  
 Referencias sobre crecidas históricas.  
 Crecidas de diseño de aplicación de obras viales.  
 Selección de la crecida para el diseño de las obras construidas.  
 Origen espacial de las crecidas.  
 Relaciones entre caudal pico, volumen y duración de las crecidas.  
 Velocidades de escurrimiento.  
 Análisis de las crecidas mediante el uso de hidrogramas adimensionales.  
 Crecidas máxima probables.

En relación con los aportes sólidos.

Aportes de sólidos en general originado en las Cuenca.  
 Material de arrastre.  
 Material en suspensión.  
 Materiales flotantes.  
 Características cualitativas y cuantitativas de los aportes sólidos.  
 Análisis de la generación del transporte sólido.  
 Análisis de la evolución de márgenes y lechos de los ríos.  
 Variación estacional de la carga de sólidos en los ríos de las cuencas.  
 Análisis de la evolución de la morfología de los cauces.  
 Análisis hidrológicos de los lugares de emplazamiento de las obras.  
 Análisis de tasas de Sedimentación y transporte sólido.

### B) *Geología*

Preparación de los planos geológicos en formato digital en escala 1:20.000 (con base satelital), 1:1.000 (con apoyo terrestre) para graficar los resultados de los siguientes estudios:  
 Identificación de las unidades morfoestructurales dominantes.  
 Identificación de los rasgos tectónicos y alineamiento principales.  
 Localización de las condiciones litológicas dominantes.  
 Mapeo de las áreas geológicas más sensibles a la degradación natural.

Mapeo de las áreas geológicas más sensibles a la degradación antrópica.

Preparación de los planos geológicos de los emplazamientos de la obra de ingeniería.

Mapeo de las condiciones geológicas correspondientes yacimientos y canteras para materiales para obras.

### C) *Geomorfología*

Preparación de los planos geomorfológicos en formato digital en escala 1:20.000 (base satelital), 1:10.000 (con base fotográfica), y 1:1.000 (con apoyo terrestre) para graficar los resultados de los siguientes estudios:

Identificación de las unidades geomorfológicas dominantes.

Identificación de las zonas de riesgo de erosión.

Mapeo de las áreas geomorfológicas sujetas a la degradación natural.

Mapeo de las áreas geomorfológicas sometidas a degradación antrópica.

Preparación de los planos geomorfológicos del estado actual de los ambientes adyacentes a las obras construidas en explotación.

Preparación de los planos geomorfológicos del estado actual de las áreas a emplear para emplazar los reservorios de regulación crecientes.

Identificación de los diferentes tipos de erosión hídrica dominantes.

Mapeo de los diferentes tipos de formaciones forestales.

Se realizará un estudio de calidad de ecosistemas ribereños en las márgenes de los arroyos, relacionadas con el proceso de desborde e inundación, aplicando un índice muy sencillo denominado QBR.

### D) *Sismicidad*

Preparación de un mapa de zonificación sísmica del área de Estudio:

Se realizará una prolija revisión del estado de las obras existentes y en construcción.

Las áreas se armonizarán con los estudios geológicos y geomorfológicos.

Las zonas inestables identificadas en el ámbito del área de estudio serán mapeadas, fotografiadas y señalizadas en el terreno.

Se revisarán los archivos de sismos significativos y el comportamiento de las fallas activas que comprometen las obras en todo ámbito del área de Estudio.

### E) *Hidrogeología*

Se identificarán los ambientes hidrogeológicos y se prepararán los planos en formato digital en las mismas escalas de los planos geológicos.

Se identificarán los ambientes hidrogeológicos contaminados. Se estudiará el recurso hídrico subterráneo en relación con el uso y la infraestructura.

Se investigará el régimen de recarga subterránea freática en relación con las principales precipitaciones.

Se localizarán y mapearán las zonas de alumbramientos subterráneos.

Se analizarán las zonas de inestabilidad asociadas a los alumbramientos, la interrelación entre agua subterránea, la escorrentía fluvial y las condiciones hidrogeológicas de los macizos rocosos a afectar con las Obras.

Con igual objeto se realizará un análisis de las condiciones hidrogeológicas de los macizos rocosos en lo que hace a permeabilidad.

F) *Geotecnia*

Preparación de los mapas de localización de yacimientos de materiales para las obras, en escala 1:10.000; mapas de canteras de materiales para las obras en escala 1:10.000; mapas del impacto que la explotación de los yacimientos y canteras provocará en los recursos hídricos; mapas de riesgo de erosión correspondientes a la explotación de los yacimientos y canteras y mapas de aptitud Geomecánicas de materiales de yacimientos y cantera a emplear en la fundación y construcción de las obras.

Preparación de las planillas con los datos técnicos de los materiales correspondientes que la explotación de yacimientos y canteras provocará en los recursos hídricos.

Identificación, localización, toma de muestras (mediante perforaciones y otros métodos de prospección), ensayos de laboratorios e informes relativos a los materiales para fundación y construcción de las obras. Análisis del RQD de los macizos rocosos.

Se estima en doce meses el tiempo necesario para la realización del diagnóstico previsto en este estudio.

#### 4. CONCLUSIONES

En base a los estudios hidrológicos, geológicos, geomorfológicos, geotécnicos y sísmico, juntamente con otros de carácter complementario se podrán elaborar los proyectos ejecutivos para la reformulación de los desagües periféricos del gran San Miguel de Tucumán, a fin de controlar las inundaciones que son actualmente una constante, puesto que a medida que la ciudad crece, va impermeabilizando el suelo con el pavimento y ante una lluvia ordinaria deriva más agua a los canales que hace 20 años atrás.

Por lo tanto el sistema de protección de la ciudad es insuficiente y las previsiones originales (realizadas en la década de 1960) han sido hoy superadas, esto sumado al mal civismo de la población, que arroja residuos de todo tipo a los canales de desagüe.

#### 5. TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

DECIO CONSTANZO, A. 1960.

Plan director de los desagües de San Miguel de Tucumán.  
*Dirección Provincial del Agua. Provincia de Tucumán. Inédito.*

NIEDERLE, G. 2001.

Proyecto de reconstrucción del Canal San José.  
*Dirección Provincial del Agua. Provincia de Tucumán. Inédito.*

ROLDÁN A. & SUAYTER L. 1999.

Estudio integral del flanco oriental de la Sierra de San Javier.  
*Dirección Provincial del Agua. Provincia de Tucumán. Inédito.*

SUAYTER ET AL. 1999.

Estudios y proyectos integrados de obras complementarias para preservar la infraestructura de los desagües de la ciudad de San Miguel de Tucumán. Estudio de sistematización de la cuenca de los ríos y arroyos del faldeo oriental de la Sierra de San Javier.

*Resúmenes IV Jornadas de comunicaciones internas de la Facultad de Ciencias Naturales e Instituto Miguel Lillo. Instituto de Riesgo Geológico y Sistematización Territorial.*

SUAYTER, L. 1999.

Un estudio de los factores que provocan el desborde del río Famaillá.  
*Resúmenes de las IV Jornadas de la Facultad de Ciencias naturales e I.M.L - Instituto de Riesgo geológico y Sistematización Territorial.*

# INDICE

Trabajo	Autor/es	Pág
Editorial		
Instrucciones para autores		
Geología, estructura y caracterización geotécnica del sector de cierre y embalse de la presa Río Grande Provincia de San Luis, Argentina	<i>Cuesta, Rubén O. Massabie, Armando C.</i>	1
El interés público de la Geología	<i>Di Salvo, Carlos Alberto</i>	11
La geología, las ciudades y los proyectos urbanos Un abordaje histórico y presente	<i>Di Salvo, Carlos Alberto Rimoldi, Horacio Víctor</i>	15
Deslizamiento de ladera sobre la Ruta Provincial N° 9 Localidad de Nogolí - Provincia de San Luis	<i>Gardini, Carlos E. - Sales, Daniel A. Ricci, Walter R.</i>	23
Deslizamientos y rasgos asociados producidos en el año 2001 en un sector de las sierras septentrionales Provincia de Buenos Aires	<i>Gentile, Rodolfo Osvaldo Villalba, Horacio Alejo</i>	31
Cartografía de peligrosidad geológica en la zona de San Martín de los Andes, Neuquén	<i>Lara, Jorge - Pereyra, Fernando X.</i>	45
Susceptibilidad de agregados silíceos a la degradación frente a la reacción álcali - sílice	<i>Maiza, Pedro J. - Marfil, Silvina A.</i>	61
Caracterización geoambiental de los ríos de la ciudad de Salta y su influencia en el Espacio Geológico Urbano (EGU), Argentina	<i>Marcuzzi, Jorge J. - Rojas, Luis Vera Sanchez, Hugo - Gutierrez, Miguel</i>	65
Características geológicas y geotécnicas de la vertiente oriental andina en la provincia de Tucumán	<i>Mon, Ricardo - Eremchuk, Jorge E. Minetti, Juan L.</i>	73
Mejoramiento y búsqueda de nuevas aplicaciones en Materiales Regionales	<i>Muñoz, Luis - Torrán, Eduardo Treppo, Oscar - Schalamuk, Isidoro</i>	89
Las redes hidrográficas como modelos de reconocimiento en aerofotointerpretación	<i>Popolizio, Eliseo</i>	97
Estimación de la recarga de las aguas subterráneas a partir de la elaboración y análisis de mapas de suelo	<i>Rivas, Raúl - Varni, Marcelo Entraigas, Ilda - Usunoff, Eduardo</i>	105
Características hidrológicas de Bahía del Diablo Isla Vega, Península Antártica	<i>Silva Busso, A. - De Angelis, H. Skvarca, P. - Ermolin, E.</i>	113
Geomorfología de la cuenca del Río Purmamarca Jujuy - Argentina	<i>Soler, Ramiro Daniel</i>	121
Estudio de sistematización de las cuencas de ríos y arroyos del faldeo oriental de la sierra de San Javier Importancia de la geología, geotecnia, hidrología y sismicidad Provincia de Tucumán República Argentina	<i>Suayter, Luis - Sirombra, Martín Torres de Plaza, Marta Benítez de Parra, Lidia - Toscano, Victoria Fernández, Rubén López García, María Delfina</i>	135



## **sinergia 2004**

GEOTECNIA | PRESAS | GEOLOGIA

*18 al 23 de Octubre de 2004*

*Córdoba - Argentina*

*sinergia2004@yahoo.com.ar*



---

A los fines de la impresión del presente volumen se ha recibido  
apoyo económico de las siguientes empresas y asociados:

LIC. JORGE WEXLER

MINERA TEA

Copyright 2002 by Editorial ASAGAI  
Maipú 645 - 1<sup>er</sup> piso - 1006 Buenos Aires  
Printed in Argentina

PRODUCCIÓN GRÁFICA Y EDITORIAL:  
*Callerio y Asociados*  
(0351) 4245924  
e-mail: [lcallerio@agora.com.ar](mailto:lcallerio@agora.com.ar)  
Córdoba

Se terminó de imprimir en Diciembre de 2003  
en Sistemas de Impresión Digital  
de Callerio y Asociados  
Córdoba - Argentina