

## GEOMORFOLOGÍA DE LA CUENCA DEL ARROYO DEL MEDIO

Juan M.G. RACCA



Boletín  
del Instituto de  
Fisiografía y Geología

Racca J.M.G., 2010. Geomorfología de la Cuenca del Arroyo del Medio. *Boletín del Instituto de Fisiografía y Geología* 72-75: 13-42. Rosario, 20-02-2010. ISSN 1666-115X.

**Resumen.-** Se presenta el estudio de la geomorfología de un área que incluye ajustadamente a la cuenca del Arroyo del Medio y que comprende parte del sur de la provincia de Santa Fe y un sector del norte de la provincia de Buenos Aires, en la República Argentina. Los niveles de detalle morfológico tratados corresponden al regional y al de escala intermedia, en concordancia con las características de los documentos que proporcionaron la información de base para la realización del estudio: una imagen satelitaria de baja resolución espacial para la investigación a nivel regional y cartas topográficas para el nivel de escala intermedia.

Se contemplaron los aspectos correspondientes a la morfogénesis, morfocronología, morfografía y morfometría, produciendo modelos cualitativos y cuantitativos con propósitos demostrativos y explicativos. Además se construyó un modelo digital de elevaciones del terreno del área y sus derivados de pendientes, que proporcionaron la base para el estudio de la mayoría de los aspectos tratados. Se utilizaron programas informáticos de desarrollo propio para la obtención de muchos de los modelos y, en paralelo con el presente trabajo, se elaboró otro programa para realizar el análisis hipsométrico, extraer la frecuencia altimétrica y construir la curva de pendientes medias de área, operando sobre los modelos digitales de elevaciones y de características de las pendientes.

**Palabras clave:** Geomorfología, Arroyo del Medio, llanura pampeana, Neotectónica..

**Abstract.-** *Geomorphology of the Arroyo del Medio Basin.* A geomorphologic study of an area which includes tightly the Arroyo del Medio Basin, comprising part of the southern Santa Fe Province and a sector of the northern Buenos Aires Province, Argentine, is presented. The levels of morphologic adopted correspond to the regional and intermediate scales, in accordance with the documents which supplied the base information for the study: a low spatial resolution satellite image for the research at regional level and topographic sheets for the intermediate scale level.

Aspects of the morphogenesis, morphochronology, morphography and morphometry were considered for generation of qualitative and quantitative models with demonstrative and explicative purposes. Furthermore, a digital terrain elevation model of the area and its derivate digital slopes models were elaborated, which supply the base for the study of the major part of the aspects studied. Computer programs of own development were used to obtain many of the models and, in parallel with the present work, another program was elaborated for the hypsometric analysis, extraction of the altimetric frequency and to obtain the mean slopes curve of the area, operating on the digital models of elevations and slopes characteristics.

**Key-words:** Geomorphology, Arroyo del Medio, pampean plain, Neotectonics.

Juan Manuel G. Racca [racca@fceia.unr.edu.ar]: *Instituto de Fisiografía y Geología & Departamento de Ciencias Geológicas, FCEIA, Universidad Nacional de Rosario, Pellegrini 250, 2000 Rosario, Argentina.*

Recibido (versión actualizada): 10/08/2009; aceptado: 16/12/2009.

## INTRODUCCIÓN

Se presenta en este trabajo la síntesis de algunos temas investigados por el autor durante el año 2000 y principios de 2001 en el marco de la ejecución de un trabajo de mayor envergadura que se está llevando a cabo en el Instituto de Fisiografía y Geología (Universidad Nacional de Rosario) y que involucra la misma área, con distintos niveles de detalle. Dicho trabajo se relaciona -además de su propósito inicial de estudio con el Programa de Fomento a la Investigación Científica y Tecnológica- con un convenio celebrado con la Comisión Nacional de Actividades Espaciales de Argentina para comprobar la bondad -para estudios de este tipo- de las imágenes registradas por dos de los sensores portados a bordo del satélite SAC-C (proyecto *Utilización de datos registrados por el satélite SAC-C -cámaras MMRS y HRTC- para la investigación en geomorfología ambiental vinculada con el estudio y manejo de los recursos hídricos y con el uso del suelo en la llanura pampeana*, dirigido por el autor) y con la implementación de un sistema de información geográfica del área. Atendiendo a estos últimos dos propósitos, se han utilizado y desarrollado técnicas y herramientas geoinformáticas, algunas de las cuales se mencionan por haber sido empleadas en los análisis cuyos resultados se incluyen, en especial las de desarrollo propio que permitieron la construcción del modelo digital de elevaciones del terreno y de sus derivados.

El área estudiada -que incluye ajustadamente a la cuenca del Arroyo del Medio- está localizada en el centro-este de la República Argentina y comprende parte del sur de la provincia de Santa Fe y un sector del norte de la provincia de Buenos Aires (Fig. 1). Los niveles de detalle morfológico

utilizados en esta presentación corresponden al regional y al de escala intermedia: "landform region" y "landform system" (Thomas 1969), "land region" y "land system" (Brink et al. 1966), "morpho-macrochore" y "morpho-mesochore" (Gellert 1972), "tercera magnitud" y "cuarta magnitud" (Cailleux & Tricart 1956). Dichos niveles están en concordancia con las características de los documentos que proporcionaron la información de base para la realización del estudio: la imagen satelitaria (nivel regional) y las cartas topográficas (escala intermedia). La imagen satelitaria con que se contó es una simulación de escena del sensor MMRS transportado por el satélite SAC-C, realizada en base a un producto real Landsat TM -registrado el 28 de enero de 1998- en las tres bandas del espectro visible y en dos del infrarrojo reflejado, con una resolución espacial de 180 m, entregada por la CONAE después de haber sido escogida por el autor de entre las disponibles, atendiendo a la circunstancia temporal del fenómeno de "el Niño" acaecido durante los años 1997-1998. Esta imagen -en formato digital- permitió obtener información relevante acerca de la hidrología superficial y de su relación con los rasgos morfológicos del área.

Las cartas topográficas relevadas por el Instituto Geográfico Militar y utilizadas en el estudio -en especial en la construcción del modelo digital de elevaciones- poseen escala 1:50,000 y equidistancia entre curvas de nivel de 2.50 m. Corresponden todas a la hoja cartográfica matriz en escala 1:500,000 "3360 - ROSARIO" del Instituto Geográfico Militar; el sector de la misma que incluye la cuenca del Arroyo del Medio con sus divisorias de aguas trazadas en rojo, se presenta en la Fig. 2. La Fig. 3 muestra la enumeración y posición relativa de las cartas en escala 1:50,000 que fueron usadas.

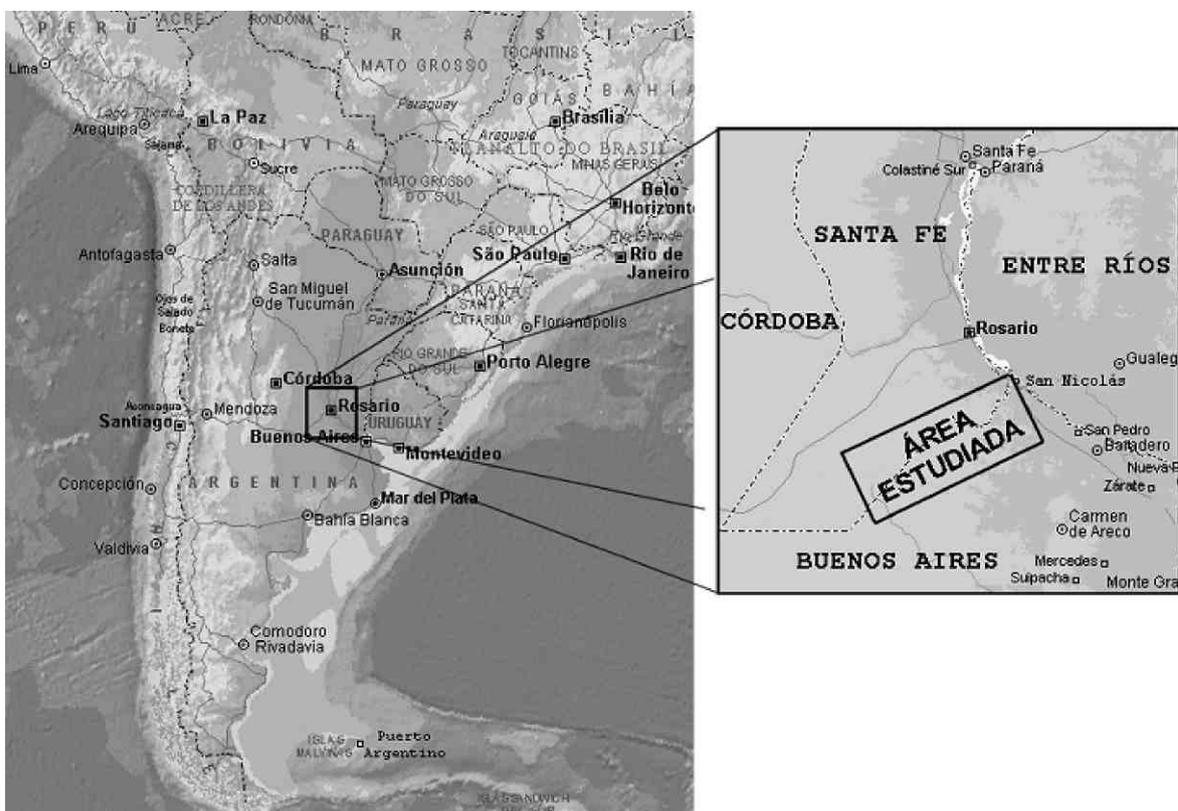


Figura 1. Localización del área estudiada.

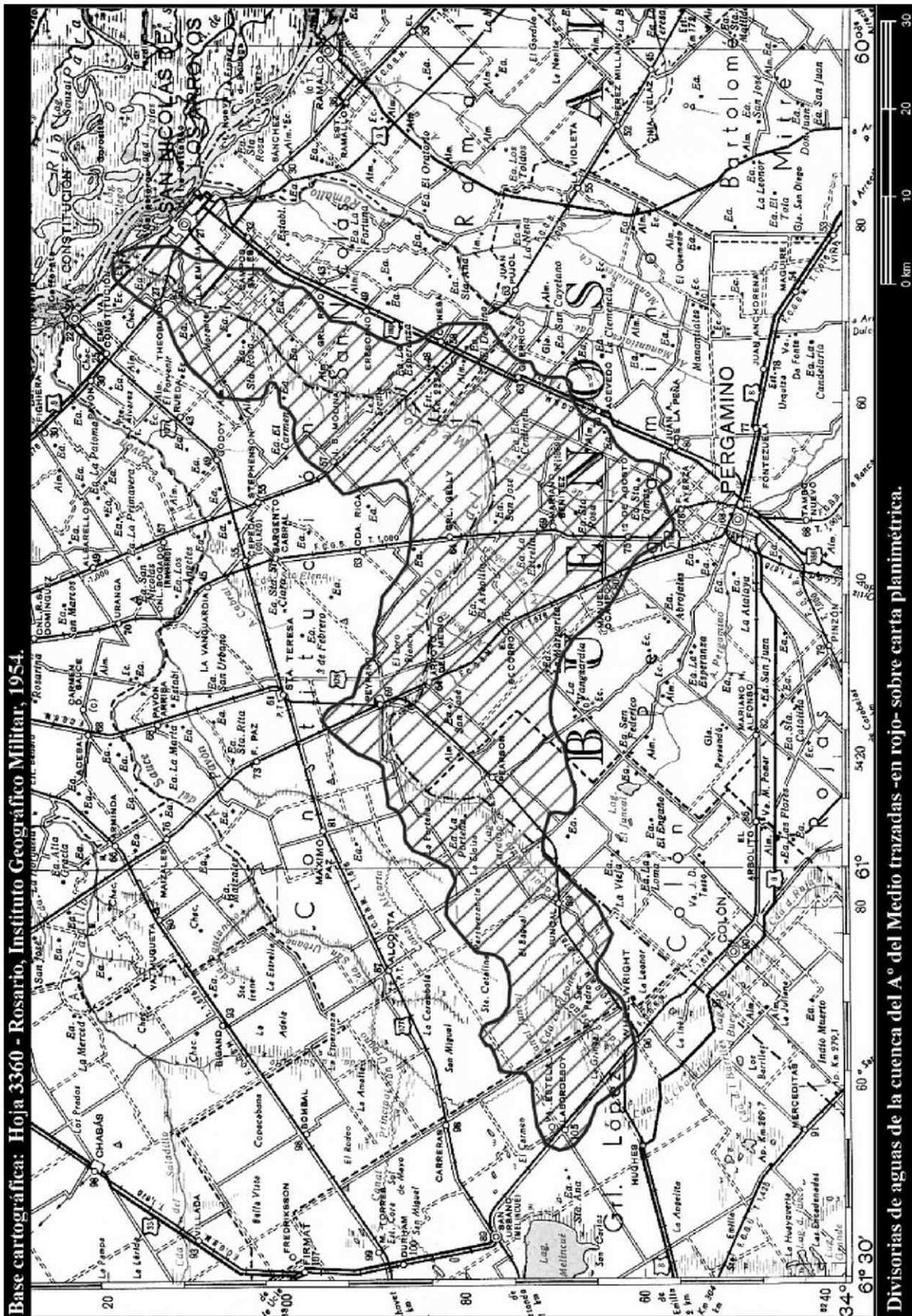


Figura 2. Parte de la hoja cartográfica del I.G.M. en escala 1:500.000 "ROSARIO" que incluye a la cuenca del A° del Medio.

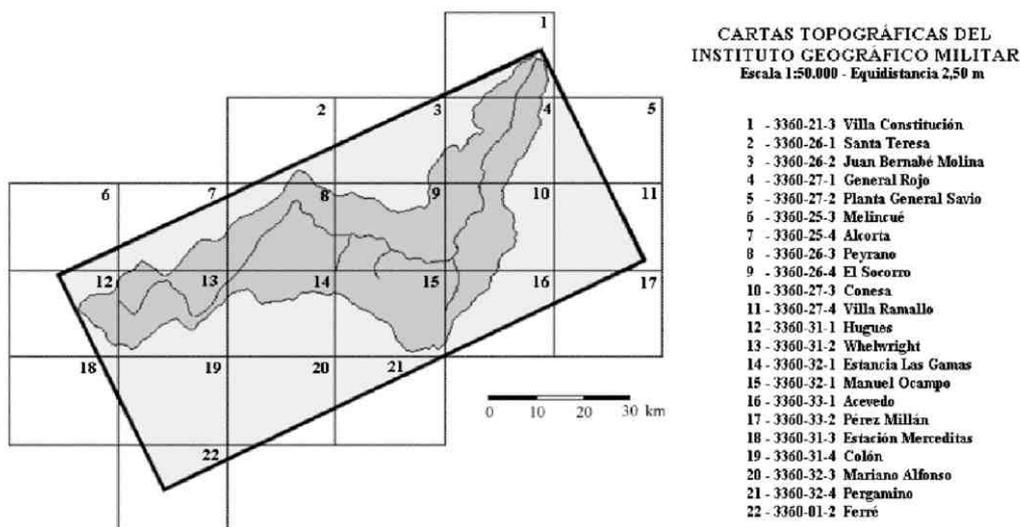


Figura 3. Base cartográfica para la confección del modelo digital de elevaciones.

### MORFOGÉNESIS Y MORFOCRONOLOGÍA

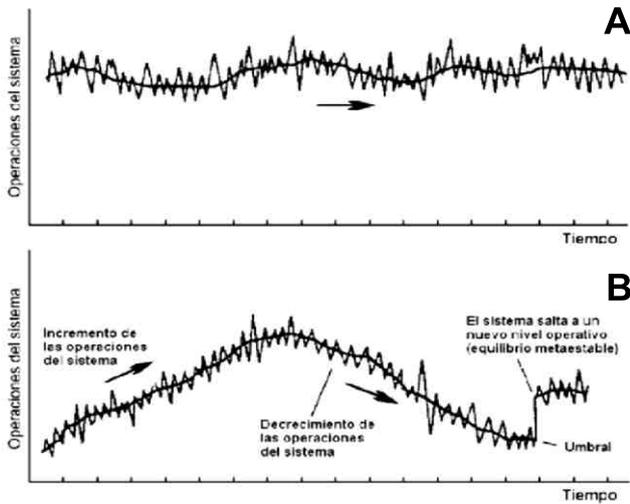
Las formas del relieve de la superficie terrestre son el producto de la interacción entre los medios bioclimáticos y las condiciones litoestructurales a través del tiempo. Para instalar al sistema geomorfológico en el contexto de la realidad (el universo), es conveniente considerar que el mismo está controlado por tres macrosistemas: el climático, el geodinámico y el antrópico (Popolizio 1983), aunque el nivel de detalle de esta presentación hace que el bioclimático y el antrópico se vean confundidos en uno solo. La mayoría de los geomorfólogos prefieren el modelo de equilibrio dinámico para el sistema geomórfico (Fig. 4B), que enfatiza el balance entre fuerzas, formas y procesos. Este balance actúa entre el ascenso tectónico de áreas de la superficie (morfotectónica) y su reducción por medio de la denudación (erosión en sentido amplio realizada por los procesos gradacionales). Este modelo supone variaciones en la tendencia de largo plazo, con incrementos y decrecimientos en las operaciones del sistema. No obstante, existe otro modelo de equilibrio para los sistemas, denominado de estado estable ('steady state'), que puede llegar a ser tomado en cuenta en ciertos tipos de evoluciones (Fig. 4A) y en el que las operaciones del sistema tienen una tendencia de largo plazo sin grandes variaciones.

El paisaje geomorfológico es un sistema abierto, con ingresos altamente variables de materia y energía. El ascenso tectónico crea la energía potencial de posición sobre el nivel de base y por lo tanto un desequilibrio entre relieve y energía. La energía radiante que proviene del sol se transforma en calor e ingresa al macrosistema bioclimático transformándose a su vez en energía cinética -movimiento mecánico de materia que produce, entre otros efectos, el ciclo hidrológico y la circulación atmosférica, que proporcionan agentes geomórficos físicos- y en cierta proporción en energía química, al intervenir en las reacciones de este tipo que se verifican en la atmósfera y la parte superior de la litosfera, proporcionando agentes geomórficos químicos y biológicos. Puede llegar a suceder algún evento que rompa el equilibrio produciendo oscilaciones impredecibles, hasta que transcurrido un cierto lapso, el sistema geomórfico adquiere nuevas condiciones de equilibrio.

Paisajes en equilibrio dinámico muestran adaptaciones progresivas a las siempre cambiantes condiciones de la estructura geológica, clima, hidrología, suelos, biota, relieve local y elevación. Eventos endógenos -

diastróficos o volcánicos- o eventos exógenos como ser un cambio climático, incendios de magnitud o incluso las acciones descontroladas del hombre pueden proporcionar al paisaje nuevos juegos de relaciones. A partir de este tipo de eventos desestabilizadores, el sistema geomorfológico arriba a un umbral, momento en el que hay suficiente energía como para vencer la resistencia al cambio mayor. En síntesis, la secuencia temporal en este caso es: equilibrio – evento desestabilizador – período de ajuste – desarrollo de una nueva y diferente condición de equilibrio.

La cuenca del Arroyo del Medio se localiza desde el punto de vista morfoestructural en la Pampa Levantada, que corresponde al más oriental de los tres grandes bloques tectónicos que subyacen la llanura pampeana de Argentina (Castellanos 1966). La llanura pampeana -área estable de plataforma cuyo zócalo se ha hundido- es el producto de la colmatación de una cuenca de plataforma intracratónica con dos direcciones tectónicas predominantes que corresponden a fracturas y flexuras de pequeña curvatura. El basamento cristalino consta de rocas cratonizadas, fracturadas y dislocadas que ascienden hacia el sur hasta aflorar en la isla Martín García en el río de La Plata; su profundidad alcanza los 4000 m, el ancho es de unos 300 km y el fondo de pendientes débiles. La cubeta fue deformada, por procesos del manto superior, en un pliegue de gran radio de curvatura que generó dos máximos (compresión) y un mínimo intercalado (distensión), separados por geo fracturas. El máximo oriental es la "pampa levantada", el mínimo la "pampa hundida" y el otro máximo (el occidental) la "pampa elevada" (Pasotti & Canoba 1979, 1982). La geo fractura Selva-Melincué -límite entre las pampas deprimida y elevada y divisoria de aguas en mitad de la llanura- se reactivó durante el Holoceno. Este evento tectónico generó modificaciones de importancia en las elevaciones y en la dinámica de la hidrología regional, lo que a su vez produjo desequilibrios de magnitud en el funcionamiento del sistema geomorfológico. Hay que considerar además que la neotectónica actuó -y que seguramente sigue actuando- no sólo a nivel de los grandes bloques subcontinentales, sino que también dentro de ellos, reactivando fallas de menor jerarquía paralelas o subparalelas a las geo fracturas, lo que generó pilares, semihorsts y fosas tectónicas (de menor elevación relativa con respecto a los lindantes) de forma alargada en las direcciones seguidas por aquéllas (Pasotti 1974). Fracturas conjugadas y aproximadamente perpendiculares a las anteriores limitan los bloques longitudinalmente. Debido a la



**Figura 4.** Nomenclatura adoptada para los estados de equilibrio de un sistema. **A.** Equilibrio estable (el sistema fluctúa alrededor de un promedio estable). **B.** Equilibrio dinámico (el sistema fluctúa alrededor de un promedio estable pero el nivel de operaciones exhibe tendencias crecientes o decrecientes).

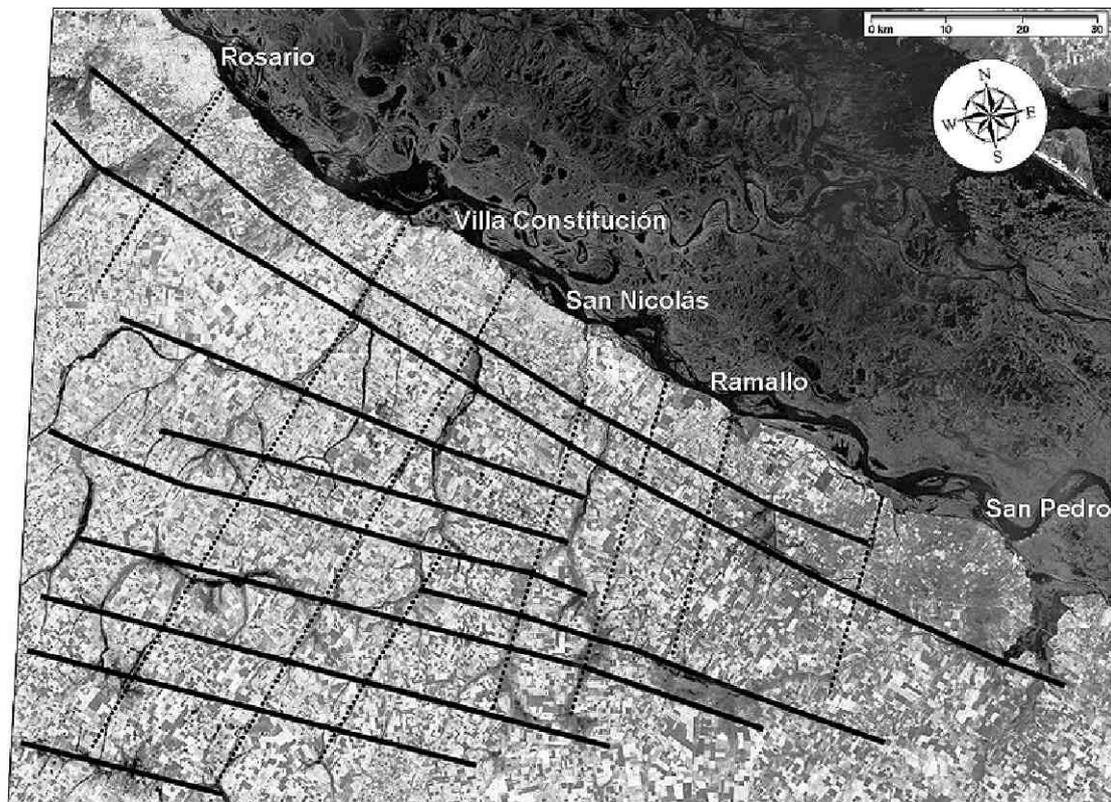
plasticidad de los sedimentos de la cubierta, el ascenso, descenso y cizallamiento de los bloques se traducen en superficie como flexuras que se corresponden con sus límites.

Fueron y son de importancia para el reconocimiento e interpretación de los rasgos morfológicos generados por la neotectónica, dos factores: la presencia de remanentes de la última paleorred hidrográfica pleistocénica de modelo colinear

a lo largo y ancho de toda la llanura pampeana (Pasotti 1973) y el anegamiento temporal y/o permanente de áreas de la superficie, consecuencia de los desniveles topográficos producidos (Pasotti 1974). El paleomodelo hidrográfico colinear indica que la llanura pampeana en el pleistoceno superior era mucho más regularmente plana y con mayor inclinación que en la actualidad; su interrupción se debió a los eventos neotectónicos que generaron las áreas relativamente elevadas (bien drenadas) y las deprimidas (anegadizas). El cartografiado -a partir de imágenes adquiridas con sensores remotos- de los detalles tonales y/o texturales producidos por las diferencias en el escurrimiento hídrico superficial y subsuperficial revelan las formas y los patrones que permiten el reconocimiento e interpretación de la morfoestructura.

La interpretación visual de la imagen satelitaria y de sus derivadas obtenidas por procesamiento digital -basada fundamentalmente en el comportamiento del escurrimiento hídrico superficial, que a su vez condiciona a la vegetación- y la elaboración de diferentes modelos y análisis a partir del modelo digital de elevaciones del terreno -basados en el relieve-, permitieron un mejor reconocimiento e interpretación de los rasgos morfoestructurales presentes en el área que incluye a la cuenca del Arroyo del Medio.

Se utilizó parte de la banda 5 de la imagen satelitaria, que corresponde al infrarrojo reflejado (1.55–1.75 m), procesada con realce de contraste circular con software de desarrollo propio (Racca 2007a), para la detección de lineamientos -presumiblemente relacionados con las direcciones tectónicas- presentes en el área de estudio y en las adyacentes (Fig. 5). Abarca -además de la cuenca del Arroyo del Medio-, partes de las cuencas de los arroyos Ludueña, Saladillo, Frias, Seco, Pavón, Ramallo, de las Hermanas, de los



**Figura 5.** Lineamientos observados en la imagen satelitaria.

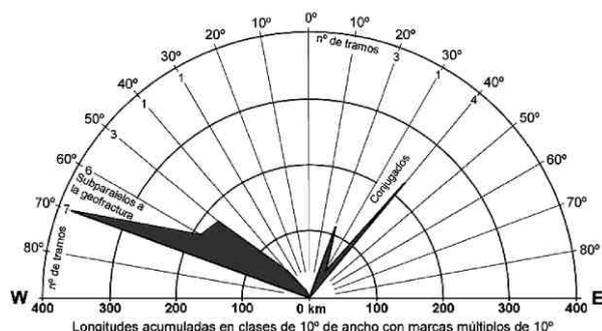


Figura 6. Rosa de direcciones de lineamientos en el área estudiada.

Cueros, Espinillo y del Río Tala, que desembocan en el Paraná, en ese orden, de WNW a ESE. En el extremo inferior izquierdo de la imagen se encuentra un área que corresponde a las nacientes del Arroyo Pergamino. Fuera de la imagen y paralelo a este último (hacia el SW) se dispone un cañadón (cañadas de Chañarito y de Rojas) que pertenece a las nacientes del río Rojas, pótamo que aguas abajo toma la denominación de Arroyo Salto cuyo trazado se correspondería con el de la continuación de la geofractura Selva-Melincué en territorio bonaerense. Se usaron la banda y realce de contraste mencionados, luego de observar las cinco bandas disponibles y varias composiciones color de tres de ellas, procesadas con diferentes realces de contraste y con software de desarrollo propio (en total 35 productos pseudoicónicos diferentes), debido a que demostró ser la combinación que permitió la mejor detección de lineamientos, aunque la resolución espacial de la imagen (180 metros) hace que ella no sea óptima para este propósito.

Los lineamientos paralelos o subparalelos a la geofractura -y en cierto grado sus conjugados- fueron trazados tomando en consideración varios rasgos observables del mismo tipo alineados, como ser bordes de áreas inundables y de áreas bien drenadas, cambio abrupto y continuado de achura de las llanuras de inundación de los arroyos, su encajamiento y cambio de patrón de los cauces, como asimismo los quiebres y direcciones anómalas de estos últimos. Paralelos a la dirección del río Paraná y de sus barrancas, se reconocen dos lineamientos de considerable longitud (120 y 150 km aproximadamente en la porción de imagen presentada en la Fig. 4 pero continúan hacia el NW) que separan áreas que se corresponden con dos pilares y una fosa intermedia entre ellos. Ya fueron señalados e interpretados por Pasotti (1969) en el área del Gran Rosario, denominando "bloque de las cinco cuencas" al vinculado con la zona deprimida anegadiza. A partir del Arroyo Pavón, hacia el ESE y hasta llegar a la cuenca del Arroyo de las Hermanas, la mencionada área intermedia no exhibe rasgos mayores de anegamiento pero se puede seguir el trazado de los lineamientos a través de los cambios de dirección de cauces de los arroyos que quiebran o se curvan hacia el NW. A partir de la cuenca del Arroyo de las Hermanas, hacia el ESE, vuelven a distinguirse las zonas anegadizas.

Al sur de los dos ya descriptos y con dirección rotada más de 10 grados respecto de ellos en sentido antihorario, se detecta una serie de lineamientos paralelos entre sí, en total nueve de ellos si se incluye el que corresponde a las cañadas de Chañarito y de Rojas -fuera de la imagen- cuyo trazado concordaría con el de la continuación de la geofractura Selva-Melincué. Uno de estos últimos lineamientos -el séptimo si se cuentan todos a partir del río Paraná hacia el sur y que concuerda con el tramo de cauce principal del Arroyo del

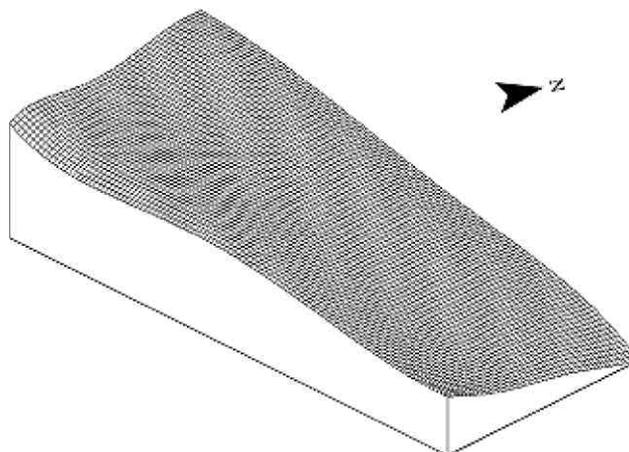


Figura 7. Diagrama ortográfico que muestra la superficie de tendencia de quinto grado del relieve del área de la cuenca del Arroyo del Medio.

Medio que se dispone de WNW a ESE- se correspondería, a nivel de basamento, con una fractura que separaría dos bloques cuyos movimientos habrían sido de relevante importancia en la generación de la macromorfología actual de la cuenca del Arroyo del Medio. De aquí en adelante por razones de practicidad se denominará a estos dos bloques como "de Peyrano-General Gelly" al septentrional y como "de Manuel Ocampo" al meridional, haciendo alusión a localidades situadas sobre ellos.

El bloque de "Peyrano-General Gelly" habría descendido sólo un poco respecto del de "Manuel Ocampo" pero habría basculado hacia el NNE, produciendo una flexura en superficie que hizo que el escurrimiento superficial de las aguas de áreas que drenaban naturalmente hacia el hoy Arroyo Pavón quebraran su dirección original SSW-NNE, a la actual WNW-ESE, labrando un largo tramo de valle subsecuente (35 km) según este último rumbo. Al llegar al límite de los mencionados bloques, presumiblemente una fractura conjugada, el cauce retoma una dirección paralela a la original, hasta desembocar en el Río Paraná. La evolución descrita sería la principal responsable del cambio de modelo de red de avenamiento, pasando del paleomodelo colinear finipleistocénico al "trellis", que es el que presenta en la actualidad la cuenca del Arroyo del Medio. El doble quiebre de dirección del cauce principal, que se toma como límite entre las provincias de Santa Fe y de Buenos Aires, delinea el "taco" de la figura en forma de bota que posee la provincia mencionada en primer término.

El seguimiento de los lineamientos conjugados a los paralelos a la geofractura entrañó mayores dificultades por ser menos detectables y superponerse su dirección -en especial en el sector occidental de la imagen- a la dirección seguida por el paleomodelo hidrográfico colinear. También se presentan dos direcciones diferentes en este tipo de lineamientos: en la parte oriental de la escena, a partir del que se nota a lo largo de la cuenca del Arroyo Ramallo, rotan en sentido antihorario alrededor de 15º respecto de los occidentales. La Fig. 6 muestra un resumen en forma de gráfico direccional de las características de todos los lineamientos detectados. Son de destacar los dos lineamientos conjugados cuyos extremos coinciden con la parte final de los arroyos Pavón y del Medio; entre ambos la ribera del Río Paraná presenta una convexidad anómala. Aguas arriba de la convexidad, el cauce y la llanura de inundación ordinaria del Río Paraná se ensanchan notablemente y a partir de la desembocadura del Arroyo Pavón,

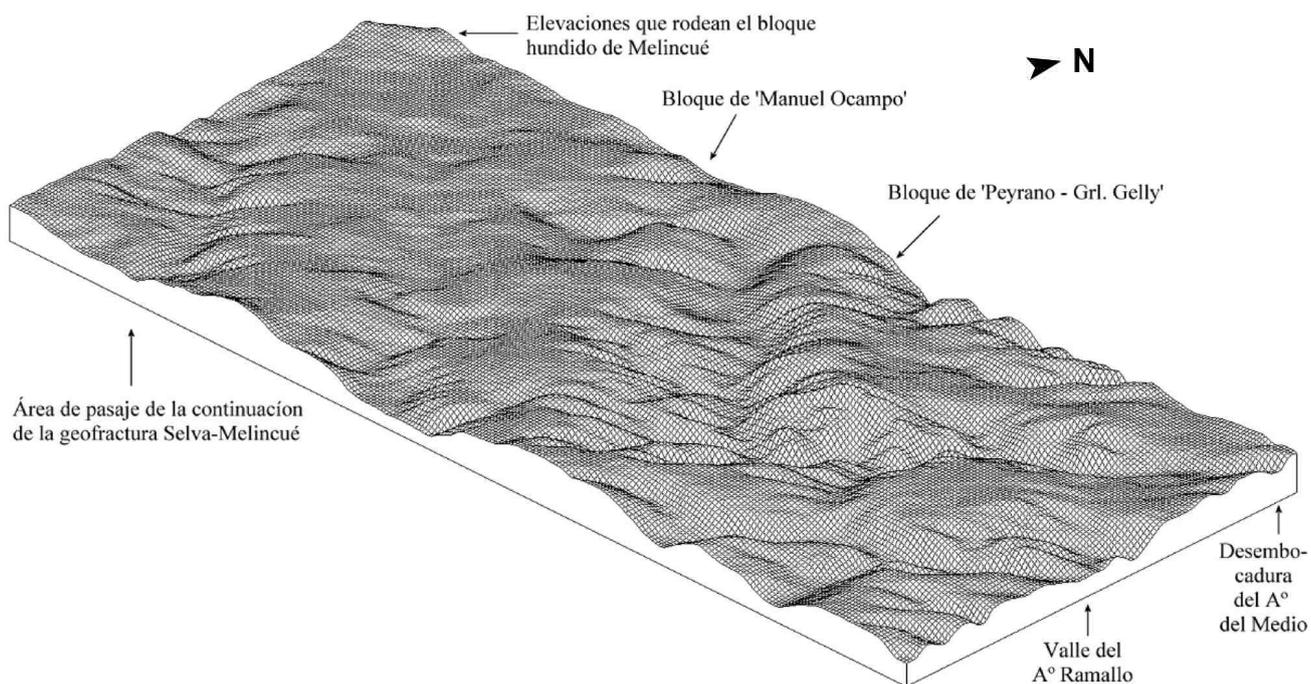


Figura 8. Desvíos del relieve del área de la cuenca del Arroyo del Medio respecto de la superficie de tendencia de quinto grado.

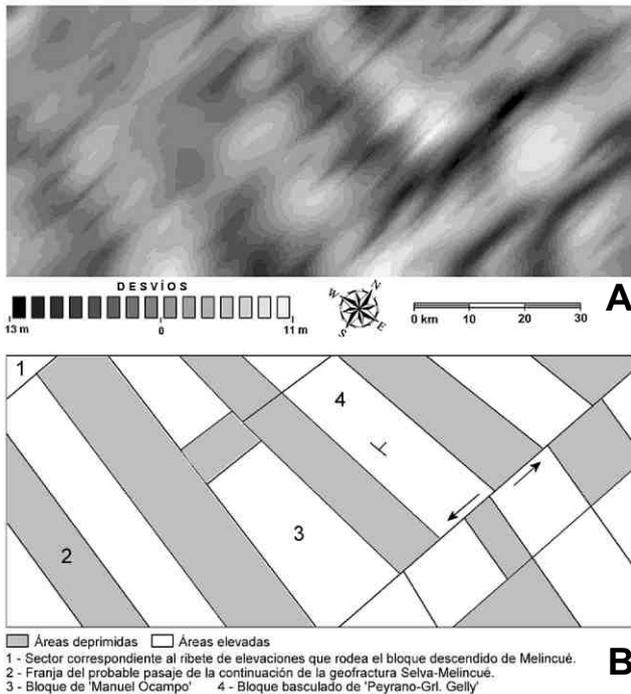
hacia el ESE, la línea de ribera del río se desplaza hacia el NNE -respecto del tramo anterior- adoptando un trazado general rectilíneo hasta llegar a la desembocadura del Arroyo Espinillo. Todos estos rasgos observados indican que los bloques tectónicos del basamento habrían tenido una componente de desplazamiento horizontal a lo largo de las fracturas sugeridas por los lineamientos conjugados.

Pasando al nivel de escala intermedia y operando sobre el área más restringida cubierta por el modelo digital de elevaciones del terreno (Fig. 4), se realizó el análisis de superficies de tendencia de la misma (Racca 1982) a partir de una reducción del mencionado modelo, obtenida mediante la técnica de agregación o de promedios de celdas vecinas, que cambió su resolución original de 40 a 400 m. En este caso el análisis se basó exclusivamente en el relieve y su objetivo fue separar la componente regional o de "tendencia", de las componentes "locales" producidas fundamentalmente por la neotectónica a nivel zonal y, en menor dimensión, por la erosión hídrica reciente. Se calcularon las superficies de tendencia hasta la de quinto grado -y los desvíos del relieve respecto de ellas, principal objeto del análisis- con una actualización de programas ya elaborados (Racca 1982), que permitieron tratar el gran número de datos que fueron procesados. Se examinaron todos los resultados a través de modelos coroisopléticos y de diagramas-bloque ortográficos (Racca 1993), escogiendo el análisis de quinto grado para las presentaciones, aunque los patrones de los desvíos de las cinco regresiones no mostraron diferencias significativas entre ellos. La Fig. 7 exhibe el diagrama-bloque ortográfico de la superficie de tendencia de quinto grado; su amplitud de relieve es de aproximadamente 84 m.

La desembocadura del Arroyo del Medio se sitúa en el extremo derecho del diagrama-bloque de la Fig. 7. Si se tiene en cuenta que en el Pleistoceno superior la llanura pampeana era mucho más regularmente plana, la observación de este

diagrama proporciona pautas generales acerca de las deformaciones regionales producidas por la neotectónica. El diagrama-bloque de la Fig. 8 exhibe en perspectiva el comportamiento de los desvíos de la regresión de quinto grado. En él se pueden observar las características del relieve local, desprovistas de las de tendencia regional; su amplitud de relieve es de aproximadamente 24 m. En la Fig. 9A se presenta un modelo coroisoplético de la magnitud de los desvíos de la regresión de quinto grado, separados en 16 clases de igual amplitud. A partir de este modelo, se realizó un esquema interpretativo donde constan los lineamientos del relieve, probable reflejo de fracturas del basamento que tuvieron desplazamientos, donde la mayoría de estos lineamientos separan las áreas relativamente elevadas de las deprimidas (Fig. 9B). Es de notar el desplazamiento de áreas elevadas y deprimidas a ambos lados y a lo largo del lineamiento coincidente con el tramo final del cauce principal del Arroyo del Medio (y que se continúa hacia el SSW); ello sugiere una fractura del basamento que tuvo una componente de desplazamiento horizontal, tal como indican las flechas. Los rasgos topográficos involucrados se pueden observar claramente en el diagrama-bloque de la Fig. 8. Además, tanto en esta última como en la Fig. 7 se pueden apreciar otros rasgos morfotectónicos relevantes: las elevaciones correspondientes a los bloques de "Manuel Ocampo" y al basculado de "Peyrano-Grl. Gelly", separadas por una franja deprimida posiblemente relacionada con una fosa tectónica intermedia coincidente con el tramo subsecuente del valle del Arroyo del Medio, el área deprimida donde se encuentran las cañadas de Chañarito y de Rojas bajo la cual es muy probable el pasaje de la continuación de la geofractura Selva-Melincué y un pequeño sector que corresponde al ribete elevado que existe rodeando todo el graben donde se localiza la Laguna Melincué.

Un rasgo topográfico anómalo, acerca del cual todavía no se han formulado hipótesis, es el que se presenta en



**Figura 9.** Desvíos del relieve del área de la cuenca del Arroyo del Medio respecto de la superficie de tendencia de quinto grado. **A:** Desvíos de la superficie de tendencia. **B:** Interpretación de la morfotectónica basada en el análisis.

el extremo occidental del bloque de "Manuel Ocampo": una pequeña área deprimida a partir de dicho extremo, seguida hacia el NNE de una elevación cupuliforme, que queda algo fuera de línea con respecto al trazado alargado del mencionado bloque. El cauce principal del Arroyo del Medio rodea dicha elevación antes de dirigirse netamente hacia el ESE de manera subsecuente.

Se pueden apreciar en los modelos, en particular en el corioisoplético, los rasgos lineales deprimidos -que se disponen de SSW a NNE- correspondientes al paleomodelo hidrográfico, segundo factor de control en el desarrollo de las redes de avenamiento actuales. Las paleocañadas actúan como direcciones de encauzamiento de las aguas y favorecen la erosión hídrica lineal y retrogradante, especialmente en las pendientes de las flexuras originadas por la neotectónica. Ambos factores, el neotectónico y la erosión hídrica lineal y retrogradante actuando en las paleocañadas, configuran el modelo de red de avenamiento emparrado o "trellis" que presentan las cuencas del área, incluyendo a la del Arroyo del Medio.

Aparte de las ya descritas, las otras geoformas producidas por los agentes de la geodinámica externa -incluyendo al hombre- poseen en general menores dimensiones y corresponden a las escalas de semidetalle y de detalle. Su estudio, clasificación y cartografiado están en progreso, requiriendo de importantes tareas de interpretación de fotografías aéreas en mayor escala y de relevamientos en campaña. No obstante, a nivel regional y de escala intermedia, dados el clima templado húmedo subhúmedo actual y el tipo de relieve del área, se puede decir que los procesos exógenos que imperan son los de meteorización y erosión hídrica en todos sus estadios. Todo lo estudiado hasta el momento, particularmente en lo referido a los aspectos morfométricos de la cuenca del Arroyo del Medio, indica que el área en estudio se encontraría afectada desde el punto de vista geomorfológico por

desequilibrios de magnitud producidos por los eventos tectónicos muy recientes ya mencionados, que produjeron un umbral (Fig. 4B), forzando al sistema geomórfico a producir importantes reajustes para alcanzar un nuevo estado de equilibrio metaestable. El sistema recién estaría en los comienzos del período de reajuste; ello supone un importante gasto energético que se traduce fundamentalmente en el incremento de los procesos erosivos. Por tal razón, se remarca la importancia de implementar técnicas adecuadas de morfoconservación, de conservación de suelos y de manejo hídrico, con el propósito de atemperar los efectos producidos por el desequilibrio del sistema geomorfológico.

## MORFOGRAFÍA

En este apartado se trata la descripción cualitativa de las geoformas existentes en el área de la cuenca del Arroyo del Medio, a nivel de escala intermedia. A tal efecto y con propósitos ilustrativos y explicativos, se presenta una serie de modelos referidos a las características de la morfología superficial en dicha área. Se utilizará para localizar los rasgos que se irán describiendo, en primera instancia, la reducción de una carta hipsométrica en la que se han trazado las divisorias de aguas de la cuenca del Arroyo del Medio (Fig. 10). La altimetría está representada con curvas de nivel cuya equidistancia es 2.50 m. Además, se presenta esta carta a mayor escala sin las indicaciones en la Fig. 11. Un modelo combinado de carta imagen satelital en pseudo color normal con curvas de nivel superpuestas se exhibe en la Fig. 12. El área que cubre y su correspondiente hipsometría (obtenida de las hojas topográficas del IGM enumeradas en la Fig. 3) fueron tomadas como base para la realización del modelo digital de elevaciones del terreno y de sus derivados. Fueron construidos utilizando un método propio que incluyó el desarrollo del software en concordancia, exhibiendo una excelente adaptación al relieve representado por las curvas de nivel. Constituyen el fundamento de la mayoría de los otros modelos generados para la confección de los análisis y utilizados en las descripciones y en las explicaciones. Las referencias toponímicas citadas en el texto pueden ser localizadas en el fragmento de carta presentado en la Fig. 2.

Aparte de la carta hipsométrica con curvas de nivel (Figs. 10-11), se acompañan los siguientes modelos con características pseudoicónicas, todos basados en el modelo digital de elevaciones del terreno (MDE):

(1) Diagrama-bloque ortográfico del área total cubierta por el MDE, realizado con perfiles proyectados cuya dirección es SSE-NNW; la dirección de visualización es desde el ESE (acimut 111°), con una elevación de 30° sobre el horizonte. Los perfiles fueron trazados con una separación de 400 m -en planta- entre ellos; la exageración vertical es de aproximadamente 150 veces (Fig. 13).

(2) Diagrama-bloque ortográfico, con características geométricas similares al anterior, vestido con el fragmento correspondiente de carta imagen satelitaria (Fig. 14).

(3) Diagrama-bloque ortográfico de la parte superior de la cuenca del Arroyo del Medio, realizado con perfiles proyectados cuya dirección es SSE-NNW; la dirección de visualización es desde el ENE (acimut 72°), con una elevación de 30° sobre el horizonte. Los perfiles fueron trazados con una separación de 400 m -en planta- entre ellos; la exageración vertical es de aproximadamente 150 veces (Fig. 15A).

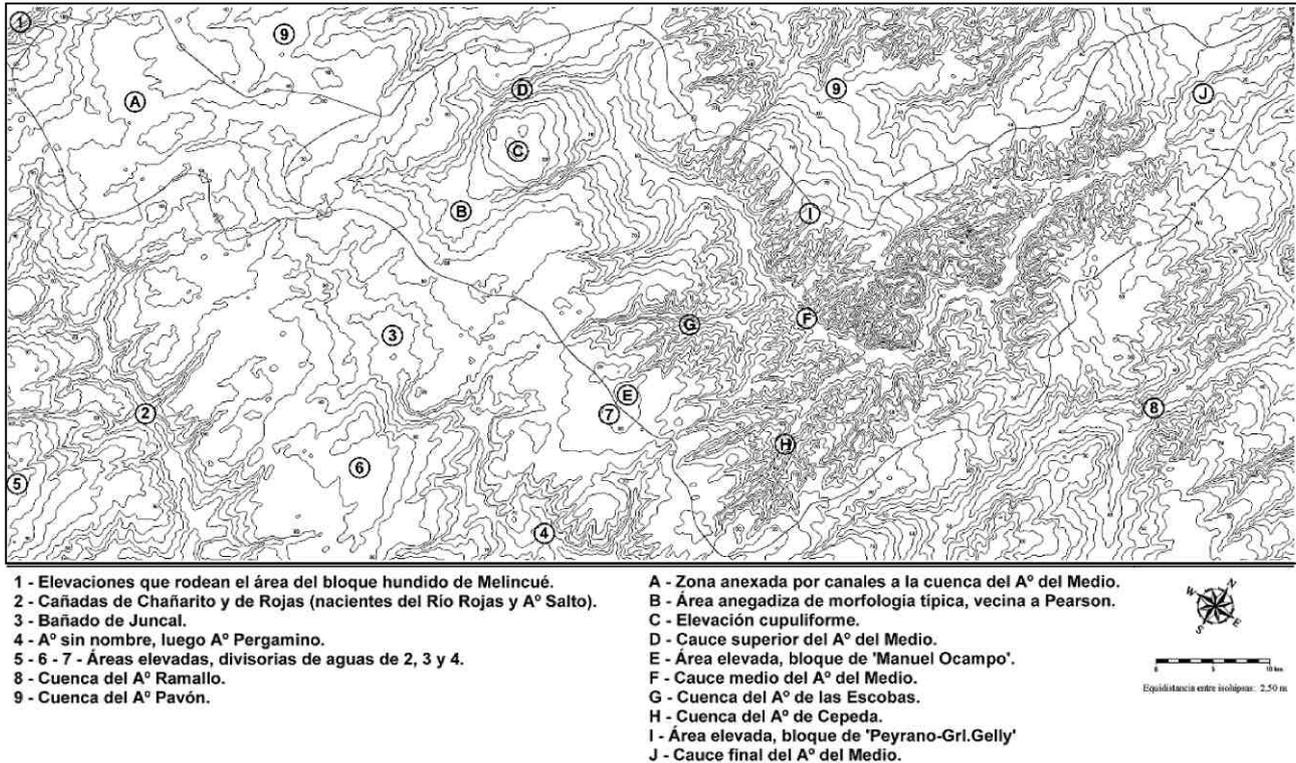


Figura 10. Localización de rasgos morfológicos destacados sobre carta planialtimétrica.

(4) Diagrama-bloque ortográfico de la parte superior de la cuenca del Arroyo del Medio, con características geométricas similares al anterior, vestido con el correspondiente sector de carta imagen satelitaria (Fig. 15B).

(5) Diagrama-bloque ortográfico de la parte media de la cuenca del Arroyo del Medio, realizado con perfiles proyectados cuya dirección es SSE-NNW; la dirección de visualización es desde el ESE (acimut 111°), con una elevación de 30° sobre el horizonte. Los perfiles fueron trazados con una separación de 400 m -en planta- entre ellos; la exageración vertical es de aproximadamente 150 veces (Fig. 16A).

(6) Diagrama-bloque ortográfico de la parte media de la cuenca del Arroyo del Medio, con características geométricas similares al previo, vestido con el fragmento correspondiente de carta imagen satelitaria (Fig. 16B).

(7) Diagrama-bloque ortográfico de la parte inferior de la cuenca del Arroyo del Medio, realizado con perfiles proyectados cuya dirección es SSE-NNW; la dirección de visualización es desde el ENE (acimut 72°), con una elevación de 30° sobre el horizonte. Los perfiles fueron trazados con una separación de 400 m -en planta- entre ellos; la exageración vertical es de aproximadamente 150 veces (Fig. 17A).

(8) Diagrama-bloque ortográfico de la parte inferior de la cuenca del Arroyo del Medio, con características geométricas similares al anterior, vestido con el correspondiente sector de carta imagen satelitaria (Fig. 17B).

Lo primero que se debe tener en cuenta es que la amplitud de relieve en el área de 5551.728 km<sup>2</sup> (112.84 km x 49.20 km) cubierta por el MDE es de 97 m y que el relieve local

(amplitud de la frecuencia del relieve) a escala regional no excede los 24 m; esto hace que los modelos deban presentarse con elevada exageración vertical (150 veces), con el propósito de que se puedan visualizar los cambios. En la Fig. 10 se notan con números los rasgos que se encuentran fuera de los límites de la cuenca del Arroyo del Medio -y que se describirán primero con el fin de proporcionar el marco de referencia que otorga el entorno- y con letras mayúsculas aquéllos que pertenecen a su interior. Si se observan las curvas de nivel en el extremo izquierdo medio e inferior de la figura, se puede percibir claramente el trazado del cañadón integrado por las cañadas de Chañarito y de Rojas (2), nacientes del río Rojas (luego Arroyo Salto), que se dispone de manera rectilínea de WNW a ESE a lo largo de más de 40 km en el área delimitada. Las divisorias de aguas están situadas sobre las franjas elevadas (5) y (6) que son paralelas a su trazado; se hallan a distintas altitudes con una diferencia de elevación del orden de los 13 metros, haciendo que el perfil transversal del cañadón sea -en consecuencia- asimétrico. En las vertientes del mismo se localizan cañadas tributarias de dimensión mucho menor cuya dirección es aproximadamente perpendicular al rumbo de la colectora y que coincide con la seguida por el paleomodelo colinear. Además, las cañadas tributarias se corresponden una a una en ambas vertientes. Lo marcado de estos rasgos en cuanto a relieve, extensión, linealidad y asimetría lleva a pensar que se relacionan con el trazado de la continuación de la geofractura Selva-Melincué, ya en territorio bonaerense. Todo lo descrito puede visualizarse en los modelos perspectivos de las Figs. 8, 13-15.

Hacia el NE y paralela a los rasgos anteriormente citados, se encuentra cruzando toda la carta una faja de terreno de unos 26 km de ancho, dispuesta también de WNW a ESE, que posee una muy leve inclinación general según este rumbo (hacia el ESE); su eje central está marcado aproximadamente

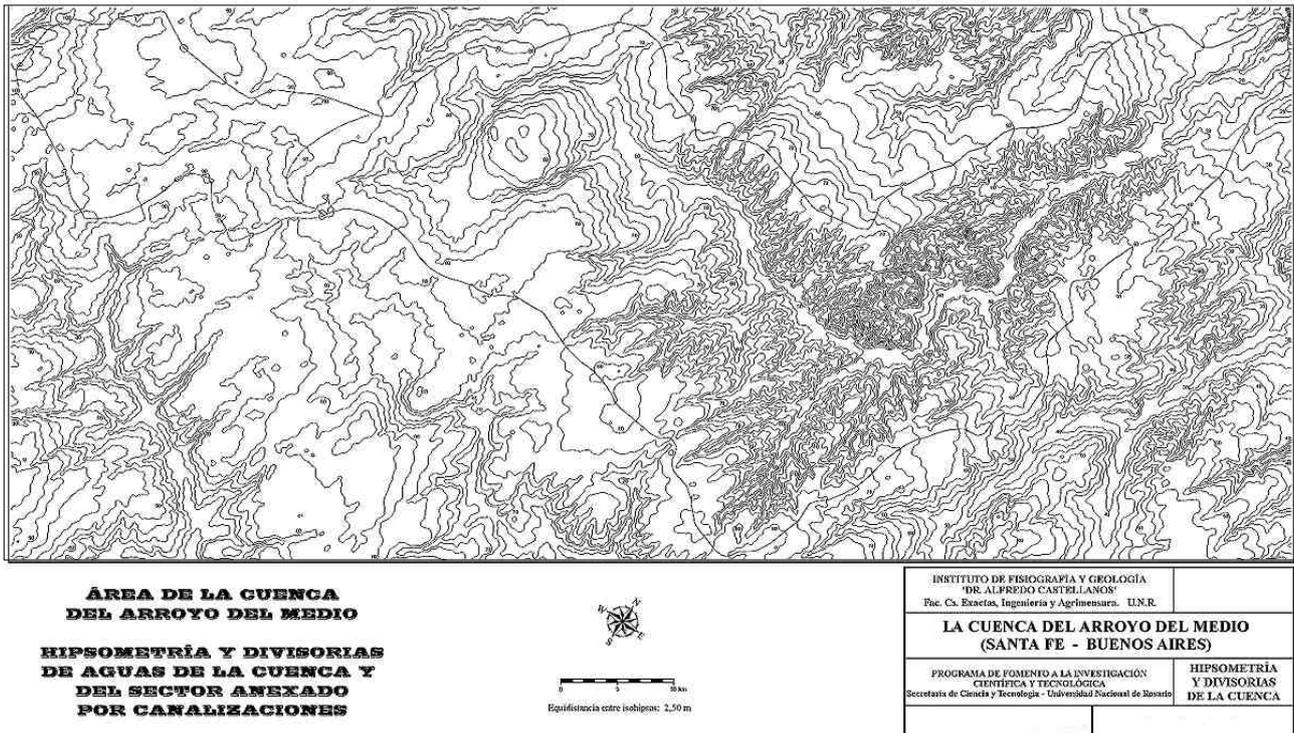


Figura 11. Hipsometría y divisorias de aguas de la cuenca del Arroyo del Medio y del sector anexado por canalizaciones.

por las referencias (A), (3) y (4) en la Fig. 10. El escurrimiento hídrico tiende a realizarse de acuerdo con la mencionada leve inclinación general, en especial en el sector sur donde ya existe una amplia e irregular cañada -que posee perfil transversal simétrico y cuyas divisorias de aguas se hallan sobre las áreas elevadas (6) y (7)-, en la que se encuentra el extenso bañado de Juncal (3), a partir del cual -en su extremo sur- las aguas se encauzan generando el Arroyo Pergamino (4). El extremo norte (A) de la faja es muy plano y casi horizontal, anegadizo; debido a estas características, y con el propósito de drenarlo, se construyeron canalizaciones (canales del Pelao y de Juncal) que lo anexaron de manera artificial a la cuenca del Arroyo del Medio (Fig. 14). En el extremo inferior derecho de la Fig. 10 se encuentra parte de la cuenca del Arroyo Ramallo (8) y en la parte superior de la carta de la mencionada lámina aparecen áreas que pertenecen a la cuenca del Arroyo Pavón (9); algunas de sus características se discutirán posteriormente.

Ya descrito el entorno, se tratarán a continuación los rasgos morfológicos presentes en la cuenca del Arroyo del Medio. En el extremo superior izquierdo de la Fig. 10 aparece un pequeño sector (1) que corresponde al ribete de elevaciones que rodea el área del bloque hundido donde se halla la laguna Melincué y que actúa -en un corto tramo- como divisoria de aguas entre la cuenca de dicha laguna y el sector anexado por canalizaciones a la cuenca del Arroyo del Medio (A) y cuyas características ya fueron mencionadas (Figs. 8, 13-15). Este sector anegadizo pertenece naturalmente a la cuenca del Arroyo Pergamino, tal como puede observarse a partir de la disposición de las curvas de nivel; sus divisorias de aguas actuales, forzadas por las canalizaciones, están trazadas en la Fig. 10, como asimismo lo está (con línea discontinua) el tramo que originalmente lo separaba de la cuenca del Arroyo del Medio, que cruza la isohipsa cerrada de 90 m, nacientes naturales de esta última cuenca. El canal principal, denominado Juncal, tiene dirección WNW-ESE en sus tramos

medio y final; fue construido de tal manera para aprovechar la escasa pendiente natural que tiene ese rumbo, pero al llegar a la altura de la localidad homónima, lo tuerce rodeando esta localidad, un poco en contrapendiente, para ingresar en la cuenca natural del arroyo objeto de esta presentación, lugar a partir del cual toma el nombre de "del Medio". El canal Juncal recibe como afluente al canal "del Pelao", que drena la parte sur del sector anexado. En las cabeceras de la cuenca natural del Arroyo del Medio se halla una zona deprimida (B), anegadiza, en donde las curvas de nivel adoptan forma de abanico, patrón típico que se encuentra en áreas que habrían sufrido descenso tectónico -seguidas de otras con probable ascenso- que ya ha sido reconocido por el autor (Racca 1981) en las cinco cuencas hidrográficas del área del gran Rosario, situado sobre el "bloque hundido de las cinco cuencas" (Pasotti 1969). La cubeta con forma de abanico termina en una elevación cupuliforme (C), otro rasgo típico en áreas probablemente ascendidas por la neotectónica, que posee características similares a las del "morrito de Funes" en la cuenca del Arroyo Ludueña (Pasotti et al. 1979). El área deprimida tiende a ser drenada por dos cañadas que rodean en forma de pinza la elevación de contorno circular (C); la que se halla al norte recibe las aguas del canal del Medio, prolongación del Juncal, constituyendo el cauce superior (D) del arroyo (parte inferior de la Fig. 15B). La cañada mayor -parte final del cauce superior del Arroyo del Medio- rodea el rasgo cupuliforme, rotando su dirección en ángulo recto, dando lugar al comienzo del cauce medio (Fig. 16).

Al oriente de los rasgos (B) y (C) se encuentra de manera discordante con ellos el área elevada (E) correspondiente al "bloque de Manuel Ocampo". Ella muestra una zona superior plana (cota 80 m) donde se ubica la divisoria de aguas de la cuenca en esta parte; luego presenta inclinación general hacia el NNE constituyendo la vertiente derecha del valle medio del arroyo. Las redes de avenamiento en esta

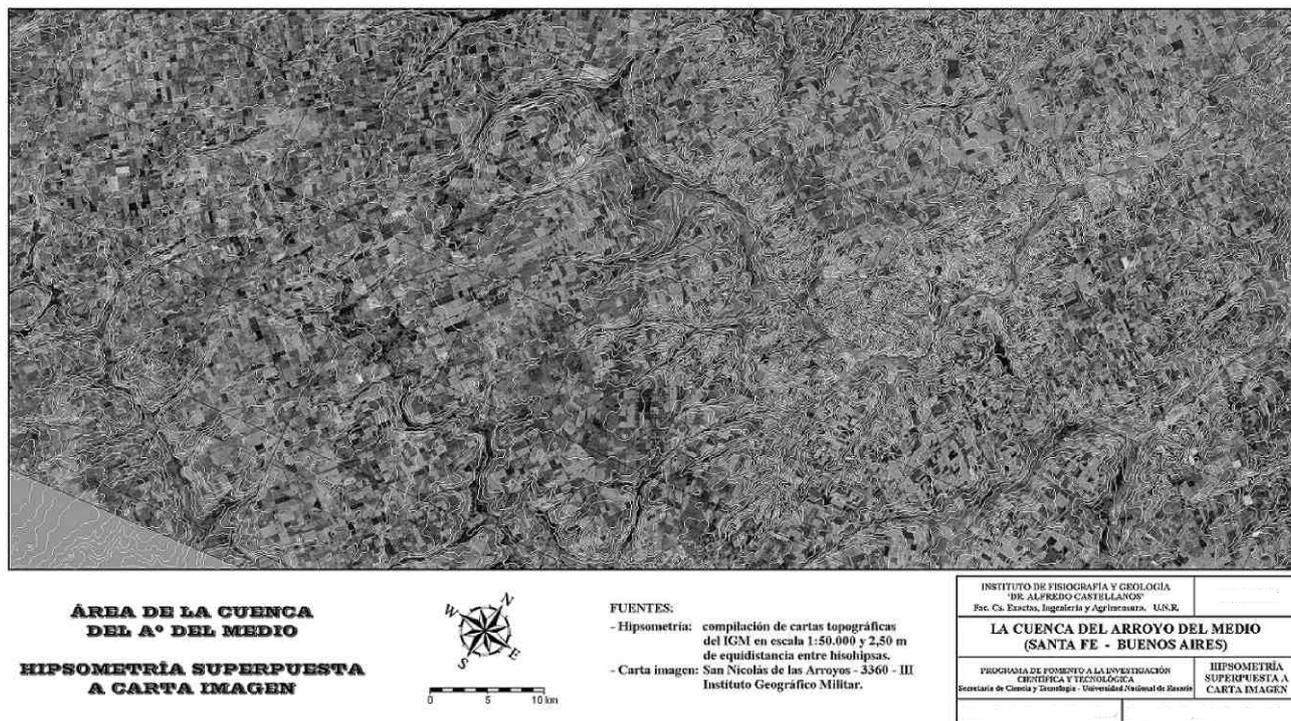


Figura 12. Hipsometría superpuesta a carta imagen del área de la cuenca del Arroyo del Medio.

vertiente están bien desarrolladas, exhibiendo un modelo dendrítico fuertemente condicionado en su parte alta por el paralelo, relicto de las paleocañadas; se destacan dos subcuencas de cuarto orden jerárquico en esta parte del interfluvio: la del Arroyo de las Escobas (G) y la del Arroyo de Cepeda (H).

La vertiente izquierda del valle medio del arroyo no presenta en general redes de avenamiento desarrolladas por confluencias; está surcada por cañadas paralelas coincidentes con las del paleomodelo que desembocan perpendicularmente en el cauce principal del Arroyo del Medio. Esta vertiente posee una longitud mucho menor y con mayor pendiente general que la opuesta; forma parte del área elevada (I) relacionada con el "bloque de Peyrano-General Gelly". El área mencionada (I) no posee prácticamente sector plano horizontal en su parte superior (cota 73 m), haciendo que la divisoria de aguas con la cuenca del Arroyo Pavón (9) esté mejor definida que en la vertiente derecha, respecto de la cuenca del Arroyo Pergamino (3) y (4). De esta forma, el valle central del Arroyo del Medio presenta -en general- un perfil transversal asimétrico, con una ladera derecha que posee mayor longitud, mayor amplitud del relieve y menor pendiente general que la izquierda.

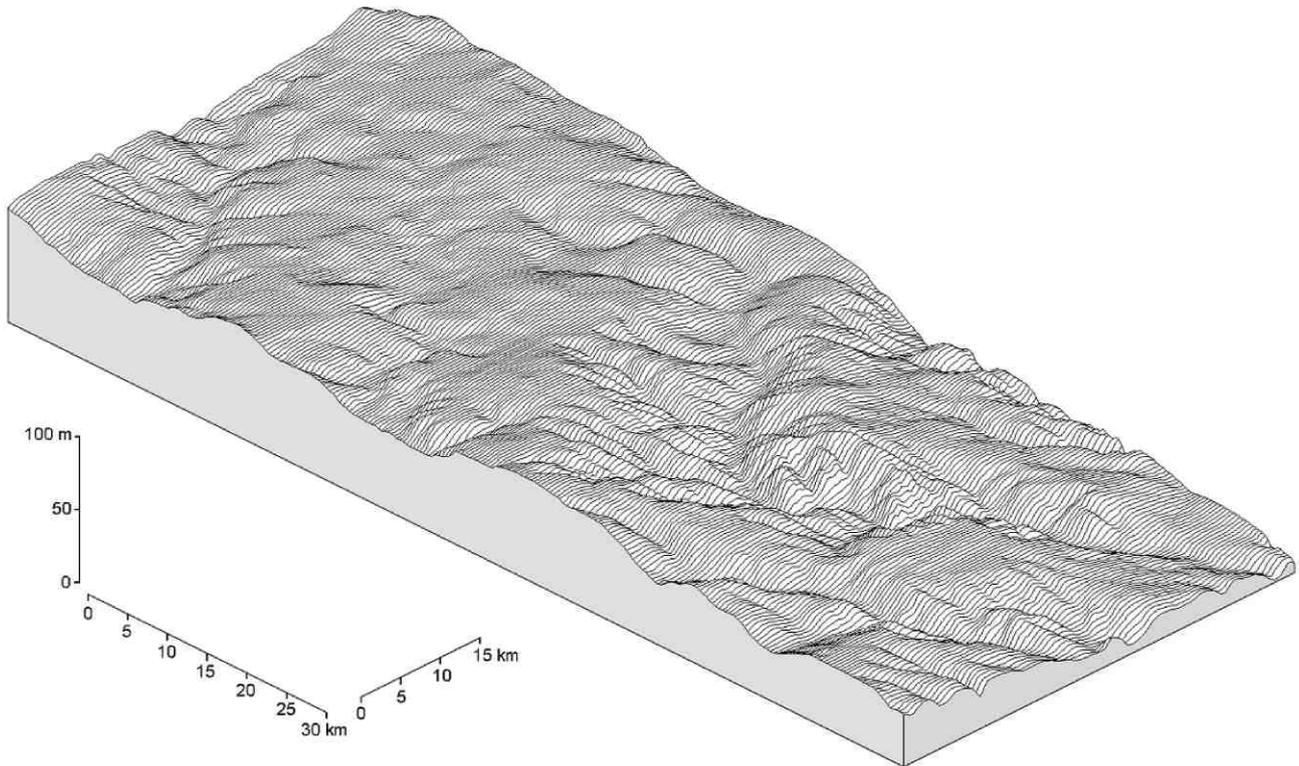
El perfil transversal del área elevada (I) es muy disimétrico; posee pendiente pronunciada en la vertiente izquierda del valle medio del Arroyo del Medio e inclinación suave al NNE en la cuenca del Arroyo Pavón. Esta morfología sería catalogada en áreas con mayor amplitud de relieve como "de cuesta" y es el factor principal que lleva a pensar que existe un bloque del basamento que habría basculado hacia el NNE, manifestándose de tal manera en superficie.

El tramo central del valle del Arroyo del Medio cuya longitud total es de aproximadamente 38 km, concluye donde el cauce principal vuelve a rotar su dirección en ángulo recto, dirigiéndose con rumbo NNE hacia el río Paraná, labrando el tramo final del valle (Fig. 17). La primera mitad de este tramo

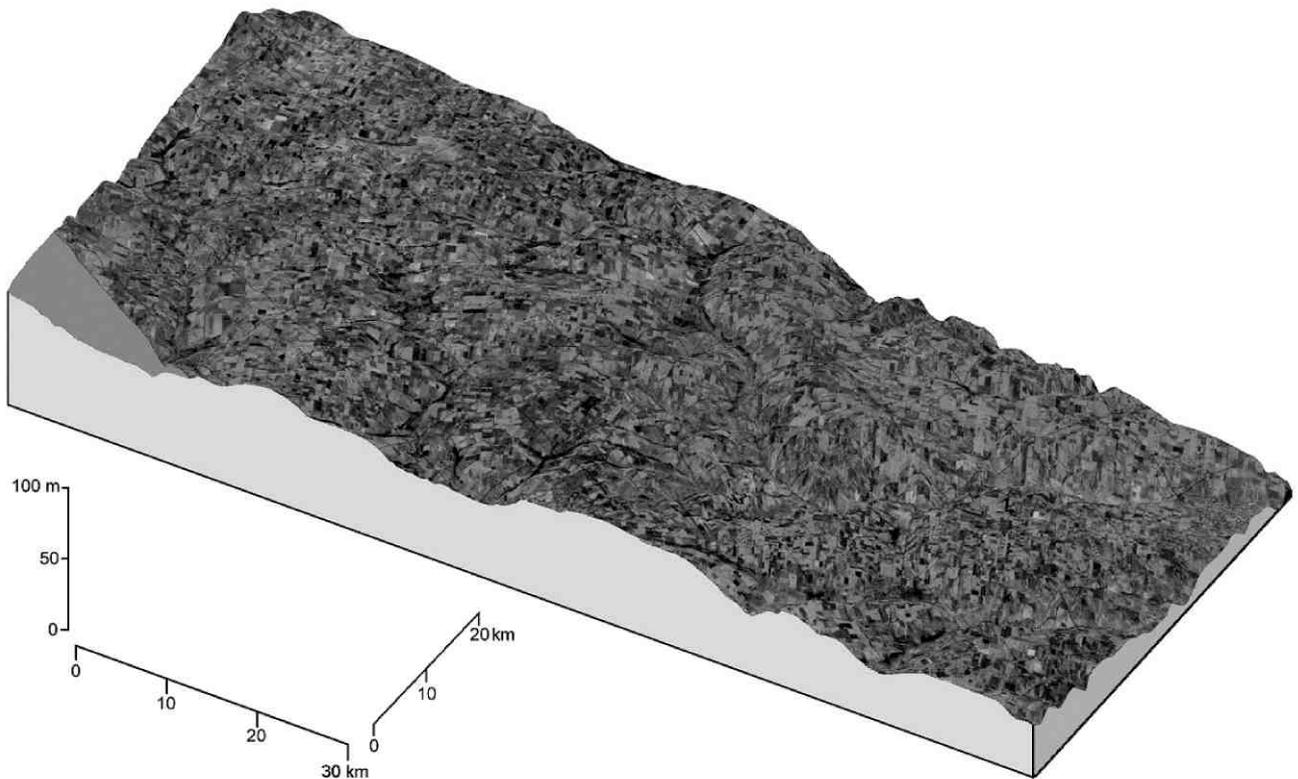
final exhibe un perfil transversal notablemente asimétrico, pero con la disimetría invertida -en cuanto a elevación- respecto de la del perfil transversal del valle medio. En este caso es la vertiente izquierda la que presenta mayor amplitud de relieve (su divisoria de aguas con la cuenca del Arroyo Pavón posee cota 70 m al comienzo), mayores pendientes y un patrón de erosión hídrica -marcado por las curvas de nivel- mucho más denso y variable que en la vertiente derecha (la divisoria de aguas con el Arroyo Ramallo tiene cota 60 m al principio del tramo).

El valle del Arroyo del Medio en todo su tramo final, cuya longitud posee alrededor de 45 km, es mucho más angosto que el valle en el tramo medio y su trazado longitudinal es rectilíneo hasta confluir con el Río Paraná. Si se observan los diagramas perspectivas de las Figs. 17 y 8 y la Fig. 19, ya comentados en el apartado correspondiente a la morfogénesis, se notan las diferencias en el relieve a ambos lados del cauce ya apuntadas anteriormente, hecho que reafirma la idea de que el trazado del tramo final del Arroyo del Medio concuerda con el de una fractura del basamento, que tuvo una componente de desplazamiento horizontal.

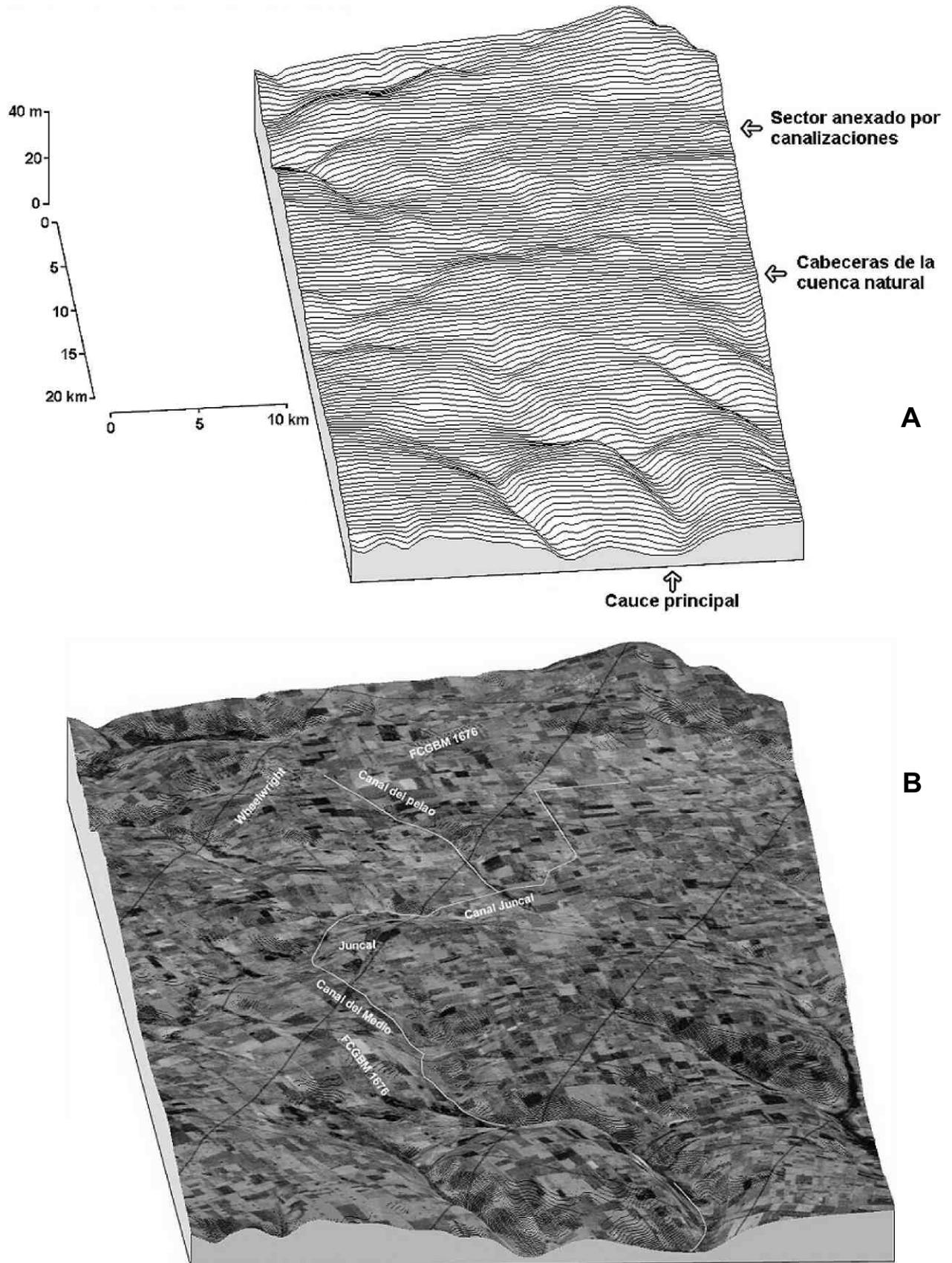
El perfil longitudinal del cauce principal del Arroyo del Medio, desde las cabeceras -incluyendo el sector anexo por canalizaciones- hasta la desembocadura en el Río Paraná, se exhibe en la Fig. 18. En sus comienzos, hasta aproximadamente la cota 84 m, el perfil corresponde al del canal Juncal, en el sector anexo a la cuenca del Arroyo del Medio; luego de ingresar en ella -por aproximadamente 5 km y ya con la denominación de canal del Medio- su pendiente sufre cambios manifiestos cuando cruza la cubeta con forma de abanico ya descrita, adoptando una marcada concavidad hacia el cielo hasta llegar al umbral de la depresión. A partir de este punto, el perfil longitudinal del cauce es anómalamente rectilíneo hasta la desembocadura en el río Paraná. Lo normal en cauces graduados es que exhiban un perfil longitudinal cóncavo, con los gradientes decreciendo hacia la



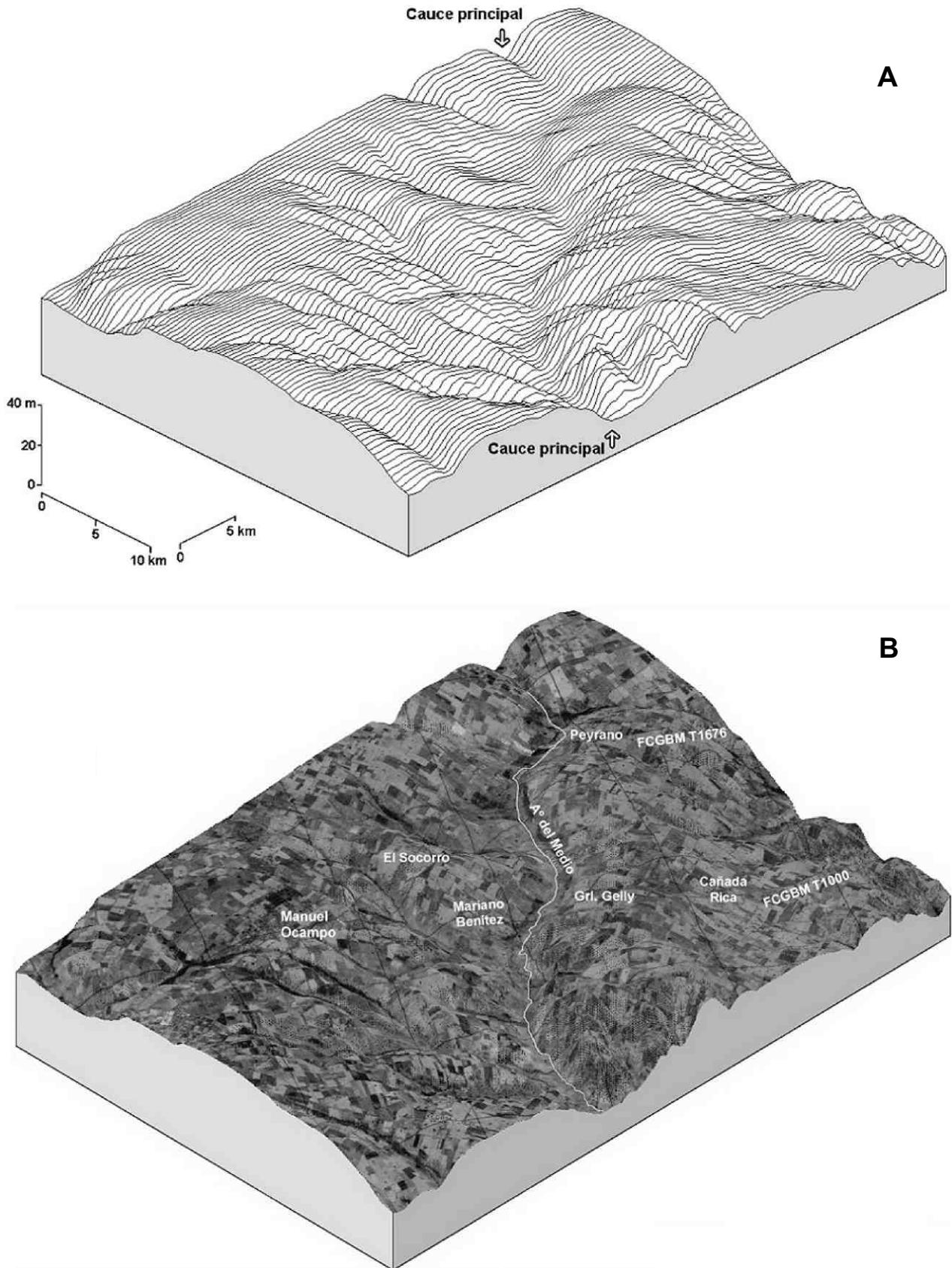
**Figura 13.** Diagrama-bloque ortográfico del relieve del área de la cuenca del Arroyo del Medio realizado con perfiles proyectados. Realizado a partir del modelo digital de elevaciones del terreno. Exageración vertical 150X. Perfiles trazados en dirección SSE-NNW. Vista desde el ESE (acimut = 111°) a 30° de elevación.



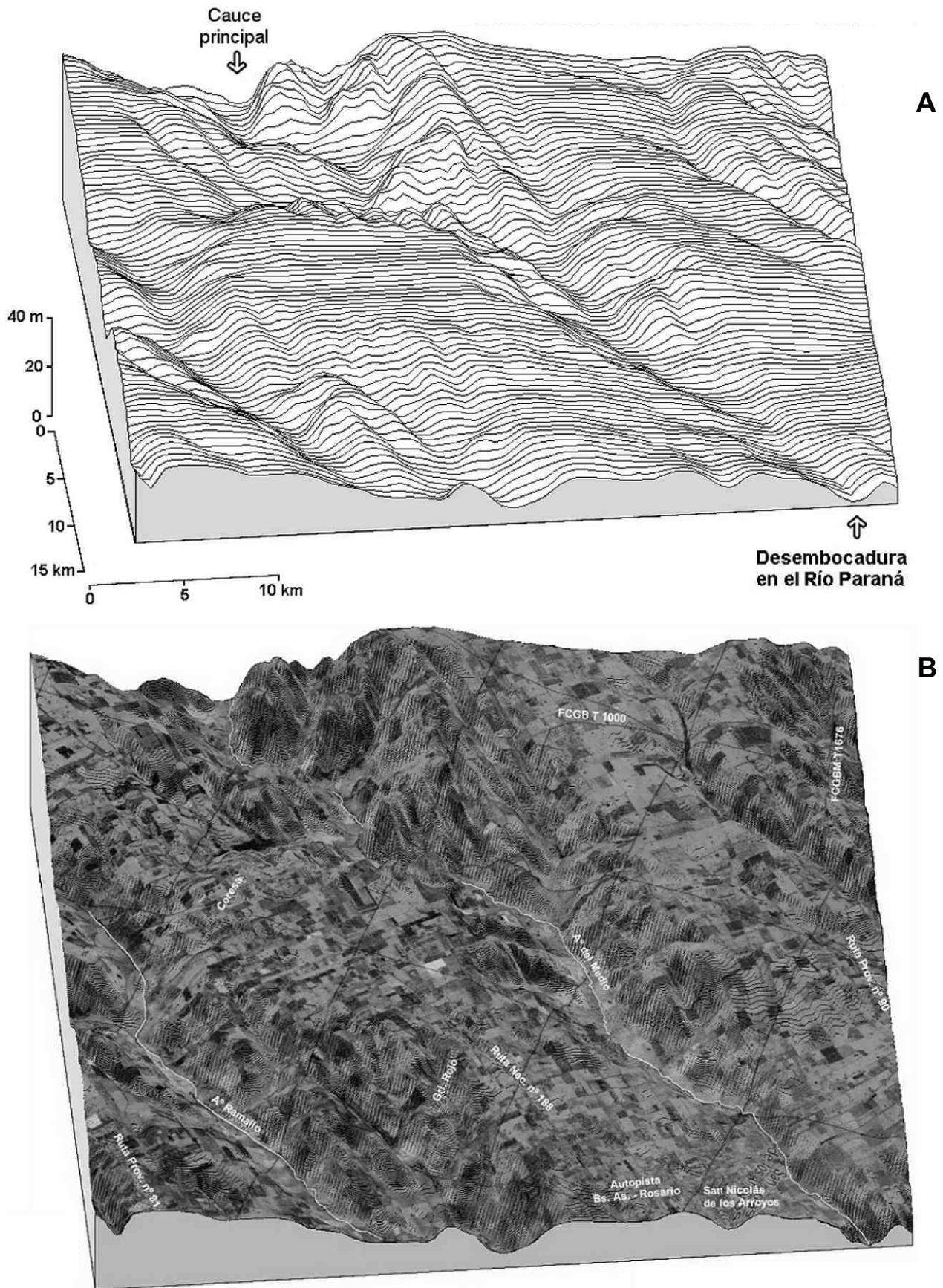
**Figura 14.** Diagrama-bloque ortográfico del relieve del área de la cuenca del Arroyo del Medio vestido con imagen satelitaria. Realizado a partir del modelo digital de elevaciones y de sector de carta imagen satelitaria. Exageración vertical = 150X.



**Figura 15.** Diagramas-bloque de la parte superior de la cuenca del Arroyo del Medio. **A:** Con perfiles trazados en la dirección SSE-NNW, vista desde el ENE (acimut = 72°), a 30° de elevación; exageración vertical = 150X. **B:** Vestido con sector de carta-imagen satelitaria.



**Figura 16.** Diagramas-bloque de la parte media de la cuenca del Arroyo del Medio. **A:** Con perfiles trazados en la dirección SSE-NNW, vista desde el ESE (acimut = 111°), a 30° de elevación; exageración vertical = 150X. **B:** Vestido con sector de carta-imagen satelitaria.



**Figura 17.** Diagramas-bloque de la parte inferior de la cuenca del Arroyo del Medio. **A:** Con perfiles trazados en la dirección SSE-NNW, vista desde el ESE (acimut = 111°), a 30° de elevación; exageración vertical = 150X. **B:** Vestido con sector de carta-imagen satelitaria.

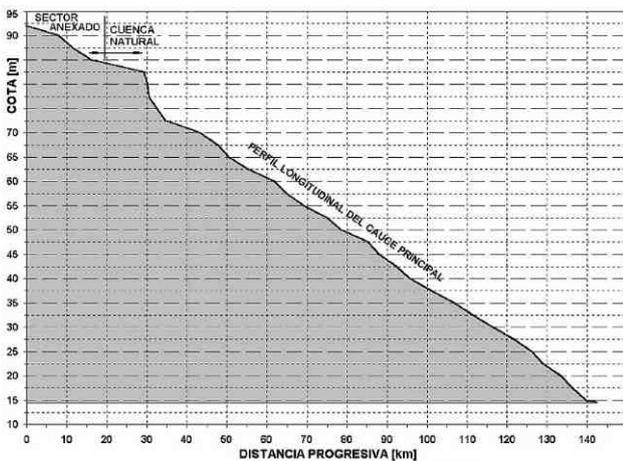


Figura 18. Perfil longitudinal del cauce principal del Arroyo del Medio.

desembocadura. El hecho de que el cauce del Arroyo del Medio lo presente rectilíneo por más de 100 km (gradiente general prácticamente uniforme rondando los 56 cm por cada 1 km), supone una falta grande de equilibrio del sistema geomórfico e indicaría que el mismo está al comienzo de un período de reajuste, luego de los eventos neotectónicos que produjeron cambios de magnitud en el relieve.

La identificación y delimitación de áreas cuya morfología hace que sean anegadizas, en particular los distintos lechos de inundación de los arroyos, constituye un tema de relevante importancia práctica. La imagen satelitaria que se dispone, es idónea para estas tareas dado que fue registrada durante un período de máximas precipitaciones pluviales, aunque se deben tener presentes las limitaciones que su resolución espacial de 180 m imponen a los resultados, cada elemento de imagen posee un área de  $3.24(10^4) \text{ m}^2$ . Se procesaron digitalmente con software de desarrollo propio las bandas que componen la imagen satelitaria (aislando el sector que incluye a la cuenca del Arroyo del Medio y partes de sus vecinas), obteniendo una serie de modelos relacionados con los propósitos antes expresados, de entre los cuales se escogieron los siguientes, para ser incluidos en esta presentación:

(1) Composición "falso color típico" (Fig. 20A). Previo realce de contraste lineal con 0.5% de saturación en los dos extremos del rango [0-255], se compusieron las bandas 2 ( $\lambda$ : 0.52 – 0.50 m), 3 ( $\lambda$ : 0.63 – 0.69 m) y 4 ( $\lambda$ : 0.76 – 0.90 m), asignándoles los colores azul, verde y rojo, respectivamente. Este modelo, cuyo tipo es de amplia utilización y que exhibe codificación cromática similar a la de la fotografía aérea infrarroja, se adjunta a modo de referencia general. Además, presenta aceptable definición de algunas áreas afectadas por anegamiento, en particular aquéllas que aparecen con tonalidades muy oscuras, que pueden asociarse con las llanuras de inundación ordinarias de los arroyos. La vegetación, en general cultivos, se muestra con tonalidades rojizas.

(2) Composición "seudo color normal" (Fig. 20B). Las bandas 1 ( $\lambda$ : 0.45 – 0.52 m), 2 ( $\lambda$ : 0.52 – 0.50 m) y 3 ( $\lambda$ : 0.63 – 0.69 m) se procesaron con realce de contraste gaussiano y se las compuso asignándoles los colores azul, verde y rojo. Por último, el compuesto obtenido fue tratado con un filtro de pasa-altos

(afilado) para reforzar los contornos entre áreas homogéneas, evidenciando las discontinuidades. Este producto demostró poseer buenas características para discriminar las áreas que sufrieron máximos anegamientos, especialmente las llanuras de inundación extraordinarias de los arroyos, que aparecen bien definidas, exhibiendo una tonalidad media con aspecto verdoso. Las áreas con gran contenido de humedad o anegadas se muestran con tonos que varían desde violáceos hasta negruzcos.

(3) Banda infrarroja (Fig. 19). La banda 5 ( $\lambda$ : 1.55 – 1.75 m) fue tratada con expansión de contraste por eualización de histograma y posteriormente con un filtro de pasa-altos. Esta imagen es excelente para separar las áreas que poseen distinto grado de contenido de humedad, hasta llegar a las anegadas. Ello permite observar los cambios de anchura en los lechos ordinarios de inundación y los cauces de mayor dimensión de los arroyos (con agua escurriendo) y, en particular, reconocer aquellos cambios que indican los tramos donde ellos se encajan.

(4) Segunda componente principal con cortes de densidad selectivos (Fig. 21A). Se realizó el análisis de componentes principales con las cinco bandas disponibles, sin estandarizarlas. Se escogió el modelo ráster correspondiente a la segunda componente principal (que toma en cuenta el 12.4% de la variancia total), debido a que el producto pseudoicónico generado a partir de ella muestra una reducida gama de tonalidades de gris -bien separables del resto- que se asocian con las áreas que sufrieron el máximo anegamiento. Se realizaron cortes de densidad tonal sobre dichas áreas, asignándoles el color blanco para una mejor visualización. De esta manera, aparecen bien delimitadas las llanuras de inundación extraordinarias de los arroyos.

(5) Modelo clasificatorio de estadios de anegamiento obtenido por procesamiento múltiple (Fig. 21B). Tomando en cuenta la circunstancia de que la imagen fue registrada poco tiempo después de los máximos anegamientos, que influyeron sobre la vegetación de manera significativa y diferencial de acuerdo con el período de afectación, se obtuvo el índice de vegetación NDVI (Guyot & Gu 1994), base del modelo temático realizado. Con posterioridad, se clasificó el índice en cinco estadios a partir del rango y forma de variación de los valores exhibidos en las áreas que estuvieron inundadas. Se terminó de elaborar el modelo realizando reemplazo cromático en los sectores correspondientes a las diferentes clases.

## MORFOMETRÍA

Este apartado trata aspectos de la descripción cuantitativa de los rasgos morfológicos presentes en el área de  $5551.728 \text{ km}^2$  cubierta por el modelo de elevaciones del terreno elaborado, que incluye a la cuenca del Arroyo del Medio. También se presentan sólo algunos de los resultados de una serie de análisis cuantitativos realizados sobre ésta. La cuenca hidrográfica constituye una unidad, tanto en su geometría como en los procesos que se desarrollan en ella y que por consiguiente es posible expresar en forma numérica sus propiedades geométricas y demás elementos que puedan servir de base para comprender su evolución y dinámica. La obtención de parámetros morfométricos -información cuantitativa precisa- permite caracterizar las cuencas hidrográficas. La utilización de dichos parámetros, importantes de por sí en la descripción, y su correlación con otros atributos de las cuencas contribuye al

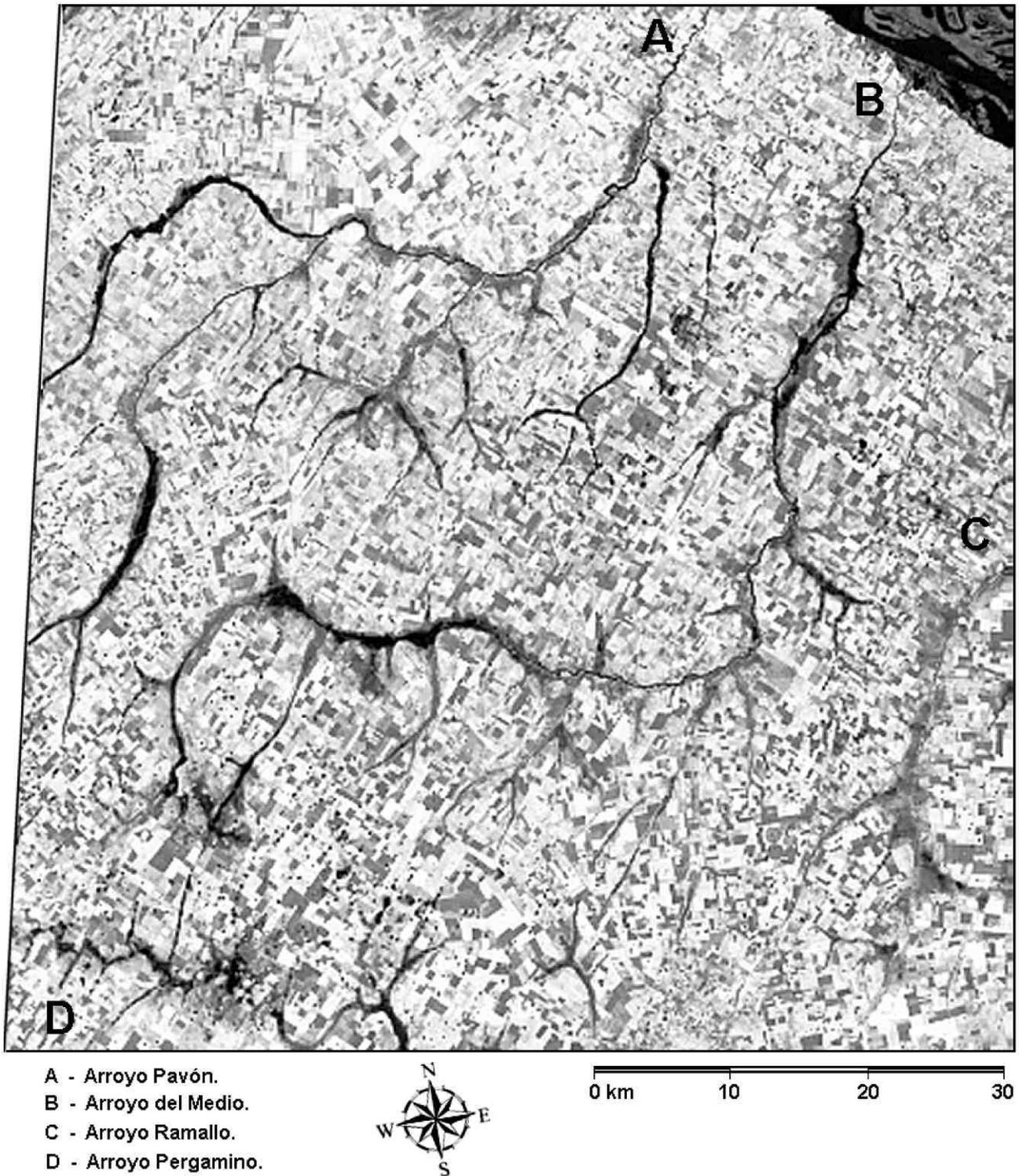


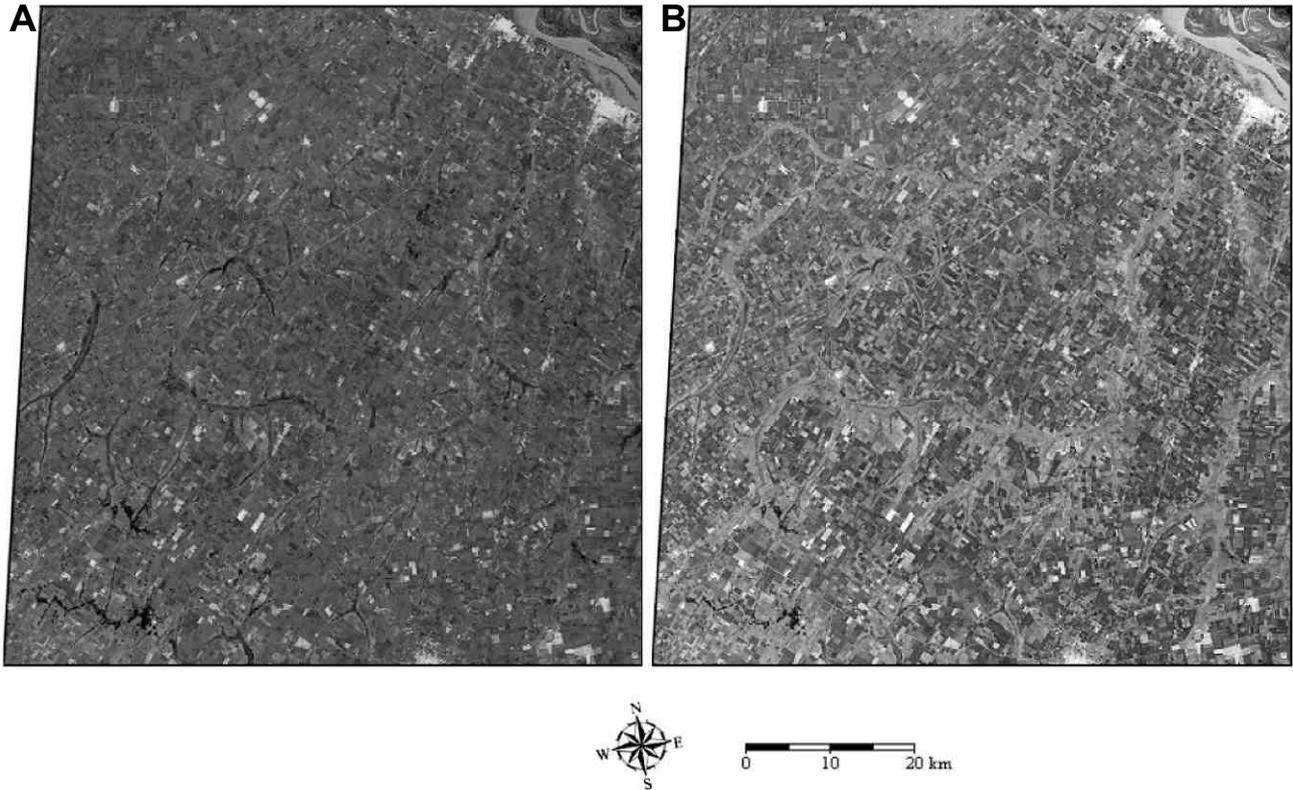
Figura 19. Banda 5 de la subescena satelital analizada  $\lambda$ : 1.55 - 1.75 micrometros).

conocimiento y evaluación del funcionamiento y tendencias en las mismas, como ser en hidrología, erosión y sedimentación.

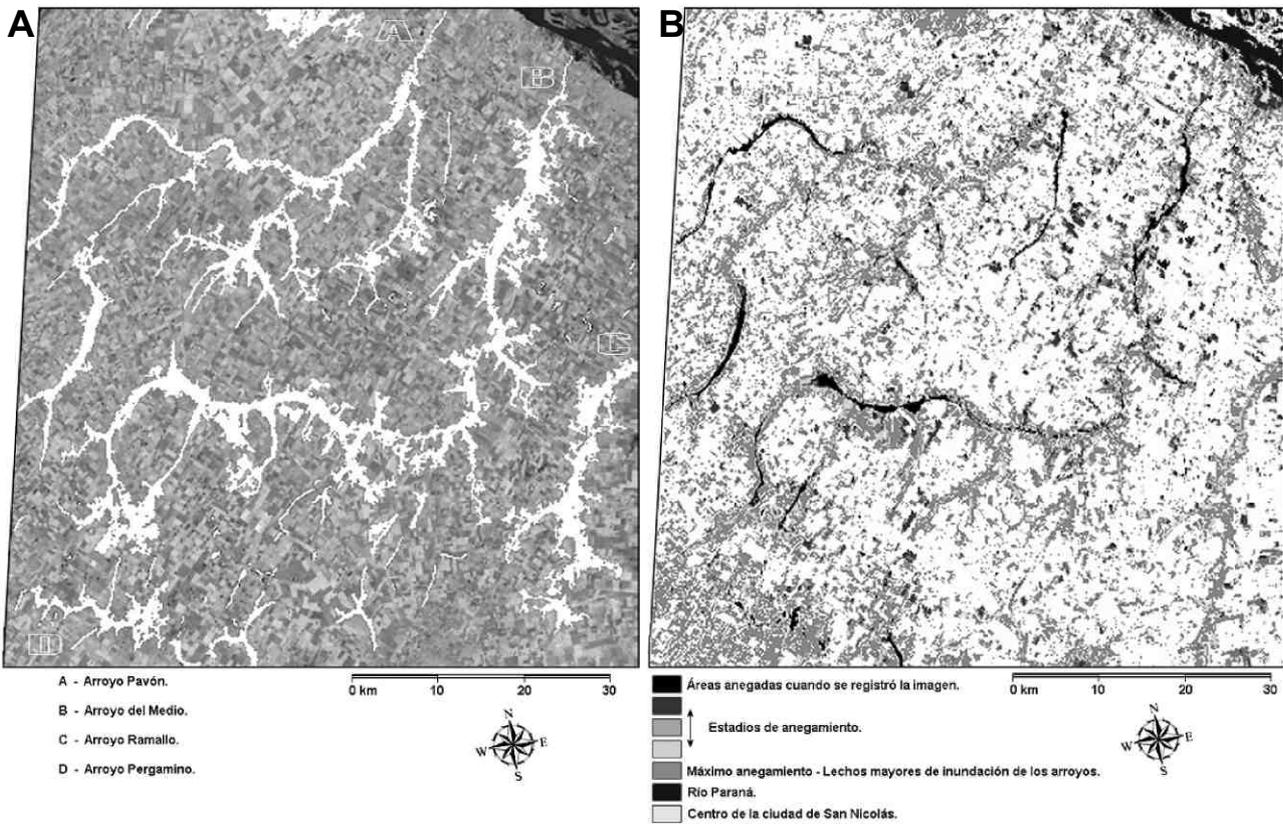
**Aspectos metodológicos.** La información de base para la confección de lo elaborado en este tema fue extraída fundamentalmente de las cartas topográficas en escala 1:50,000, con equidistancia entre curvas de nivel de 2.50 m, enumeradas en la Fig. 3.

Además, se utilizaron fotografías aéreas en escala

1:20,000 y mosaicos aerofotográficos en escala 1:50,000, realizados a partir de reducción de las primeras, exclusivamente para una mejor definición de las redes de avenamiento. Sobre un mosaico controlado, armado con las hojas topográficas anteriormente mencionadas, se confeccionó una carta de compilación de la altimetría representada por las curvas de nivel, restringiendo su área a un rectángulo orientado según el eje longitudinal de la cuenca del Arroyo del Medio, de tal forma que la incluyera totalmente. La carta de compilación



**Figura 20.** Composición color de bandas de la imagen satelital del área del Arroyo del Medio. **A.** Composición falso color con realce de contraste lineal y 0.5% de saturación en los extremos del rango. **B.** Composición color normal con realce de contraste gaussiano y afilado.



**Figura 21. A:** Lechos mayores de inundación (áreas blancas) del Arroyo del Medio y de partes de los arroyos vecinos y otras zonas que estuvieron anegadas. Modelo obtenido a partir de la segunda componente principal de la imagen satelitaria aplicando cortes de densidad a las áreas afectadas por anegamiento. **B.** Estadios de anegamiento de la Cuenca del Arroyo del Medio y en partes de las cuencas vecinas; lechos mayores de inundación de los arroyos. Modelo obtenido por procesamiento múltiple de imagen satelitaria.

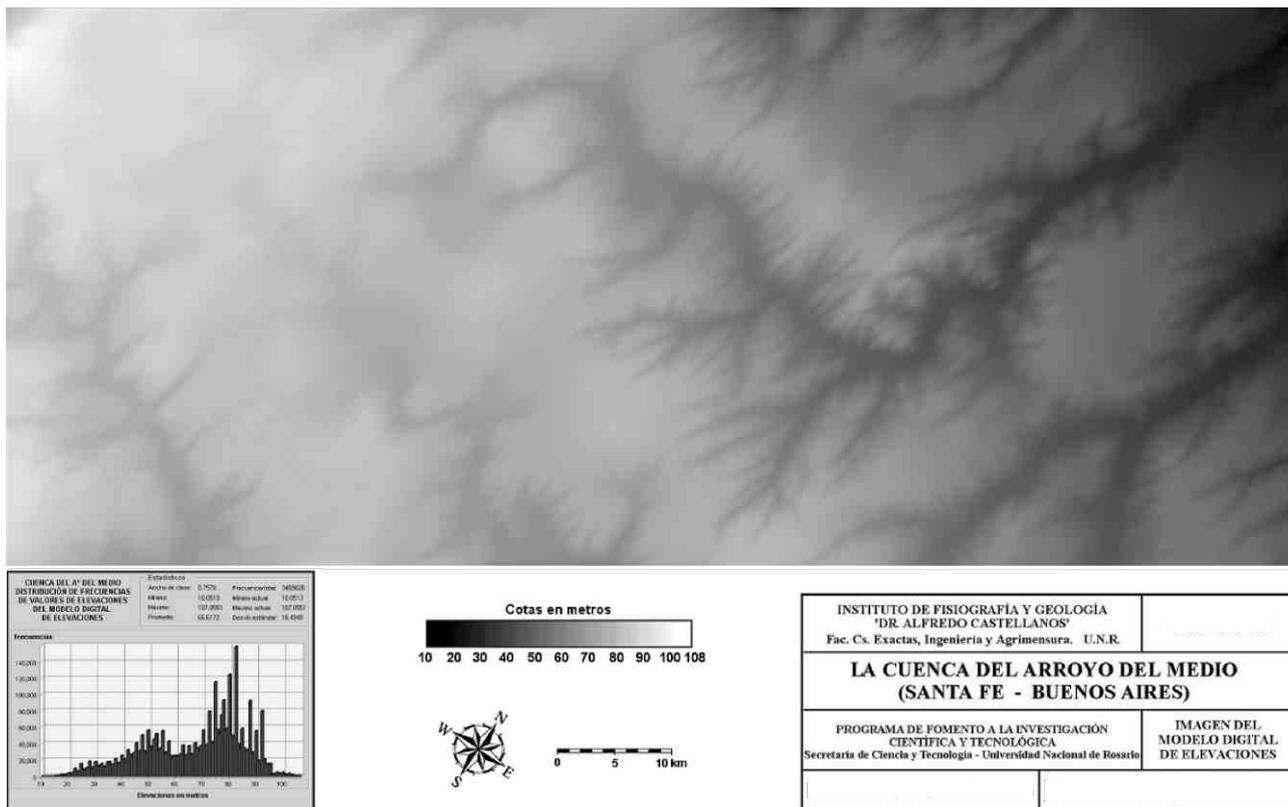


Figura 22. Imagen del modelo digital de elevaciones del área de la cuenca del Arroyo del Medio.

(Fig. 11), fue utilizada de dos maneras: primero, como modelo analógico que permitió definir las redes de avenamiento, delimitar cuenca y subcuencas y tomar medidas de longitudes y áreas sobre él y, segundo, como información planialtimétrica para la construcción del modelo digital de elevaciones del terreno. Este modelo fue obtenido utilizando un método y software de desarrollo propio y cubre un área de 5551.728 km<sup>2</sup> (112.84 km x 49.20 km) con resolución espacial de 40 m, soportado por una matriz de números reales de 2821 filas y 1230 columnas.

En la Fig. 22 se presenta una imagen del modelo digital de elevaciones del terreno del área de estudio, en la que se representa la altimetría con 256 tonalidades de gris diferentes. La Fig. 23 exhibe un sombreado plástico del relieve realizado también a partir del modelo digital de elevaciones del área de la cuenca del Arroyo del Medio; la fuente de iluminación está situada en el sur a 30° de elevación. Para la medición de longitudes se utilizaron reglas, opisómetro y mayormente tableta digitalizadora en combinación con un programa anteriormente confeccionado (Racca 1994). La medición de áreas sobre los modelos analógicos fue realizada también con tableta digitalizadora y programa propio, técnica que permitió obtener una precisión mayor (alrededor de diez veces) que la tradicional utilizando planímetro compensador. Para la obtención de las leyes de Horton-Schumm, de los resultados de los análisis de Yang y planimétrico utilizando la lemniscata asociada y para el cálculo de otros parámetros morfométricos, se usó la actualización de un programa ya elaborado (Racca 1984). Los análisis hipsométrico y de frecuencia altimétrica y el cálculo de los valores que permitieron construir la curva de pendientes medias fueron realizados con una técnica que utiliza como fuente de datos los modelos digitales de elevaciones de terreno y de gradientes de

pendientes, inversa a la tradicional, y que fuera desarrollada - junto con el programa correspondiente- contemporáneamente con la ejecución del presente trabajo (Racca 2007b). La carta de gradientes de pendientes se realizó a partir de la actualización de una técnica y del programa informático previamente desarrollados, operando sobre el modelo digital de elevaciones del terreno.

**Leyes de composición del drenaje de Horton-Schumm.** El primer paso previo a la realización de este análisis, es la determinación de las redes de avenamiento de la cuenca, que se ejecutó de acuerdo con lo ya mencionado en el párrafo anterior. El segundo paso consiste en jerarquizar los segmentos de las redes; se lo hizo tomando en cuenta el ordenamiento propuesto por Horton (1945) y modificado por Strahler (1957), que otorga el orden uno a los tributarios menores o iniciales, cuando dos segmentos de orden uno se juntan dan origen a uno de orden dos, cuando dos de orden dos confluyen, generan uno de orden tres y así sucesivamente. El tercer paso previo involucra el trazado de las divisorias de aguas de la cuenca y de las subcuencas de los segmentos correspondientes a los diferentes órdenes. Por último, se deben contar y/o medir y/o calcular los elementos que intervendrán en la obtención de las leyes de composición del drenaje (número de segmentos, sus longitudes, sus pendientes y las áreas de cuenca y de subcuencas). La carta que incluye la red de avenamiento de la cuenca del Arroyo del Medio y su jerarquización se presenta en la Fig. 24 y la que corresponde a la delimitación de la cuenca y de las subcuencas de menor orden consta en la Fig. 25. Por otra parte, y de manera experimental, se efectuó un procesamiento para realizar la extracción y el trazado automático de las redes de avenamiento del área, tomando como base el modelo digital de elevaciones del terreno construido, obteniendo regulares



Figura 23. Sombreado plástico del relieve del área de la cuenca del Arroyo del Medio, obtenido del modelo digital de elevaciones.

resultados (Fig. 26). No obstante, sólo se tomó en cuenta la red definida por el método manual tradicional para producir los análisis subsecuentes.

Horton (1945) estableció que el número, las longitudes promedio y las pendientes medias de los cursos de cada orden en determinada cuenca hidrográfica, respectivamente, tienden a formar series geométricas y sugiere que lo mismo debería ocurrir con las áreas promedio de las subcuencas y de la cuenca. Schumm (1956) comprueba experimentalmente que esta última circunstancia se cumple y formula la cuarta ley de composición del drenaje. En los casos de la primera y tercera ley (número y pendientes promedio de los segmentos de distinto orden) son series inversas, mientras que en los casos de la segunda y cuarta ley (longitudes promedio de los segmentos y áreas medias de las subcuencas de diferente orden) las series son directas. Apartamientos significativos de las tendencias marcadas por las leyes revelan características particulares o anomalías en las redes de avenamiento, motivadas por algún rasgo y/o evento natural o artificial. El resumen de los valores obtenidos para el establecimiento de las leyes de Horton-Schumm, correspondientes a la cuenca total del Arroyo del Medio, incluyendo al sector anexado por canalizaciones, se muestra en la Tabla 1. Por razones de espacio, el listado completo de los valores y su análisis estadístico, como asimismo el análisis individual para cada una de las subcuencas y sus relaciones zonales, con las respectivas conclusiones, se presentarán en otra oportunidad. Se emplea la expresión logarítmica de las series en el ajuste por el método de mínimos cuadrados, para que el resultado de las regresiones sean líneas rectas representables en papel semilogarítmico. Las expresiones matemáticas de las series representativas de las leyes de composición del drenaje correspondientes a la cuenca total del

Arroyo del Medio se presentan en la Tabla 2 y su graficado en la Fig. 27.

Aparte de la descripción precisa de la topología de la red aportada por las leyes de composición del drenaje, surgen del análisis realizado anomalías que indican que el sistema geomorfológico en la cuenca del Medio -del cual las redes de avenamiento forman parte de su estructura- está con falta de equilibrio dinámico, como consecuencia de los eventos neotectónicos y en menor proporción debido al anexamiento del sector drenado por canalizaciones, a la cuenca natural. Se arribó a idénticas conclusiones cuando el autor de esta presentación realizó el análisis en la cuenca del Arroyo Pavón, vecina al norte de la del Arroyo del Medio, que posee jerarquía similar (Pasotti et al. 1993), lo que reafirmaría el hecho de que también el sistema geomorfológico se encuentra en desequilibrio a nivel regional.

Se pueden mencionar en principio, las anomalías vinculadas con la segunda y con la tercera ley, que involucran a las longitudes y pendientes promedio de los cauces, respectivamente; si se observan las gráficas correspondientes en la Fig. 27, se pueden percibir los apartamientos de los puntos representativos de los datos respecto de la línea de tendencia, en especial, en los cauces de cuarto orden. Además, el valor de la relación de bifurcación, que define el grado de ramificación de la red, es extremadamente elevado, sólo comparable con el de redes en áreas de "badlands" (Schumm 1956). Este parámetro crece a medida que mayor número de cursos confluyen directamente a colectores sin formar cauces de orden superior. Horton (1945) indica valores de relación de bifurcación que varían desde aproximadamente 2 para cuencas de poco gradiente hasta 3 o 4 para cuencas de montaña o altamente disectadas, mientras que Strahler (1957) afirma que es altamente estable y muestra pequeño rango de variación de

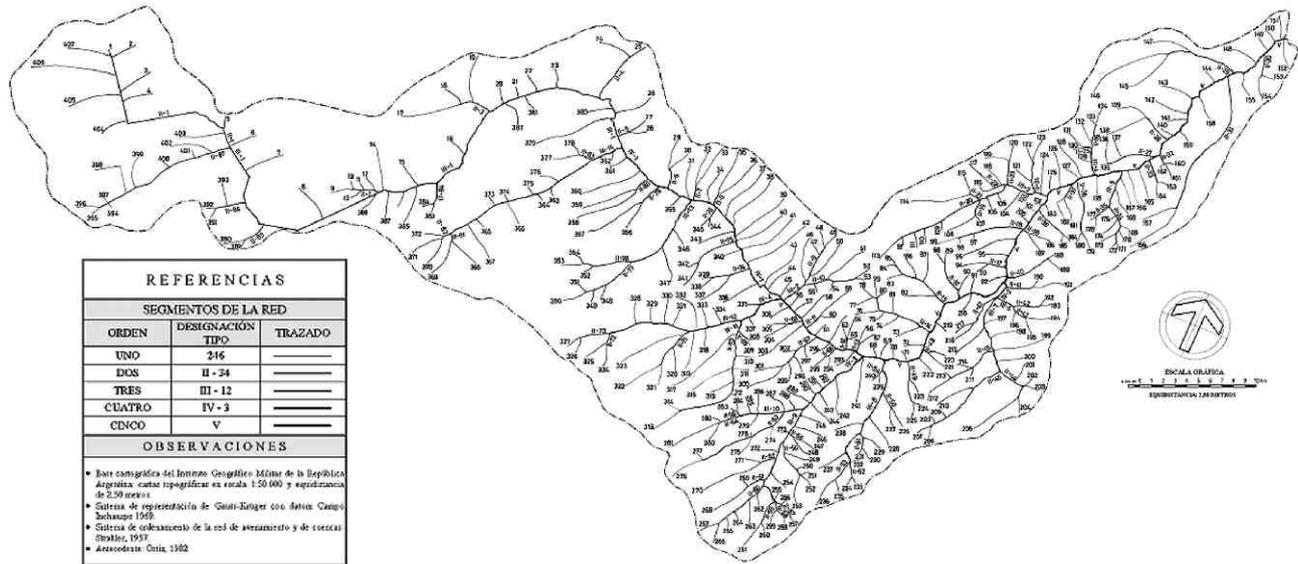


Figura 24. Red de avenamiento de la cuenca del Arroyo del Medio, jerarquizada según Horton-Schumm.

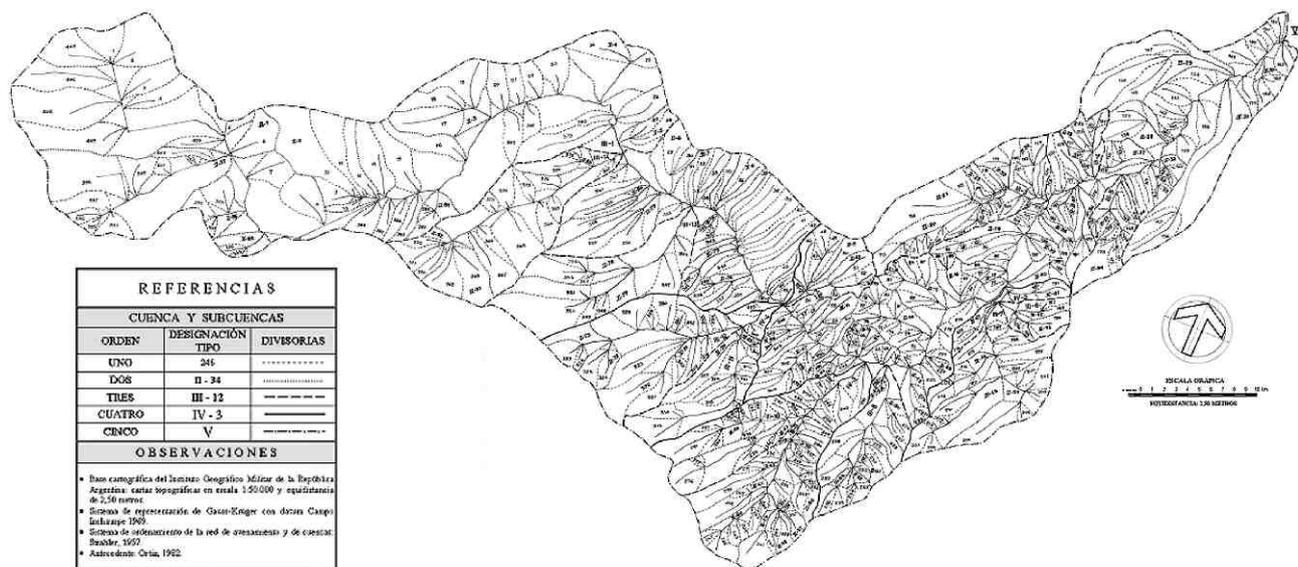


Figura 25. Delimitación de la cuenca y de las subcuencas del Arroyo del Medio.

región en región o de ambiente en ambiente, excepto donde dominan poderosos controles geológicos.

**Parámetros complementarios.** Se consideraron:

(1) Parámetro  $\rho$  – Es el cociente entre las relaciones de longitudes y de bifurcación (Horton 1945); posee importancia en la estimación de la capacidad de almacenamiento hídrico en la red, que a su vez es elemento fundamental en la modelación de intensidades de cresta de inundación. Si es elevado, significa que la mayor longitud de los cauces de orden superior permitirá un mayor almacenamiento hídrico durante las crecientes, atenuando los efectos de las descargas elevadas; si es bajo, se presentará con mayor rapidez el caudal de pico en la desembocadura. Para la cuenca total del Arroyo del Medio el

valor de  $\rho$  es 0.495, valor muy bajo, rondando el límite inferior de los obtenidos por diferentes autores en distintos ambientes.

(2) Densidad de drenaje (Dd) – Cociente entre la longitud total de cauces y el área de la cuenca o longitud promedio de cauces por unidad de área, índice que expresa uno de los aspectos de la textura de avenamiento (Horton 1945). En la cuenca total del Arroyo del Medio el valor de Dd es 0.572 km/km<sup>2</sup>, indicando una textura de avenamiento muy gruesa.

(3) Frecuencia de cauces (Fc) – Cociente entre el número total de cursos de agua y el área de la cuenca o cantidad promedio de cauces por unidad de área (Horton 1945). En la cuenca total del Arroyo del Medio el valor de Fc es 0.227 cauce/km<sup>2</sup>, indicando también una textura de avenamiento muy gruesa.

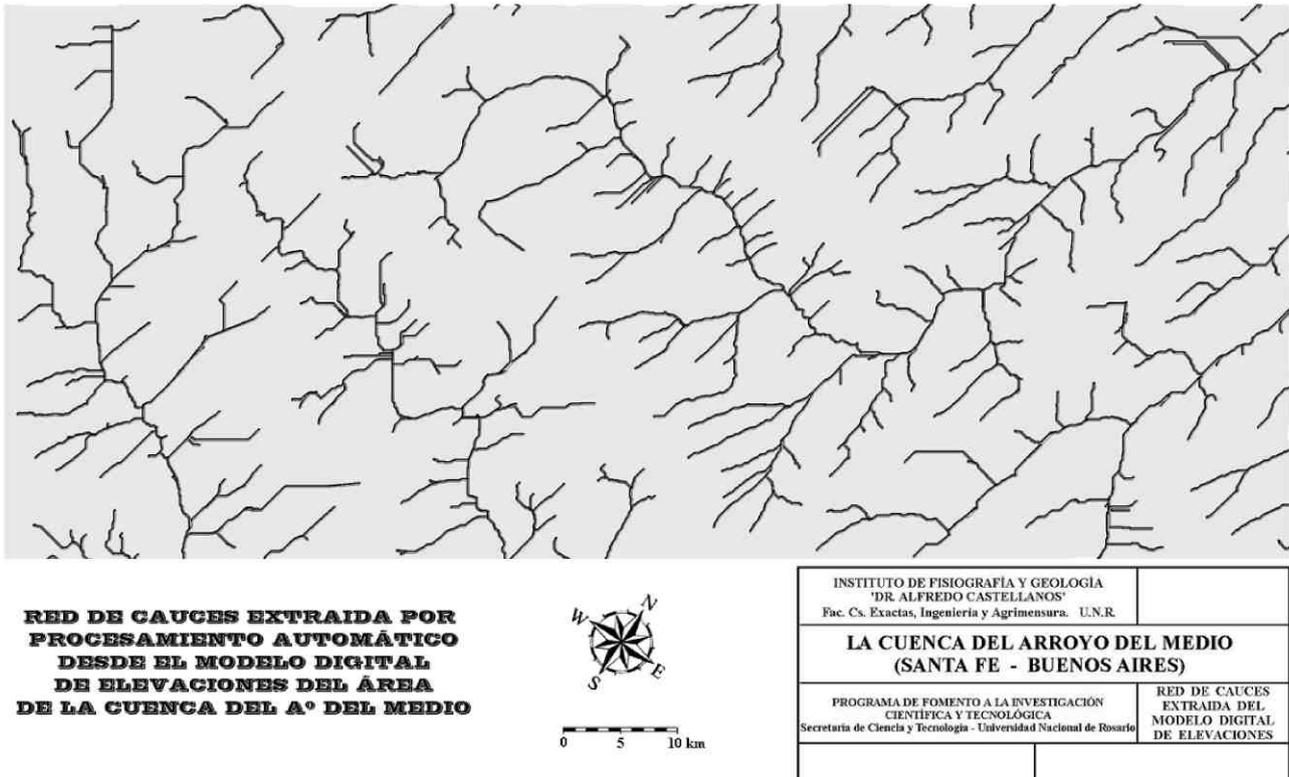


Figura 26. Red de cauces extraída por procesamiento automático desde el modelo digital de elevaciones del área de la cuenca del Arroyo del Medio.

(4) Longitud de flujo no encauzado ( $L_0$ ) – Longitud promedio del flujo de agua sobre el terreno antes de que se concentre en cauces definidos. Es sinónimo de longitud promedio del escurrimiento laminar o mantiforme y función de la densidad de drenaje, de la pendiente promedio de los cauces y de la pendiente general de la cuenca (Horton 1945). En la cuenca total del Arroyo del Medio el valor de  $L_0$  es 0.874 km.

(5) Constante de mantenimiento de cauces ( $C_c$ ) – Recíproca de la densidad de drenaje y expresa el área promedio necesaria para el desarrollo y mantenimiento de un cauce de longitud unitaria (Schumm 1956). Posee importancia en comparaciones de erodabilidad superficial o de otros factores que afectan la erosión y desarrollo de la red de drenaje. En la cuenca total del Arroyo del Medio el valor de  $C_c$  es 1.749 km<sup>2</sup>/km.

**Geometría de la cuenca.** Se consideraron:

(1) Área de la cuenca en proyección horizontal ( $A$ ) – Para la cuenca total  $A_t$  es 2258.2 km<sup>2</sup>, para la cuenca natural  $A$  es 1916.8 km<sup>2</sup>, mientras que para el sector anexado por canalizaciones  $A_a$  es 341.4 km<sup>2</sup>.

(2) Perímetro de la cuenca en proyección horizontal ( $P_m$ ) – Para la cuenca total  $P_{mt}$  es 299.6 km, para la cuenca natural  $P_m$  es 234.9 km, mientras que para el sector anexado  $P_{ma}$  es 92.5 km.

(3) Largo del eje longitudinal de la cuenca ( $L$ ) – Para la cuenca total  $L_t$  es 109.9 km, para la cuenca natural  $L$  es 87.3 km y para el sector anexado  $L_a$  es 29.2 km. Las longitudes se consideraron, al tener la cuenca dos quiebres en planta, sobre un eje recto pasante por el punto distal en las cabeceras y, en el otro extremo, por la desembocadura.

(4) Ancho máximo perpendicular al eje longitudinal ( $W_c$ ) – Tanto para la cuenca total como para la natural se consideró el ancho máximo normal al tramo medio del valle;  $W_c$  es 27.7 km y el que corresponde al sector anexado  $W_{ca}$  es 19.3 km.

(5) Relación entre largo del eje y el ancho máximo ( $L/W_c$ ) – Para la cuenca total es 3.968, para la natural 3.152 y para el sector anexado por canalizaciones 1.513.

**Parámetros que incluyen aspectos altimétricos.** Se consideraron:

(1) Amplitud de relieve de la cuenca  $H$  – Diferencia de cota entre el punto más alto y el más bajo de la cuenca. Para la cuenca total del Arroyo del Medio, incluyendo al sector anexado,  $H_t$  es 93 m, para la cuenca natural  $H$  es 76 m, mientras que para el sector anexado  $H_a$  es 25 m.

(2) Relación de relieve ( $R_h$ ) – Propiedad adimensional que se obtiene realizando el cociente entre la amplitud del relieve de la cuenca y el largo del eje longitudinal (Schumm 1956). Exhibe buena correlación con la densidad de drenaje, gradiente promedio del curso principal, pendiente máxima promedio, relación de elongación y pérdida anual de sedimentos. En este caso se consideraron los largos de los ejes según los diferentes tramos del trazado longitudinal quebrado ( $L_t' = 125.7$  km;  $L' = 101.8$  km;  $L_a' = L_a = 29.2$  km); para la cuenca total  $R_{ht}$  es 0.740, para la natural  $R_h$  es 0.747 y para el sector anexado por canalizaciones  $R_{ha}$  es 0.856.

(3) Altitud media respecto del nivel del mar ( $H_m$ ) – Al disponerse del modelo digital de elevaciones del terreno, se la obtuvo a partir de él, promediando las altitudes de todos los elementos pertenecientes a la cuenca total (Racca 2007b); el

**Tabla 1.** Resumen de valores utilizados para la obtención de las leyes de Horton-Schumm.

	ORDEN 1	ORDEN 2	ORDEN 3	ORDEN 4	ORDEN 5
Número de segmentos	407	87	14	4	1
Longitud media [km]	1.9736	2.9241	9.6214	8.6500	64.5000
Pendiente media [‰]	5.2085	2.5897	1.4857	0.6250	0.5000
Área media subcuencas [km <sup>2</sup> ]	3.7622	16.0904	105.2171	381.1750	2258.2000

**Tabla 2.** Leyes de composición del drenaje de la cuenca total del arroyo del medio.

ATRIBUTO	LEY	BONDAD DE AJUSTE	RELACIÓN
Número de cauces	$\ln Y = 7.4292 - 1.5097 X$ $Y = (1684.4381) 0.2210^X$	R = -0.998 D = 0.996 T = -27.041 (3 GL) E.T.Est. = 0,177 UL	de bifurcación 4.525 ponderada = 4.598
Longitudes promedio de cauces	$\ln Y = -0.3492 + 0.8058 X$ $Y = (0.7052) 2.2385^X$	R = 0.939 D = 0,881 T = 4.720 (3 GL) E.T.Est. = 0.540 UL	de longitudes 2.239 ponderada = 3.282
Pendientes promedio de cauces	$\ln Y = 2.1994 - 0.6108 X$ $Y = (9.0200) 0.5429^X$	R = -0.989 D = 0.978 T = -11.644 (3 GL) E.T.Est. = 0.166 UL	de pendientes 1.842 ponderada = 1.845
Áreas promedio de subcuencas	$\ln Y = -0.3029 + 1.5960 X$ $Y = (0.7386) 4.9331^X$	R = 0.999 D = 0.998 T = 34.668 (3 GL) E.T.Est. = 0.146 UL	de áreas 4.933 ponderada = 5.091

Y: atributo X: orden R: coeficiente de correlación D: coeficiente de determinación T: estadístico de Student  
GL: grados de libertad E.T.Est.: error típico de la estima UL: unidades logarítmicas

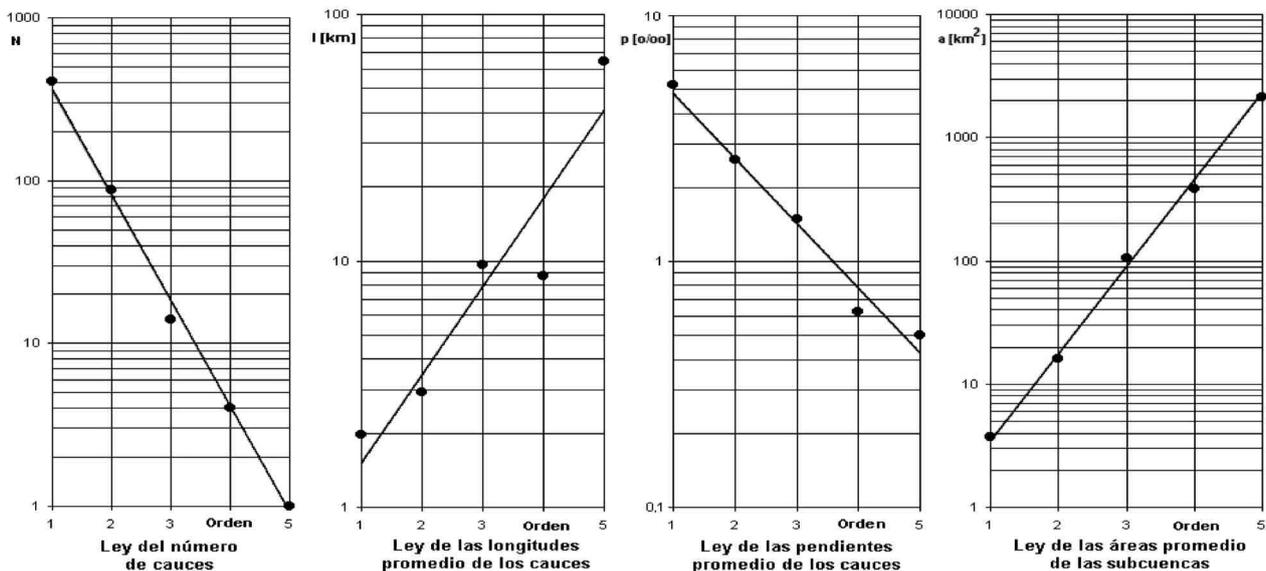
valor de Hmt es 65.93 m.

(4) Pendiente promedio o pendiente general de la cuenca (Sg) – Se la obtuvo a partir del modelo digital de gradientes, uno de los derivados del MDE, promediando los gradientes de los elementos individuales incluidos en la cuenca total (Racca 2007b); el valor de Sg es 3,404 %.

**Gradientes del cauce principal.** En Fig. 28 se presenta el perfil longitudinal del cauce principal del Arroyo del Medio, que incluye a los canales Juncal y del Medio en la cabecera de la cuenca, consignando los gradientes que corresponden a cada tramo entre isohipsas.

**Frecuencia altimétrica.** Este análisis se utiliza para describir, en altitudes sucesivas, las frecuencias de ciertos niveles, como

ser altitud de sitios, puntos más altos en mallas cuadradas de muestreo, altitudes de cumbres o la de áreas de llanos o depresiones tales como hombreras, bancos y collados. La distribución de la áreas en relación con la altitud en la cuenca total del Arroyo del Medio, se exhibe en forma de histograma en Fig. 29; para este caso se escogieron intervalos altitudinales iguales a la equidistancia entre las curvas de nivel, coincidentes con los de las cartas de base, aunque se podría haber elegido cualquier clase de intervalos altitudinales, incluso de desigual amplitud, ya que se cuenta con el modelo digital de elevaciones del terreno. A partir de él, y con un programa de elaboración propia (Racca 2007b), se obtuvo el resultado presentado en Fig. 29; en ella, se nota que la distribución es bimodal, correspondiendo la moda de las altitudes mayores al sector anexado por canalizaciones y la inferior a la cuenca natural del Arroyo del Medio.



**Figura 27.** Leyes de Horton-Schumm de la cuenca total del Arroyo del Medio.

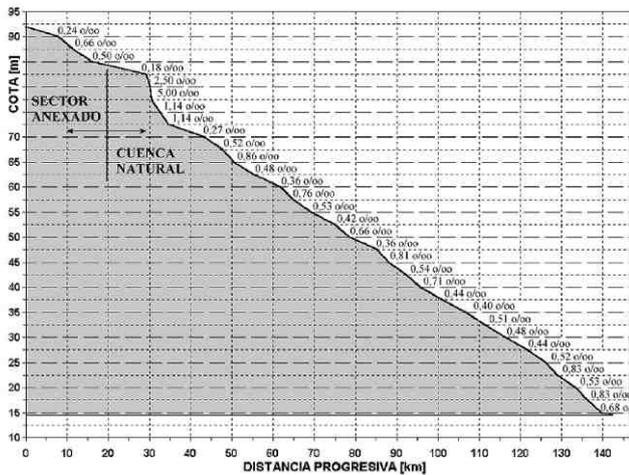


Figura 28. Pendientes del cauce principal del Arroyo del Medio incluyendo los canales.

**Curva de pendientes medias.** Permite observar la distribución de las pendientes en relación con las altitudes; las pendientes medias variarán de acuerdo con las geoformas y las características propias del sistema de avenamiento (Strahler 1952). La correspondiente a la cuenca total del Arroyo del Medio fue obtenida a partir del modelo digital de elevaciones del terreno, utilizando una técnica inversa a la tradicional y con un programa desarrollado que la implementa (Racca 2007b); la misma se exhibe en Fig. 30. Se pueden apreciar en ella varios tramos, a distintas altitudes, diferenciados por los valores de los gradientes: en el primero, entre las cotas 107 m y 95 m, el área involucrada corresponde a la fracción de ribete elevado que rodea el área hundida donde se halla la laguna Melincué, en el sector anexado por canalizaciones a la cuenca del Arroyo del Medio. A partir de allí las pendientes medias disminuyen considerablemente -en áreas que pertenecen a la parte final del sector anexado y al tramo superior del valle del Arroyo del

Medio- hasta llegar aproximadamente la cota 80 m. Desde esta última altitud y hasta la cota 35 m los gradientes medios se incrementan en gran medida, involucrando las vertientes del tramo medio del valle y de la parte inicial y media del tramo final del mismo. A partir de la cota 35 metros y hasta la finalización, las pendientes medias decrecen primero y aumentan luego en las áreas pertenecientes al tercio final del tramo inferior del valle del arroyo.

**Análisis hipsométrico.** La curva hipsométrica (Strahler 1952) permite conocer la distribución de masa en la cuenca desde arriba hacia abajo. Se obtiene colocando en las ordenadas los valores correspondientes a las diferentes alturas de la cuenca referidos a la máxima de la misma y, en las abscisas, los valores de área que se encuentran por encima de las alturas correspondientes, referidos al área total de la cuenca. De esta forma se utilizan valores relativos (porcentuales), lo que hace posible comparar curvas de diferentes cuencas, prescindiendo de las dimensiones absolutas. Normalmente su forma es sigmoideal, cóncava hacia arriba en la parte superior y convexa en la parte baja; el grado de sinuosidad es muy variable, lo mismo que la pendiente en el punto de inflexión. Cuando las curvas hipsométricas presentan variaciones, ya sea por apartarse de las teóricas o por presentar más de un punto de inflexión, ello se puede relacionar con controles tectónicos o litológicos. El valor del área relativa que yace bajo la curva (integral hipsométrica) es indicativo del estado de desarrollo de la cuenca; valores superiores al 60% indican desequilibrio manifiesto en el funcionamiento de la cuenca (juventud en el sentido davisiano), valores rondando el 47% representan equilibrio (madurez), e inferiores a 30% implican fase de "monadnock" (senectud).

La Fig. 14 exhibe la curva correspondiente a la cuenca total obtenida a partir del modelo digital de elevaciones (Racca 2007b); su parte superior presenta al comienzo elevada pendiente y a continuación marcadas irregularidades, todo ello debido a la anexión del sector drenado por canales. No existe un punto de inflexión bien definido, pero a partir de las irregularidades en el 75% de su trazado inferior la curva

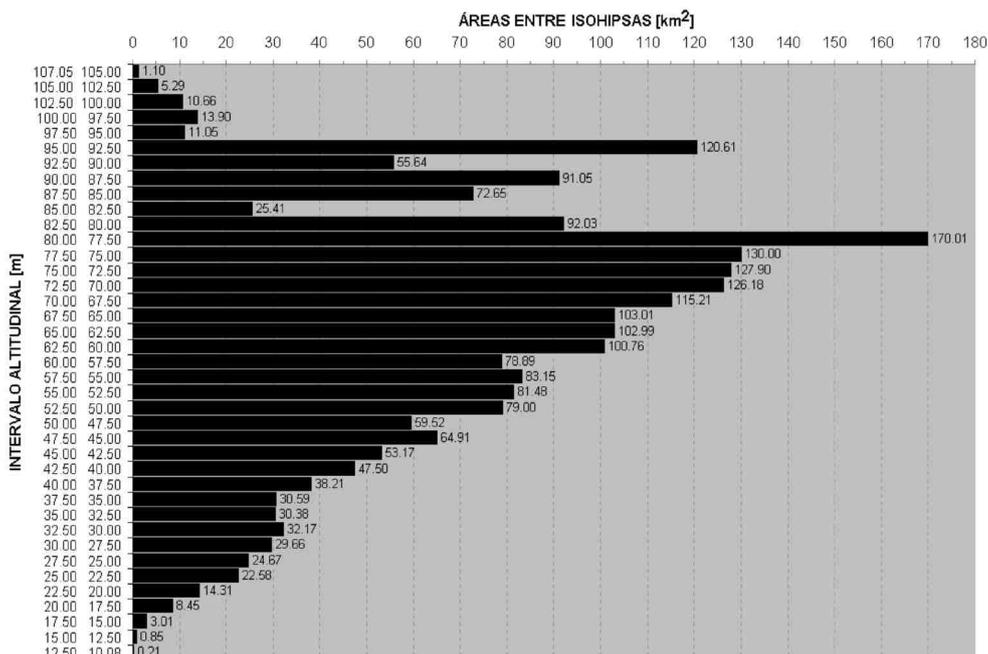


Figura 29. Frecuencia altimétrica de la cuenca del Arroyo del Medio.

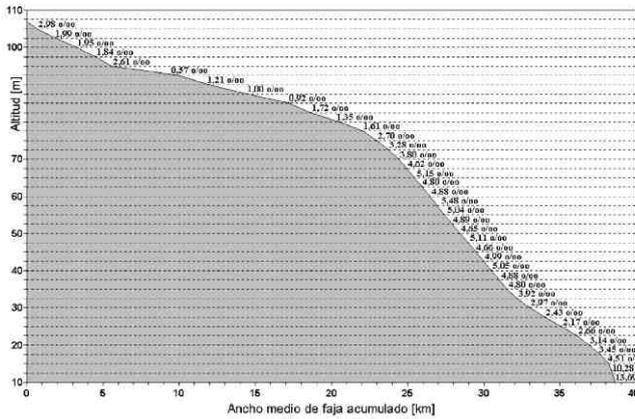


Figura 30. Curva de pendientes medias de la cuenca total del Arroyo del Medio.

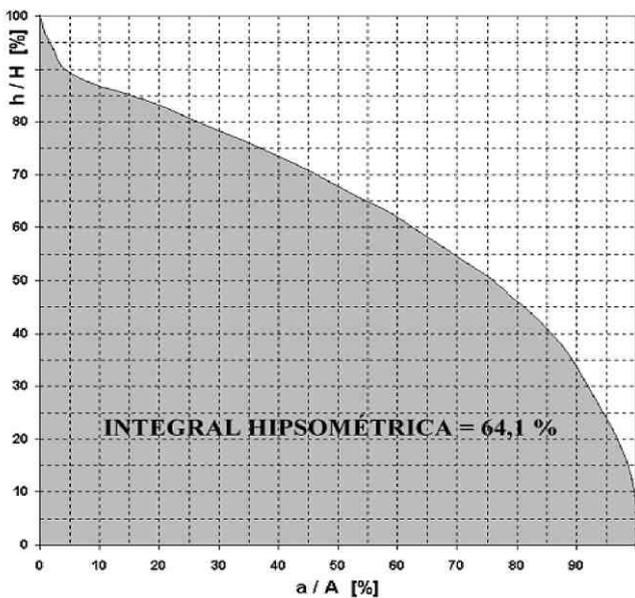


Figura 31. Curva hipsométrica de la cuenca total del Arroyo del Medio.

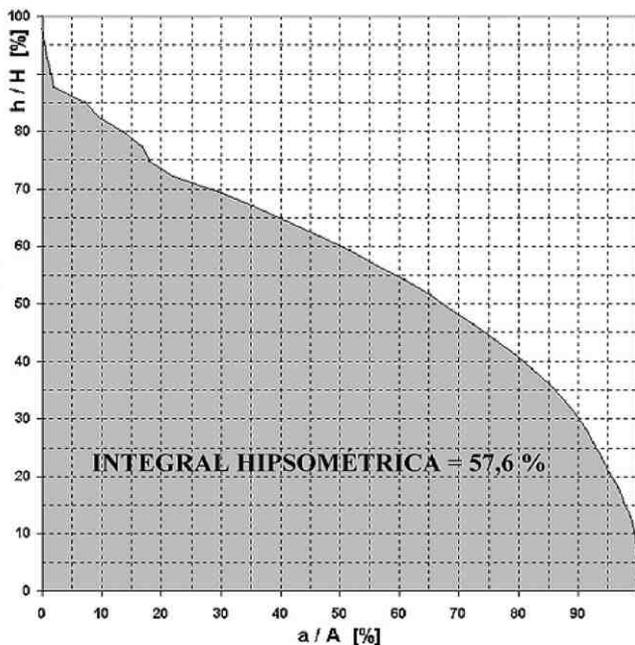


Figura 32. Curva hipsométrica de la cuenca natural del Arroyo del Medio.

muestra convexidad hacia arriba; el valor de la integral hipsométrica es elevado. Todo lo mencionado anteriormente indica un importante desequilibrio en la cuenca. En Fig. 32 consta la curva hipsométrica que se obtuvo para la cuenca natural del Arroyo del Medio. Su trazado es regular pero anómalo; luego de un pequeño tramo de gran pendiente, seguido por una corta concavidad, que corresponden a las cabeceras de la cuenca donde se halla la cubeta con forma de abanico, la curva presenta convexidad hacia arriba para el 85% restante de las áreas. Las curvas hipsométricas teóricas o "normales" y los numerosos casos presentados por diferentes autores nunca presentan tal diferencia de longitud entre el tramo cóncavo y el convexo. El muy elevado valor de la integral hipsométrica y las anomalías en el trazado de la curva, también indican una marcada falta de equilibrio en la cuenca natural.

**Análisis de Yang.** Yang (1971), por analogía con la entropía termodinámica, estableció que bajo condiciones de equilibrio dinámico, la caída media entre los cauces de dos órdenes sucesivos cualesquiera de la misma cuenca, debe ser la unidad. Si no se cumple esta condición, el sistema aún no ha alcanzado el equilibrio dinámico, luego de haber sido roto por algún evento desestabilizador de magnitud. Utilizando coeficientes de las leyes de composición del drenaje, expresa matemáticamente la condición de equilibrio mediante una ecuación que denomina relación de caída ("fall ratio"), cuyo valor debería ser igual a uno. En la cuenca total del Arroyo del Medio la relación de caída es 0.823, valor que indica falta de equilibrio en el sistema de avenamiento.

Se pueden calcular dos perfiles usando los coeficientes de regresión de las leyes de composición del drenaje. El primero, denominado perfil teórico, sirve para efectuar la comparación con el del cauce principal de la cuenca, mientras que el segundo, llamado perfil de equilibrio, es el que debería adoptar dicho cauce en caso de estar en equilibrio dinámico. Apartamientos entre el perfil teórico y el del cauce principal denotan y localizan anomalías litológicas o rasgos producidos por la tectónica. Si el sistema se encuentra en equilibrio, los perfiles calculados deben coincidir. Los correspondientes a la cuenca total del Arroyo del Medio se exhiben en el Fig. 33. Las diferencias existentes entre los perfiles son notorias: no existe ningún tipo de ajuste entre ellos además de mostrar que el cauce principal del arroyo está muy desproporcionado; estos hechos indican que las funciones del sistema están completamente fuera de control. Al ser la relación de caída menor que la unidad, la tendencia general en el cauce principal sería de agradación.

Este análisis fue realizado para la cuenca del Arroyo San Lorenzo (Racca 1981), que desemboca en el Paraná al norte de la ciudad homónima y, a pesar de la falta de equilibrio mostrada, el ajuste exhibido entre los perfiles teórico y del cauce principal permitió reconocer anomalías que se corresponden con la posición supuesta de los bloques tectónicos subyacentes a la mencionada cuenca. El análisis realizado en la cuenca total del Arroyo del Medio no permitió obtener este tipo de conclusiones.

**Análisis planimétrico de la cuenca utilizando la lemniscata equivalente asociada.** A partir de la idea de Chorley et al. (1957) consistente en aproximar la forma en planta de las cuencas hidrográficas a la del pétalo de lemniscata equivalente de ecuación  $\rho = L \cos(k \theta)$ , el autor de esta presentación propuso dos nuevos parámetros relacionados con ella y un método para obtener gráficamente el ajuste entre ambas, que permite señalar pautas para la individualización de anomalías

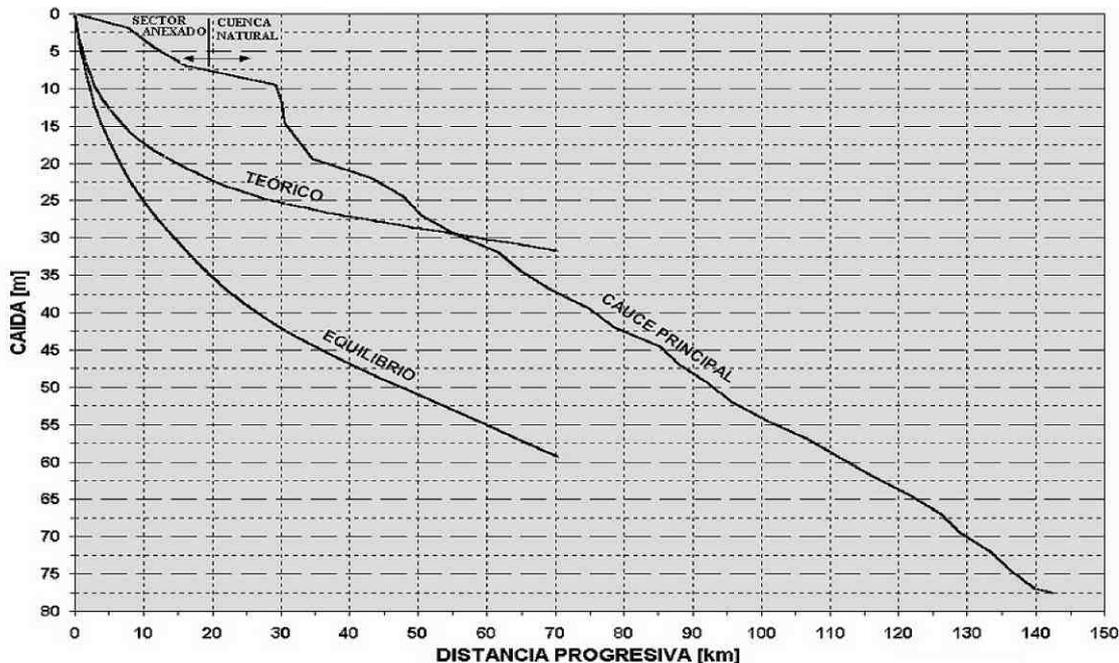


Figura 33. Perfiles de Yang y del cauce principal de la cuenca total del Arroyo del Medio.

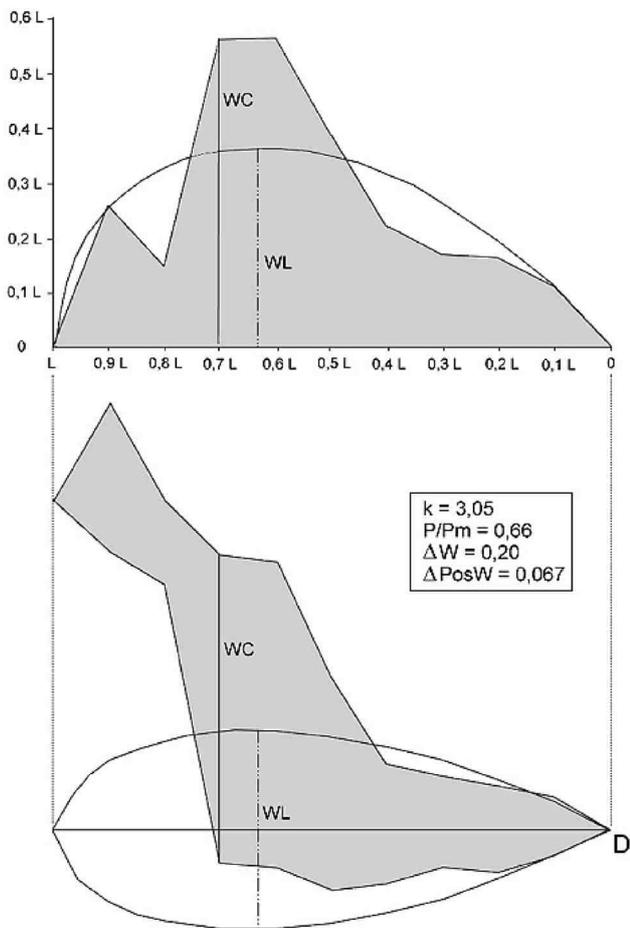


Figura 34. Análisis de la cuenca total del Arroyo del Medio utilizando la lemniscata asociada.

en sectores de las cuencas (Racca 1980). El primer parámetro propuesto ( $\Delta W$ ) es la diferencia entre anchos máximos de cuenca y lemniscata y el segundo ( $\Delta PosW$ ) indica la diferencia de posición entre dichos anchos máximos. Todos los valores se refieren al largo del eje longitudinal, que se toma como unidad de medida. Para obtener una visión global y de localización de variaciones en el ajuste a lo largo de toda la cuenca, se trazan dos diagramas que se corresponden: en la parte superior el de variación de anchos y en la inferior, el de simetrías.

Los resultados del análisis realizado para la cuenca total del Arroyo del Medio se exhiben en la Fig. 34, incluyendo los valores de los parámetros calculados. Los designados  $k$  y  $P/Pm$  corresponden a los índices que denotan la elongación de la cuenca y el ajuste entre los perímetros de la cuenca y de la lemniscata, respectivamente (Chorley et al. 1957). El valor de  $k$  determina la forma de la lemniscata; es la unidad para la circunferencia y a medida que crece, la figura se torna más elongada y estrecha. La relación de perímetros  $P/Pm$ , es mucho menor que la unidad para la cuenca total del Arroyo del Medio e indica un muy pobre ajuste entre ellos.

La manera particular en que fue considerado el eje longitudinal para el ajuste de la cuenca total, haciendo coincidir su tramo inicial con el de la lemniscata, permite que resalten sus peculiaridades. Los anchos máximos no coinciden ni en su posición ni en su longitud, mostrando relevantes diferencias relacionadas con las áreas del tramo medio de la cuenca que están condicionadas por la tectónica. En el diagrama inferior de la Fig. 34 se puede observar la excesiva falta de ajuste motivada por doble quiebre de dirección del valle del arroyo y, en el superior, las variaciones generales de anchos, bien diferenciadas, que corresponden a los tres sectores distintos en que se puede dividir la cuenca a lo largo de su eje longitudinal, también constreñidos por factores neotectónicos.

**Carta de clases de gradientes.** Las cartas de características de las pendientes del terreno -gradientes, orientaciones y curvaturas- constituyen documentos de gran importancia en la descripción cuantitativa y son la base para elaborar distintas

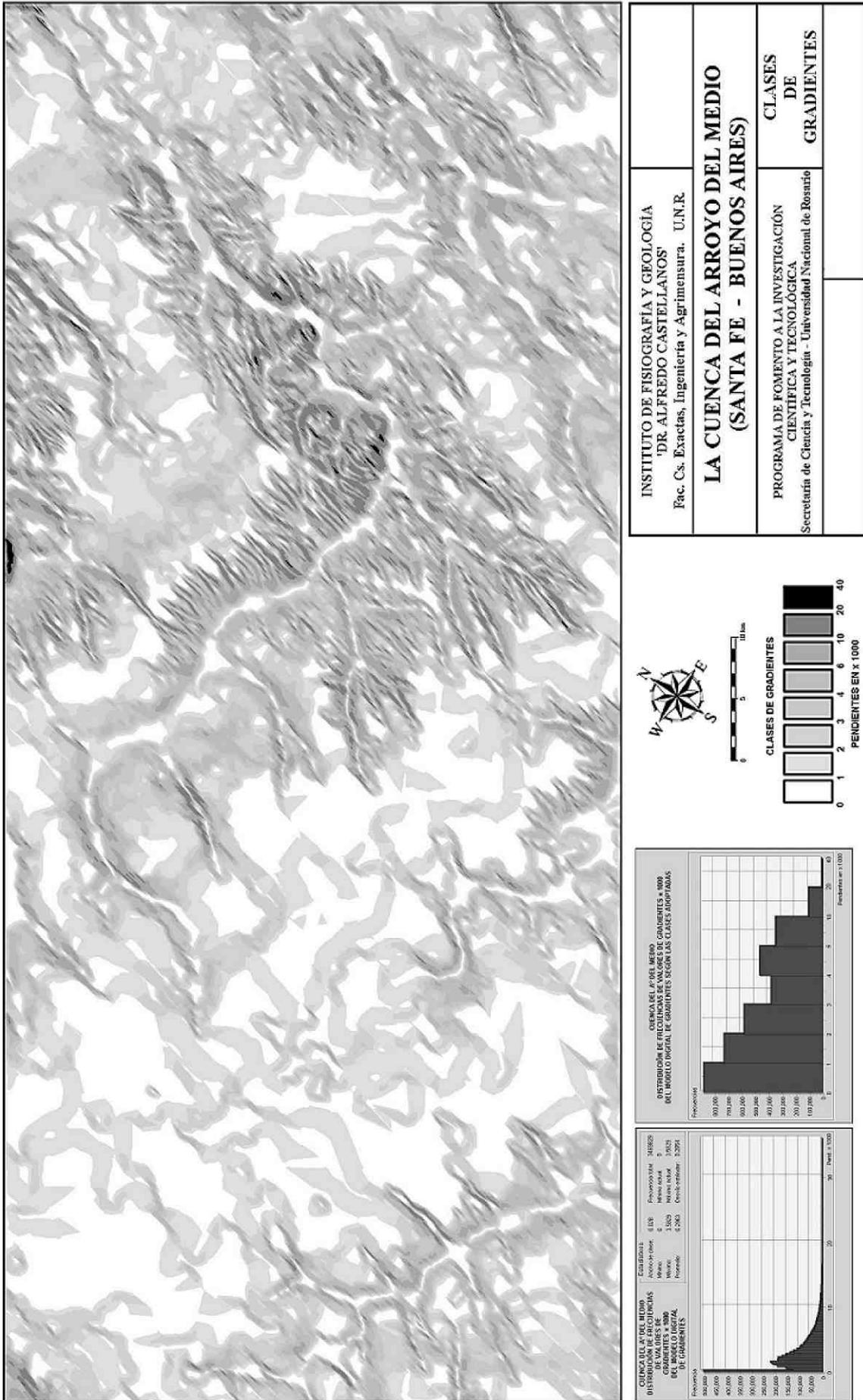


Figura 35. Clases de gradientes de pendientes obtenidas del modelo digital de elevaciones del área de la cuenca del Arroyo del Medio.

aplicaciones, como ser en hidrología superficial, en evaluación de la susceptibilidad a la erosión y a otros procesos en diferentes áreas -relacionada con fines de morfoconservación y de conservación de suelos- y en estudios de transitabilidad y de vías de comunicación en general. Contar con el modelo digital de elevaciones del terreno permite obtener en tiempo real -con los programas correspondientes- las cartas de las mencionadas características de las pendientes, con las clases apropiadas de acuerdo con los propósitos de las aplicaciones específicas que se puedan presentar en cada caso particular.

En la Fig. 35 se exhibe una carta coroisoplética de clases de gradientes, obtenida con técnica y programa propios, a partir del modelo de elevaciones del terreno del área de la cuenca del Arroyo del Medio. La distribución de frecuencias de los valores de gradientes, siempre consignados en metros por kilómetro y con sus estadísticos asociados, se muestra en el extremo superior derecho en forma de histograma, junto con el de los valores agrupados en las diferentes clases empleadas. Éstas fueron diseñadas en sus límites y anchuras de tal manera de realizar un producto comparable con los obtenidos con anterioridad por el autor para otras cuencas del sur de la provincia de Santa Fe. Se asignaron tonalidades de gris a las distintas clases, más oscuras a medida que los gradientes aumentan. Los numerosos modelos confeccionados, que corresponden a los gradientes y a las demás características de las pendientes del área, con clases tomadas de diferentes maneras, serán presentados en otra oportunidad, relacionándolos con sus propósitos específicos.

## CONCLUSIONES

**Morfogénesis y morfocronología.** El estudio a nivel regional, basado fundamentalmente en la interpretación de una imagen satelitaria, permitió realizar y obtener las siguientes observaciones y conclusiones, vinculadas en su mayoría con factores neotectónicos que habrían dado origen a las geoformas de mayor dimensión en el área investigada:

- (1) Se detectaron en la imagen dos juegos de lineamientos, que se suponen relacionados con direcciones neotectónicas: el primero subparalelo a la geofractura Selva-Melincué y el segundo, conjugado, aproximadamente perpendicular al anterior.
- (2) A su vez, cada juego de lineamientos posee dos direcciones preferenciales, rotadas entre sí en el orden de 10° y 15°, respectivamente.
- (3) Algunos de estos lineamientos se corresponderían con fracturas del basamento que separarían bloques que tuvieron desplazamiento diferencial en elevación, generando en superficie áreas elevadas (bien drenadas) y deprimidas (anegadizas), separadas por flexuras.
- (4) Los lineamientos conjugados coincidentes con los tramos finales de los arroyos Pavón y del Medio, coincidirían con fracturas que tuvieron una componente de desplazamiento horizontal, influyendo sobre la morfología de las cuencas.
- (5) Uno de los lineamientos detectados, subparalelo a la geofractura Selva-Melincué, que se corresponde con el trazado del cauce central del Arroyo del Medio, coincidiría a nivel de basamento con una falla cuya reactivación durante el Holoceno sería la principal responsable de generar la macromorfología de la cuenca del mencionado arroyo y el modelo emparillado

de la red de avenamiento actuales, presentando la cuenca en su planta, dos quiebres de dirección. Dicha fractura separaría dos bloques tectónicos: el meridional, al que se denominó "Manuel Ocampo", ascendido, y el septentrional, al que designó como "Peyrano-General Gelly", basculado hacia el NNE.

A nivel de escala intermedia, el estudio se restringió al relieve de un área rectangular de menor dimensión, que incluye de manera circunscripta a la cuenca del Arroyo del Medio. A partir del modelo digital de elevaciones del terreno elaborado, que cubre dicha área, se realizó el análisis de superficies de tendencia del relieve. Este análisis permitió particularmente:

- (1) Generar un diagrama perspectivo de la superficie de tendencia de orden quinto; si se considera que llanura pampeana era más regularmente plana en el Pleistoceno superior, este diagrama exhibiría las probables deformaciones generales producidas por los esfuerzos neotectónicos en el área.
- (2) Estudiar el relieve desprovisto de la tendencia regional y generar, a partir del análisis realizado, un esquema interpretativo de los rasgos supuestamente morfotectónicos, con mayor detalle, y un diagrama perspectivo en el que se destacan todos estos rasgos, en particular las formas asociadas con bloques tectónicos que se habrían desplazado verticalmente y/o con componente horizontal de movimiento y/o basculado.
- (3) Poner de manifiesto la influencia del paleomodelo hidrográfico colinear en el desarrollo de las redes de avenamiento actuales y la evidencia de su existencia en toda el área, a partir de la observación de un modelo coroisoplético confeccionado, base del esquema interpretativo anteriormente mencionado.

A nivel regional y de escala intermedia, dados el clima templado húmedo subhúmedo actual y el tipo de relieve del área, se puede decir que los procesos exógenos más activos que imperan en la actualidad en ella, son los de erosión hídrica -en sentido amplio- en todos sus estadios.

**Morfografía.** La descripción cualitativa de las geoformas existentes en la cuenca del Arroyo del Medio y en su entorno se realizó en principio con el auxilio de una carta hipsométrica y de varios diagramas-bloque, obtenidos a partir del modelo digital de elevaciones del terreno y presentados en dos formatos: primero, con su superficie representada con perfiles topográficos proyectados y segundo, sus homólogos, vestidos con el sector correspondiente de carta imagen satelitaria.

Los rasgos descritos incluyen en el entorno las divisorias de aguas con las cuencas vecinas, y las geoformas en partes de éstas: la de la laguna Melincué, la de las nacientes del río Rojas -área bajo la cual pasaría la geofractura Selva-Melincué ya en territorio bonaerense-, la de las cabeceras del Arroyo Pergamino, la del Arroyo Ramallo y la del Arroyo Pavón. Se consignan las relaciones entre éstas y la cuenca del Arroyo del Medio.

Ya en la cuenca objeto de esta presentación, se describe la morfología del sector anexado por canalizaciones a la cuenca natural y la de los tres tramos bien diferenciados en que ésta se divide: el sector de las cabeceras, el medio y el final. Se ponen de manifiesto las asimetrías que presentan los perfiles transversales del valle en sus diferentes tramos -que se consideran fundamentalmente producidas por eventos neotectónicos- y las relaciones de la red de avenamiento actual con las cañadas del paleomodelo hidrográfico.

El perfil longitudinal del cauce principal del Arroyo del Medio, incluyendo las canalizaciones, muestra en su trazado distintas formas: en la parte superior, las producidas por la anexión -forzada artificialmente- de un área no perteneciente a la cuenca natural y una corta concavidad en su pasaje por la cubeta en forma de abanico que se habría generado principalmente por descenso tectónico. Desde este punto y hasta la desembocadura en el río Paraná (por más de 100 km a lo largo de los tramos medio y final), el perfil es anómalamente rectilíneo en lugar de ser cóncavo hacia el cielo.

Con propósitos de descripción general y fundamentalmente de reconocimiento y delimitación de áreas cuya morfología hace que sean inundables, en especial las que corresponden a las distintas llanuras de inundación de los arroyos, se presentan y comentan cinco modelos icónicos y/o temáticos, producidos por procesamiento de la ya mencionada imagen satelitaria.

**Morfometría.** Se destaca la importancia de contar con la descripción cuantitativa precisa de las geoformas y de realizar los análisis que permitieron expresar en forma numérica las propiedades geométricas de la cuenca y demás elementos que sirven de base para comprender su evolución y dinámica, como asimismo para evaluar su funcionamiento y tendencias, en hidrología, erosión y sedimentación. El modelo digital de elevaciones del terreno y los programas informáticos que operan sobre él y sobre otros datos primarios, constituyeron relevantes herramientas que fueron utilizadas para la obtención de la mayor parte de la información cuantitativa.

Las tareas previas a la determinación de las leyes de composición del drenaje, aportaron cartas de definición y jerarquización de la red de avenamiento y de delimitación de cuenca y subcuencas.

La obtención de las leyes de composición del drenaje de Horton-Schumm y de sus parámetros complementarios, permitió definir la topología de la red de avenamiento y detectar la presencia de anomalías en ella, relacionadas probablemente con factores neotectónicos.

Se realizaron y se adjuntan varios modelos bidimensionales (que representan aspectos tridimensionales en su mayoría), vinculados con la cuenca total del Arroyo del Medio, cuyos propósitos son describir cuantitativamente los gradientes de su cauce principal, su frecuencia altimétrica y sus pendientes medias en relación con la altitud. Además se realizaron los análisis hipsométrico, de Yang y planimétrico utilizando la lemniscata equivalente asociada. Todos los modelos, incluyendo los elaborados a partir de los análisis efectuados, presentan particularidades y/o anomalías que son descritas en detalle.

Se incluye por razones de espacio sólo una carta de clases de gradientes de pendientes; las clases fueron diseñadas en sus límites y anchuras de tal manera de realizar un producto comparable con los obtenidos con anterioridad por el autor para otras cuencas del sur de la provincia de Santa Fe.

Todo lo investigado indica que el área en estudio se encontraría afectada por desequilibrios de magnitud producidos por eventos tectónicos de muy reciente data que habrían modificado el relieve sumamente plano preexistente. El sistema geomorfológico recién estaría en los comienzos del período de reajuste; ello supone un importante gasto energético que se traduciría fundamentalmente en el incremento de los procesos

erosivos. Por tal razón, se remarca la importancia de implementar técnicas adecuadas de morfoconservación, de conservación de suelos y de manejo hídrico, con el propósito de atemperar los efectos producidos por el desequilibrio del sistema. Aunque la presencia del paleomodelo hidrográfico colinear proporciona fuertes indicios acerca de que la macromorfología del área tiene génesis tectónica y no debida a la influencia de paleoclimas, sería de importancia contar con datos de prospección geofísica, en especial de sísmica, con el propósito de comprobar la mayoría de las hipótesis formuladas respecto de los rasgos que se suponen generados por la neotectónica.

**Agradecimientos.-** Se agradece a Gustavo González-Bonorino (Universidad Nacional de Salta, Salta) y a Nelso Doffo (Universidad Nacional de Río Cuarto, Río cuarto) su tarea realizada en el arbitraje del presente trabajo.

## REFERENCIAS

- Brink A.B., Mabbut J.A., Webster R. & Becket P.H., 1966. Report of the Working Group on Land Classification and Data Storage. *MEXE Report* **940**: 1-97.
- Cailleux J. & Tricart J., 1956. La problème de la classification des faits géomorphologiques. *Annales Géographiques* **65**: 162-186.
- Castellanos A., 1966. Estratigrafía y génesis de los valles fluviales en los bloques tectónicos pampeanos. La vida orgánica a través de los últimos tiempos geológicos en cada uno de los bloques. *Actas de la 26 Semana de Geografía. Sociedad Argentina de Estudios Geográficos GAEA, Tucumán*: 67-84.
- Chorley R.J., Malm D.E.G. & Pogorzelski H.A., 1957. A new standard for estimating drainage basin shape. *American Journal of Science* **255**: 138-141.
- Gellert J.F., 1972. Manual of Detailed Geomorphological Mapping. Academia, Praga, 317 p.
- Guyot G. & Gu X.F., 1994. Effect of radiometric corrections on NDVI determined from SPOT-HRV and Landsat-TM data. *Remote Sensing of Environment* **49**: 169-180.
- Horton R.E., 1945. Erosional development of streams and their drainage basins; hydrophysical approach to quantitative morphology. *Bulletin of the Geological Society of America* **56(3)**: 275-370.
- Pasotti P., 1969 Interpretación de algunos rasgos morfológicos de la llanura pampeana en la provincia de Santa Fe (sector oriental). *Notas del Instituto de Fisiografía y Geología* **A3**: 1-16.
- Pasotti P., 1973. Sobre la presencia del último paleomodelo de red hidrográfica de edad pleistocénica en la llanura de la provincia de Santa Fe. *Publicaciones de Instituto de Fisiografía y Geología* **57**: 1-24.
- Pasotti P., 1974. La Neotectónica en la llanura pampeana - Fundamentos para el Mapa Neotectónico. *Publicaciones de Instituto de Fisiografía y Geología* **58**: 1-28.
- Pasotti P. & Canoba C.A., 1979. Estudio de la llanura pampeana con imágenes Landsat. *Publicaciones de Instituto de Fisiografía y Geología* **63**: 1-22.
- Pasotti P., Albert O.A., Canoba C.A. & Racca J.M.G., 1979. La cuenca del Arroyo Ludueña. *Actas del Noveno Congreso Nacional del Agua, San Luis* **2**: 86-95.
- Pasotti P. & Canoba C.A., 1982. The Pampean Plain Studied with Landsat Images. *Photogrammetria* **37**: 109-130.
- Pasotti P., Albert O., Canoba C. A., Lewis J. P., Pire E. & Racca J.M.G., 1993. Rasgos geológicos geomorfológicos

- de la cuenca del Arroyo Pavón (Santa Fe). *Publicaciones de Instituto de Fisiografía y Geología* **68**: 1-225.
- Popolizio E., 1983. Los sistemas de escurrimiento de las llanuras del NEA como expresión del sistema geomórfico. *Coloquio Internacional sobre Hidrología de Grandes Llanuras, Olavaria*: 125-142.
- Racca J.M.G., 1980. Análisis planimétrico de cuencas hidrográficas utilizando la lemniscata asociada. *Notas del Instituto de Fisiografía y Geología* **A10**: 1-17.
- Racca J.M.G., 1981. Geomorfología cuantitativa de la cuenca del Arroyo San Lorenzo (Santa Fe) y su relación con la Neotectónica. En: Estudios de Geografía de la Provincia de Santa Fe. *Sociedad Argentina de Estudios Geográficos GAEA (Serie Especial)* **9**: 293-316.
- Racca J.M.G., 1982. Análisis de variables de distribución geográfica utilizando superficies de tendencia. Programas para su cálculo. *Notas del Instituto de Fisiografía y Geología* **A13**: 1-32.
- Racca J.M.G., 1984. Programas para el cálculo en Geomorfología cuantitativa. *Notas del Instituto de Fisiografía y Geología* **B1**: 1-24.
- Racca J.M.G., 1993. La representación ortográfica de funciones de dos variables – Bloque-diagramas ortográficos. *Notas del Instituto de Fisiografía y Geología* **B3**: 1-12.
- Racca J.M.G., 1994. Digitalización de curvas en Geociencias. *Notas del Instituto de Fisiografía y Geología* **B4**: 1-12.
- Racca J.M.G., 2007a. Programa para manejo de imágenes MMRS y HRTC registradas por el satélite argentino SAC-C. *Boletín del Instituto de Fisiografía y Geología* **77**: 39-44.
- Racca J. M.G., 2007b. Análisis hipsométrico, frecuencia altimétrica y pendientes medias a partir de modelos digitales del terreno. *Boletín del Instituto de Fisiografía y Geología* **77**: 31-38.
- Schumm S.R., 1956. Evolution of drainage systems and slopes in badlands at Perth Amboy, New Jersey. *Bulletin of the Geological Society of America* **67**: 597-646.
- Strahler A.N., 1952. Hipsometric (area-altitude) analysis of erosional topography. *Bulletin of the Geological Society of America* **63**: 1117-1142.
- Strahler A.N., 1957. Quantitative analysis of watershed geomorphology. *Transactions of the American Geophysical Union* **38**: 913-920.
- Thomas M.F., 1969. Geomorphology and land classification in tropical Africa. *Environment and Land Use of Africa. Methuen, London*: 103-145.
- Yang C.T., 1971. Potential energy and stream morphology. *Water Resources Research* **7**: 311-322.