

# ANOMALÍAS MORFOESTRUCTURALES DEL DRENAJE DEL RÍO SALADO SOBRE LAS LOMADAS DE OTUMPA (SANTIAGO DEL ESTERO Y CHACO) DETECTADAS POR PROCESAMIENTO DIGITAL

Verónica G. PERI<sup>1</sup> y Eduardo A. ROSSELLO<sup>1</sup>

<sup>1</sup> CONICET – Facultad de Ciencias Exactas y Naturales - Universidad de Buenos Aires, Buenos Aires. E-mails: gisel@gl.fcen.uba.ar, gisel\_peri@yahoo.com.ar, rossello@gl.fcen.uba.ar, ea\_rossello@yahoo.com.ar.

## RESUMEN

Se estudia la morfología y dinámica del abanico aluvial del río Salado del Norte, localizado en la región del Gran Chaco (provincias de Santiago del Estero y Chaco), dentro del piedemonte distal que se desarrolla a partir del levantamiento andino. Mediante el procesamiento digital integrado de imágenes satelitales ópticas y modelo digital de elevaciones (MDE), se reconocieron direcciones de escurrimiento, morfologías y edades relativas de cuatro grupos de paleocauces que se le asocian. Además, se realizó una caracterización del drenaje a partir de anomalías de desvío local y/o modificaciones en los diseños de cursos, que se acomodan a las estructuras y/o topografías regionales, particularmente en áreas de bajo relieve. Así, se han evidenciado dos importantes cambios en su dinámica, uno a escala regional a partir del gradual desvío de su cauce principal hacia el sur, y otro local, asociado al levantamiento de las Lomadas de Otumpa. De esta manera, se detectan anomalías o cambios en el régimen hidrogeológico, donde el antiguo abanico aluvial fue modificado, interrumpiéndose progresivamente su pendiente natural al extremo, que ahora la invierte hacia el noroeste y desvía el curso principal hacia el sur, donde fluye actualmente. La cartografía digital, complementada con el conocimiento geológico de superficie y subsuelo, resulta una herramienta de interpretación morfoestructural localmente insustituible en zonas de llanura con relieve poco evidente, y contribuye al mejor manejo de los recursos naturales asociados.

Palabras clave: *Cartografía digital, patrón de drenaje, neotectónica, Gran Chaco, Argentina.*

**ABSTRACT:** *Drainage morphostructural anomalies of the Río Salado in Lomadas de Otumpa (Santiago del Estero y Chaco) detected by digital processing.*

Morphology and dynamics of alluvial fan of Río Salado del Norte are studied and presented. The area is located in the Gran Chaco region (provinces of Chaco and Santiago del Estero, Argentina), within the distal piedmont that evolves from the Andean uplift. Through the integration of digital processing optical satellite imagery and digital elevation model (DEM), it is recognized runoff direction, morphology and relative ages of four groups of the associated paleovalleys. It is also performed a drainage characterization from local deviation anomalies and/or changes in the pattern of courses to fit the structure and/or regional topography, particularly in low relief areas. Thus, there is evidence of two important changes in its dynamics, one gradual regional deviation from its main channel to the south, and a local scale feature associated with the uplift of Lomadas of Otumpa. Thus, these detected anomalies or changes in the hydrological regime, where the ancient alluvial fan was changed, interrupt its natural slope gradually to the end, which is now locally invert in the northwest, and diverts the main course southward, where it flows today. The digital mapping, supplemented by geological knowledge of surface and subsurface, it is an irreplaceable tool in morphostructural interpretation of plain areas with little evident relief and contributes to better natural resource management.

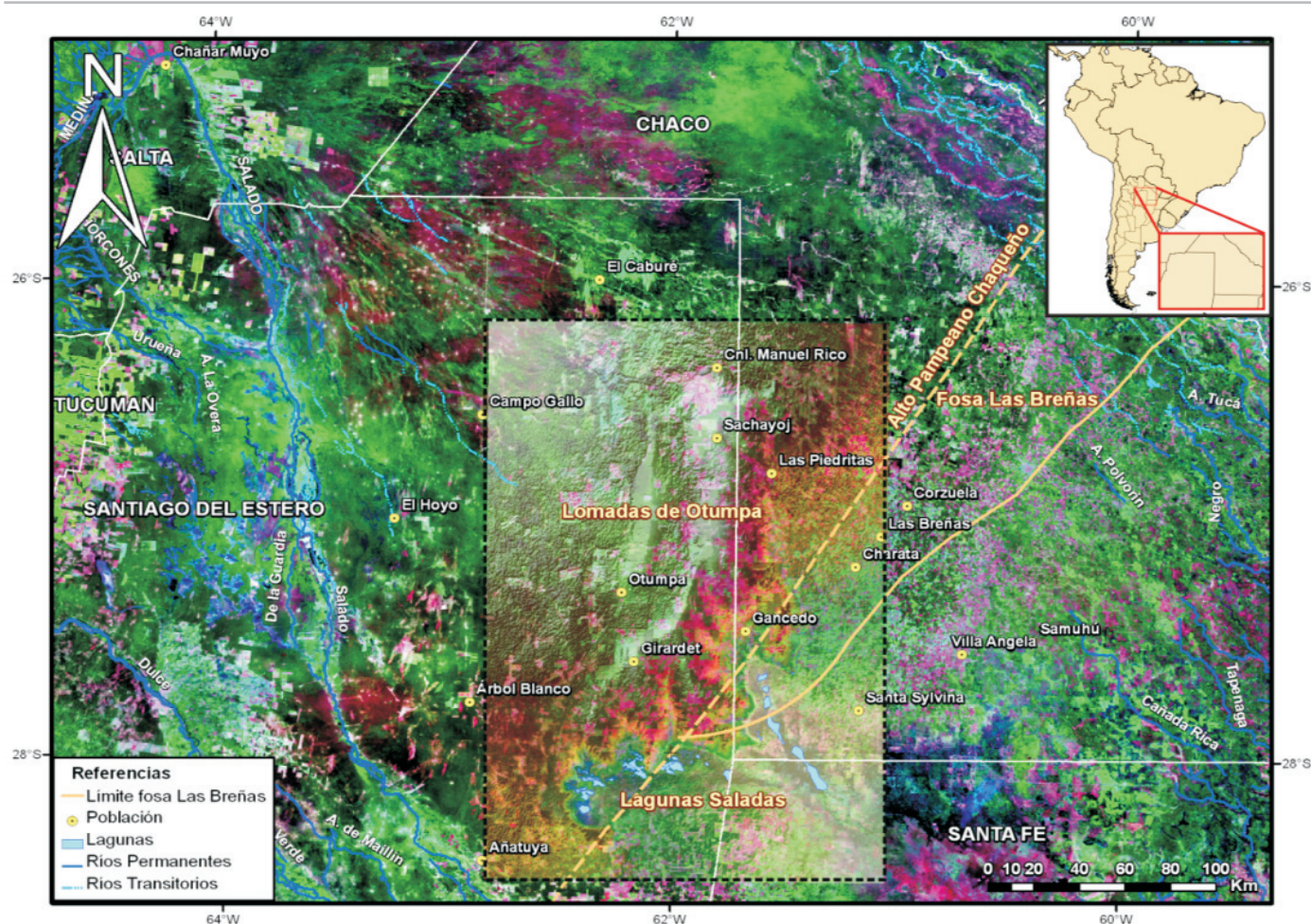
Keywords: *Digital mapping, drainage patterns, neotectonics, Gran Chaco, Argentina.*

## INTRODUCCIÓN

El Gran Chaco es una vasta región de planicies con características fitogeográficas propias del centro sur del continente Sudamericano. En el norte argentino se destaca por contener bosques, sabanas de pastos altos y pantanos grandes; en el

Chaco Oriental subhúmedo, y árboles xerófilos, cactus y pastos resistentes, y en el Chaco Occidental semiárido (Iriondo 1993). El río Salado del Norte desarrolla un extenso abanico fluvial en la región del Gran Chaco, particularmente en las provincias de Santiago del Estero y Chaco, donde forma parte de la extensa planicie

distal del piedemonte andino (Fig. 1). Constituye un agente de transporte y sedimentación de primera magnitud, que expresa la interacción entre los procesos tectónicos y sedimentarios, relacionados con la evolución reciente de la deformación sobre el borde activo del continente sudamericano.



**Figura 2:** Localización de la región estudiada sobre un modelo de elevación digital con 50 % de transparencia y efecto de sombreado, superpuesto al mosaico de imágenes Landsat (GeoCover 2000). En recuadro de línea negra discontinua se muestra la ubicación de la figura 2.

En particular, estas relaciones adquieren mayor expresión en las inmediaciones de las Lomadas de Otumpa, descritas inicialmente a partir de un modelo digital de elevaciones (MDE) e imágenes satelitales ópticas, asociados en un sistema de información geográfica (Rossello *et al.* 2005, 2007). Son estribaciones topográficas muy suaves con una orientación regional NNE, de 200 kilómetros de longitud, por un ancho variable de 20 a 80 kilómetros. Poseen alturas relativas con respecto a la gran planicie circundante de hasta 100 metros (Figs. 1 y 2). Así, interrumpen la monotonía del relieve llano, donde el patrón de drenaje del río Salado del Norte exhibe diseños asociados y dependientes de las modificaciones de relieve que allí se reconocen. Si bien la vegetación del monte chaqueño oblitera su reconoci-

miento desde la superficie, los procesamientos de cartografía digital logran poner en evidencia este relieve (Peri y Rossello 2008).

Los antecedentes sobre la vinculación del drenaje con procesos neotectónicos de la llanura pampeana fueron inicialmente descritos por Pasotti (1968, 1974, entre otros), donde asocia rasgos morfológicos de porciones de la llanura pampeana con la estructura del basamento infrayacente. Describe el “último paleomodelo” de la red de drenaje para las provincias de Santa Fe y Córdoba, al que le adjudica una edad pleistocena. Otros rasgos de deformación descritos son la fractura Santa Silvina - Quitilipi (Iriondo 1984) de dirección NE, ubicada en la provincia del Chaco, que se cree activa durante el Pleistoceno superior y probablemente Holoceno, y la

falla de las Piedritas (Angueira 2007) de rumbo NE, que eleva un bloque del sustrato y estaría vinculada al ascenso de las Lomadas de Otumpa.

Hacia el norte y noreste, la mayor densidad del bosque y de cauces abandonados por las divagaciones de los ríos Dulce, Salado, Bermejo y Pilcomayo, dificultan el reconocimiento de la antigua red. Sin embargo, Castellanos (1968) realiza un estudio detallado de los antiguos cauces del río Salado del Norte, donde establece distintas etapas de desplazamiento del mismo hacia el sudoeste, desde épocas terciarias hasta la actualidad. Este desplazamiento lo vincula con la avulsión de canales y la aparición de fallamientos longitudinales (denominados “chaco-pampeano-bonaerenses”) durante el Pleistoceno. Los sistemas de drenajes, paralelamente a

los condicionantes climáticos, adaptan la dinámica de su escorrentía a cualquier cambio de pendiente de las superficies sobre las que se desarrollan. De esta manera, representan un gran potencial para registrar información acerca de la evolución de las estructuras responsables de esos cambios. Se desarrollan así modificaciones de distintos órdenes que determinan anomalías fluviales dadas por una tasa de formación de relieve similar o escasamente superior a la tasa de sedimentación y erosión (Howard 1967, DeBlieux 1949, Schumm *et al.* 2000, Terrizzano *et al.* 2008). Las modificaciones locales de la pendiente de la planicie del Gran Chaco controlan la dinámica fluvial del río Salado del Norte desde el Terciario hasta la actualidad.

Por ello, el principal objetivo de este trabajo es describir la evolución del patrón de la red de drenaje del sistema aluvial del río Salado del Norte y establecer su control, según las modificaciones neotectónicas de la planicie sobre la cual discurre, a partir del procesamiento digital de imágenes satelitales y modelos digitales de elevaciones. Se realizó un análisis regional cuali-cuantitativo de los paleocauces del río Salado del Norte mediante un mapa detallado del patrón del drenaje, aportándose evidencias de la presencia de rasgos de deformación en superficie. La región sostiene una importante economía substancialmente relacionada con los recursos naturales superficiales, sin embargo, sólo recientemente se ha visto beneficiada con varios trabajos que incluyen la evolución de los patrones de drenaje (Brunetto e Iriondo 2007, Marengo 2008, Rossello *et al.* 2005, 2007), luego de los estudios pioneros y excepcionales de Castellanos (1968), Pasotti (1968, 1974) e Iriondo (1984, 1993), entre otros.

## MARCO GEOLÓGICO

La comarca sobre la cual se desarrolla el río Salado del Norte, es parte de la planicie distal del piedemonte Andino Central generado a partir de la edificación y consecuente erosión de la Cordillera de los

Andes, como consecuencia de la subducción de la placa de Nazca debajo de la placa Sudamericana (Ramos *et al.* 2002, Cobold *et al.* 2007). Es el escenario principal donde ocurren los procesos de transferencia de los volúmenes sedimentarios, que se encuentran a la búsqueda de nuevos niveles de base que regulen su equilibrio.

El río Salado del Norte desarrolla el sistema de abanico aluvial del Salado (Iriondo 1984, 1993) como consecuencia de la divagación horizontal del río Salado del Norte hacia el sur, donde corre actualmente en sentido NNO-SSE (Fig. 1). Como característica geomorfológica común, la región pedemontana del Gran Chaco reconoce su origen en cinco grandes abanicos aluviales, construidos por los mayores ríos que cruzan la región siendo los principales el Pilcomayo, el Bermejo y el Salado del Norte (Iriondo 1984) y que se extienden con pendientes del orden de 1:1.000, desde la vertiente oriental de las Sierras Subandinas de Tucumán, Salta y Jujuy hacia los ríos Paraguay y Paraná. El escurrimiento original hacia el sureste, del río Salado del Norte, es comparable al de los ríos Bermejo y Pilcomayo; sin embargo, actualmente se ve desplazado hacia el sur con un escurrimiento NNO-SSE, dejando numerosos cauces abandonados que debieron interrumpir su evolución (Castellanos 1968, Peri y Rossello 2008). Los cursos hídricos son antecedentes a las estribaciones de las Sierras Subandinas, por lo cual el inicio de su formación debe ser anterior al Plioceno, aunque alcanzan su mayor desarrollo hacia el final del Pleistoceno. Durante el Plioceno, se expresa una rápida construcción e intensa acumulación de materiales en los ápices y secciones superiores, debido al incremento en la tasa de transferencia de los volúmenes sedimentarios.

A pesar del rico registro sedimentario que acumulan los depocentros de la llanura chacopampeana (Chebli *et al.* 1999), la única unidad relativamente rocosa identificada en la superficie de la comarca estudiada que podría representar el substrato pre-aluvial, es la Formación

Las Piedritas (Miró y Martos 2002). Está constituida por camadas de clastos angulosos de areniscas cuarcíticas silicificadas y compactas, que aflora en diversos puntos aislados de la zona donde se la aprovecha como material de construcción de carreteras. La cantera de Las Piedritas (26°50'S y 61°30'O) es la localidad más importante (30 km<sup>2</sup>), ubicada a unos 45 kilómetros al noroeste de Las Breñas. Existen diversas interpretaciones respecto a su origen, entre las que se destacan la correlación con la Formación Ituzaingó, areniscas fluviales pliocenas (Miró y Martos 2002), y otra con la Formación Tacuarembó de edad jurásica-cretácica (Coriale 2006). Sin embargo, la edad y significado geológico de estos registros sedimentarios son aún inciertos, razón por la cual se llevan a cabo actualmente diversos estudios geológicos y geofísicos.

Desde el punto de vista sedimentológico, el área de estudio constituye una cubierta sedimentaria vinculada a eventos del Pleistoceno medio a superior y Holoceno, donde se identifican el cono aluvial del río Salado del Norte, con remanentes de su antiguo sistema fluvial. Los depósitos loésicos más modernos y los sedimentos aluviales de los sistemas hídricos actuales constituyen las unidades de mayor desarrollo. El cono aluvial del río Salado posee su ápice en las Sierras Subandinas de Salta (Chañar Muyo, Fig. 1), a partir del cual se distribuye sobre una amplia región del Chaco Occidental (provincias de Chaco, Santiago del Estero y norte de Santa Fe), con 650 kilómetros de extensión hasta el río Paraná (Castellanos 1968). El antiguo abanico aluvial quedaría comprendido entre los 60°00' y 64°00' de longitud O y 25°00' - 28°30' de latitud S, considerándose como límite oriental del antiguo abanico el cauce del río Negro en la provincia de Chaco (Fig. 1), ampliándose así el definido por Iriondo (1984).

La dirección original de escorrentía del río Salado del Norte a lo largo de todo su desarrollo hasta alcanzar el nivel de base del río Paraná, era paralela a la de los ríos Pilcomayo y Bermejo actuales. Sin embargo, ha sufrido un importante despla-

zamiento horizontal hacia el sur, con frecuentes tramos de avulsionamiento y con la formación de bañados (*e.g.*, Copo, Figueroa, Añatuya, en la provincia de Santiago del Estero). En Chañar Muyo (provincia de Salta), su ápice o codo de inflexión actuó como punto de pivote, de donde partieron los sucesivos desplazamientos de sus cauces, que en un principio era casi de 90° grados, viéndose disminuido notablemente en la actualidad, tal como fuera inicialmente descrito por Castellanos (1968). Como remanente de su morfología original, se observan canales abandonados menores, en diferentes grados de preservación, que ocupan gran parte de la región por su disposición en abanico, además de lagos en collera (*ox-bow lakes*), pantanos y otras geoformas menores construidas por el canal (Iriondo 1993, Miró y Martos 2002). Los más antiguos son difíciles de reconocer porque son obliterados o destruidos por los sedimentos suprayacentes. Varias depresiones de deflación están presentes en la línea central de tales paleocanales. Los canales más jóvenes, seguramente formados en períodos de mayor humedad, están bien preservados, alcanzan 15 km de largo y transportan agua durante las inundaciones (Iriondo 1993). Las márgenes de los paleocanales suelen estar marcadas por la presencia de antiguos albardones que limitan los rellenos más modernos de arena y limo, caracterizados estos últimos, por tener una vegetación más activa (Angueira 2007). Tienen un trazado sinuoso con un ancho menor a los 200 m y a veces se ven entrecruzados según una red de diseño anastomosado irregular, aunque poseen una orientación SSE preferencial en concordancia con la pendiente del escurrimiento del abanico. Por otro lado, el Chaco sufrió cambios climáticos durante el Cuaternario que significaron alternancias de períodos secos y fríos con otros húmedos y más cálidos. Las unidades geológicas más antiguas ponen en evidencia la existencia de períodos más secos que el actual, durante los cuales el transporte eólico fue el agente predominante. Luego, los cambios en el

régimen pluvial hacia el inicio del Holoceno determinaron la interrupción del desarrollo de los conos aluviales. Según Iriondo (1997), la época del mayor desarrollo del sistema aluvial del río Salado del Norte, se estima corresponde al Pleistoceno superior (36 a 13 ka AP). Sus características sedimentarias son las de un sistema aluvial de clima seco con una estación húmeda torrencial, compuesto por un conjunto de subsistemas de abanicos menores (formados durante períodos secos sobre bloques tectónicamente hundidos), fajas aluviales intrincadas y áreas lagunares y pantanosas (Iriondo 1993). Actualmente, el río Salado del Norte cruza la región de modo permanente y con un bien definido cauce principal hasta alcanzar los 25°40'S, lugar donde desemboca en el Bañado de Copo, donde es reconstituido por una sucesiva adición de pequeños canales originados dentro del pantano (Miró y Martos 2002). Se asocian campos de dunas y mantos de loess formados en dos episodios de climas secos con fuertes vientos boreales, durante el Cuaternario superior, que generaron ríos más pequeños y menos estables de lo que son en el presente. Estos depósitos predominantemente eólicos y los del antiguo cono del Salado, pasan gradualmente hacia el este a una asociación de sedimentos de ambiente palustre a fluvial (Iriondo 1987). La región distal del abanico aluvial, también llamada Chaco Oriental, constituye un área donde los movimientos neotectónicos tienen una significativa mayor influencia relativa, debido a una velocidad de sedimentación baja (Iriondo 1984). Como los ríos tienen suaves perfiles longitudinales son muy influyentes sobre las planicies aledañas, al punto que grandes inundaciones suelen cubrirlas frecuentemente por varios meses cada año, y sólo los albardones viejos permanecen sobre el nivel del agua. Por ello, se observan ambientes pantanosos, representados por esteros y bañados, conocidos también como bajos submeridionales, vinculados a un clima subhúmedo a húmedo, que son cruzados por antiguos cursos fluviales. Según

Neiff (1986), estos pantanos temporarios o bañados, se forman por almacenamiento de precipitaciones sin acumular sedimentos mientras que, los pantanos permanentes o esteros, poseen bordes bien definidos y mayores dimensiones.

Los pantanos mayores proveen las aguas de cabecera de las redes de ríos locales que se desarrollan sobre los grandes abanicos, durante el clima húmedo actual. Su formación se favorece por una pendiente regional muy baja, y sería posterior al desarrollo de los grandes abanicos aluviales y de la primera gran depositación del loess pampeano, entre el Holoceno medio y superior. A partir de estas áreas pantanosas, se desarrolla un drenaje irregular, divagante, parcialmente meandriforme, con pendiente general hacia el SE, representado por pequeños canales tortuosos de 2 a 5 metros de ancho, que fluyen a lo largo de canales abandonados de los ríos mayores, como un tipo especial de ríos de relleno inferior (Iriondo 1993).

## PROCESAMIENTOS DIGITALES REALIZADOS

Se realizaron procesamientos de cartografía digital con la finalidad de visualizar los rasgos morfológicos y minimizar los efectos de la vegetación tupida del monte chaqueño de la superficie estudiada. La metodología utilizada consistió en la confección e interacción de capas temáticas, diseñadas sobre la base de la extracción de información de imágenes satelitales ópticas y de un modelo digital de elevaciones. Los datos crudos se consiguieron a partir de archivos de altimetría satelital SRTM (*Shuttle RADAR Topography Mission*) de la NASA (JPL-SRTM-NASA 2000, CGIAR-CSI 2004), obtenidos con un sistema de radar modificado por la nave Endeavour (2000), con distancia de 3 arco-segundo entre los puntos con valor de altitud y con una resolución espacial de 90 metros. Se confeccionaron curvas de nivel con una equidistancia de 10 metros y se trazaron perfiles topográficos en dirección O-E sobre las anomalías del relieve observadas, cada

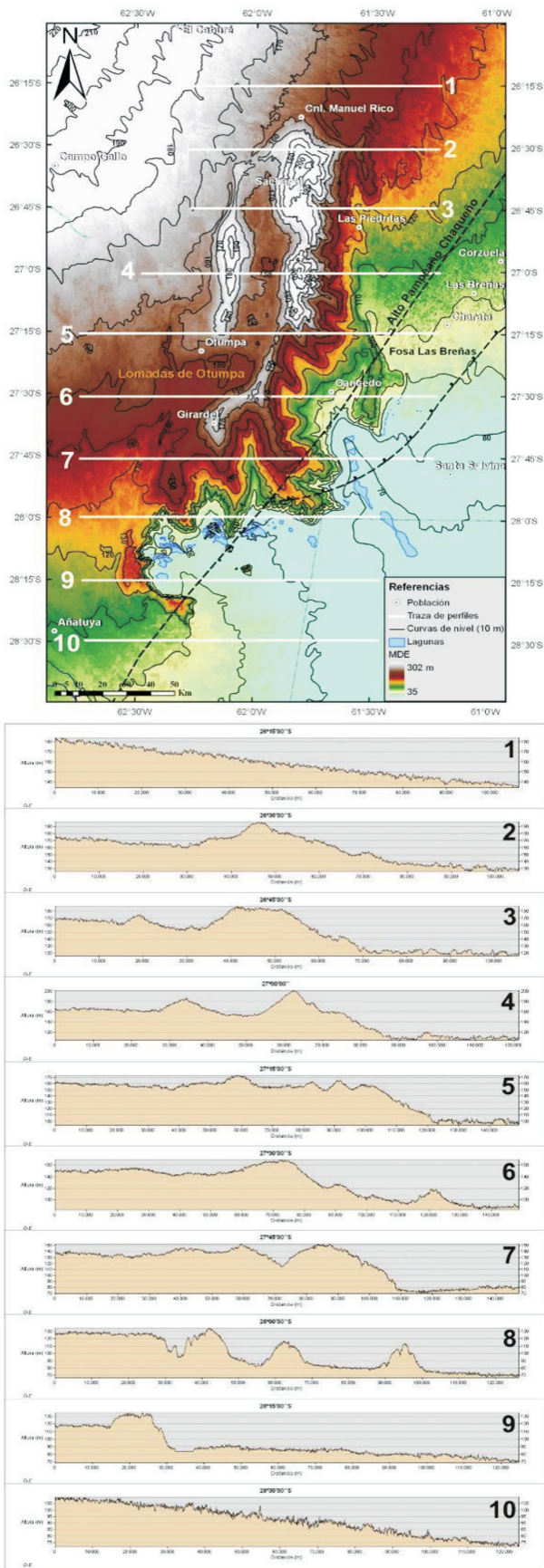


Figura 2: a) Vista en planta del modelo de elevación digital de la zona de las Lomas de Otumpa combinado con curvas de nivel y la ubicación de los perfiles topográficos; b) Perfiles topográficos trazados cada 15' de latitud.

15' de latitud (Fig. 2). Se contó también, con capas de información geográfica obtenidas del Atlas Digital de los Recursos Hídricos Superficiales de la República Argentina a escala 1: 250.000 (2002), y del Sistema de Información Geográfica de Santiago del Estero (SIG SE 2.0, Angueira *et al.* 2007). Finalmente, todas las capas fueron georreferenciadas e integradas en una plataforma de sistema de información geográfica.

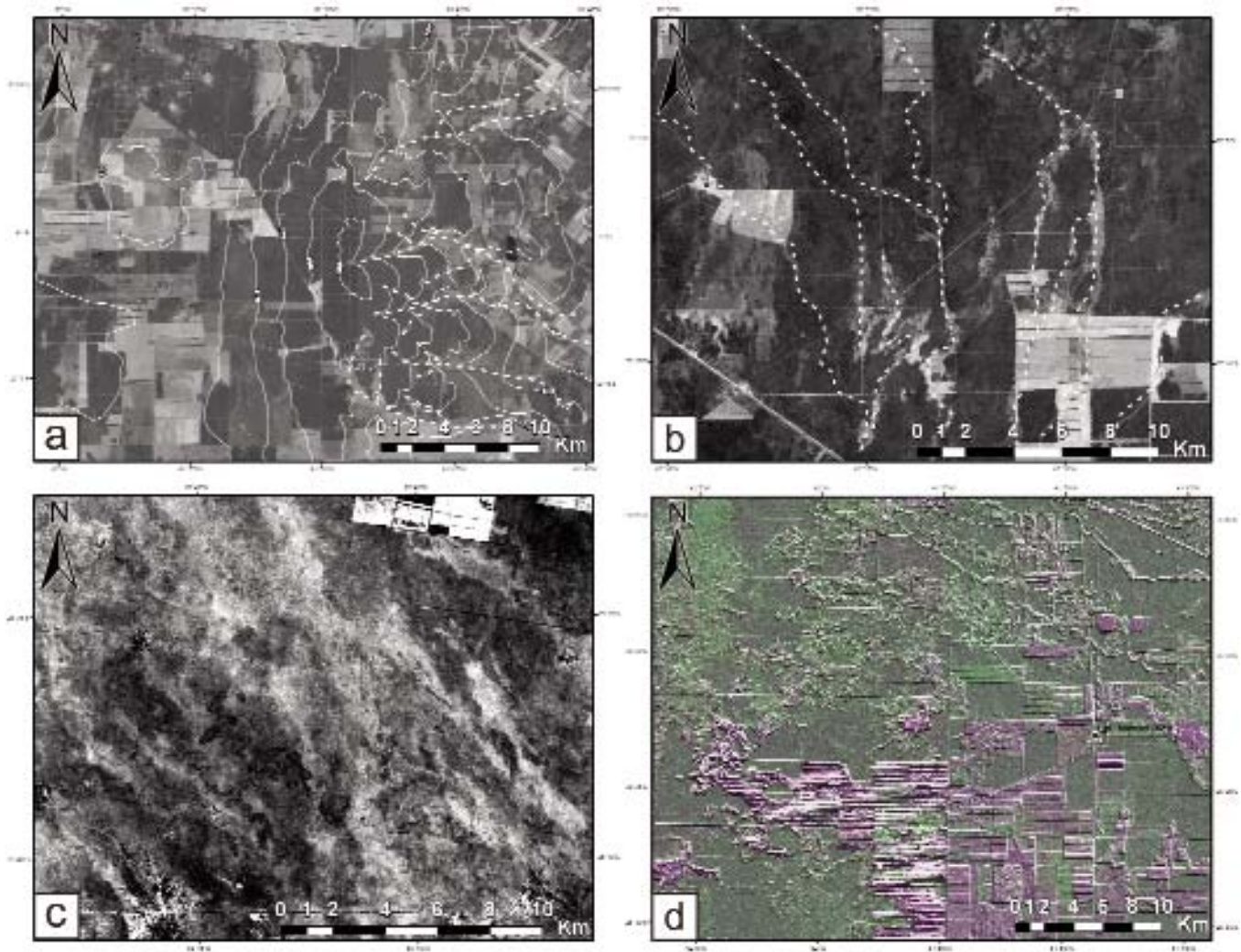
Con la finalidad de optimizar la información proporcionada por las diferentes imágenes, se realizaron las siguientes etapas de tratamientos:

**Selección de datos satelitales e información auxiliar**

La selección de los datos satelitales, se efectuó a partir de la determinación de las condiciones mínimas que deben cumplir para generar las capas de interés, como su resolución espectral y espacial, fecha de obtención, disponibilidad, etc. En este sentido, se consideraron satisfactorias cinco imágenes, tomadas en los años 2000, 2001 y 2002 del satélite Landsat 7, sensor óptico ETM+, por ser datos multiespectrales, con resolución espacial de 28,5 metros y por su disponibilidad en servidores públicos (GLCF, 2009; ESDI, 2004). Se seleccionaron las siguientes bandas espectrales de interés: segmento del espectro electromagnético azul (0,45-0,52  $\mu\text{m}$ -ETM+1), verde (0,52-0,60  $\mu\text{m}$ -ETM+2), rojo (0,63-0,69  $\mu\text{m}$ -ETM+3), infrarrojo cercano (0,76-0,90  $\mu\text{m}$ -ETM+4), infrarrojo medio 1 (1,55-1,75  $\mu\text{m}$ -ETM+5) e infrarrojo medio 2 (2,10-2,35  $\mu\text{m}$ -ETM+7). Conjuntamente, se contó con un mosaico de imágenes del mismo satélite, en formato Mr. Sid (S-20-25) de la NASA (Geo Cover 2000), utilizado para los análisis regionales, no así para el procesamiento digital ya que su resolución radiométrica se reduce a las bandas ETM+7, 4 y 2.

**Preprocesamiento**

Esta etapa, consiste en la corrección radiométrica de los datos, donde se localizaron y restauraron las líneas que presentaban píxeles perdidos o “ruidos”, según



**Figura 3:** Procesos Digitales. a) Falso-Color 543 (RGB). Se destacan en líneas punteadas los cauces c y d, con diseño radial asimétrico (alto de 200 metros perteneciente al extremo septentrional de la estribación mayor oriental); b) Falso-Color 543 (RGB). Se destacan en líneas punteadas los paleocauces c y d, que se desvían en sentido N-S (flanco noroccidental de las Lomadas de Otumpa); c) NDVI con leve contraste, se observan paleocauces a y b (cercano al apice del abanico aluvial); d) Filtros direccionales (ángulos entre 100 y 120o) con transparencia al 10 % superpuestos a imágenes en Falso-Color 543 (RGB) que resaltan paleocauces en áreas cultivadas (extremo septentrional de las Lomadas de Otumpa).

metodologías de Chuvieco (1996). Dado que los datos originales están georreferenciados en sistemas de coordenadas geográficas diferentes, se procedió a rectificarlos y proyectarlos en un plano conforme al sistema nacional de proyección geográfica POSGAR Faja 4.

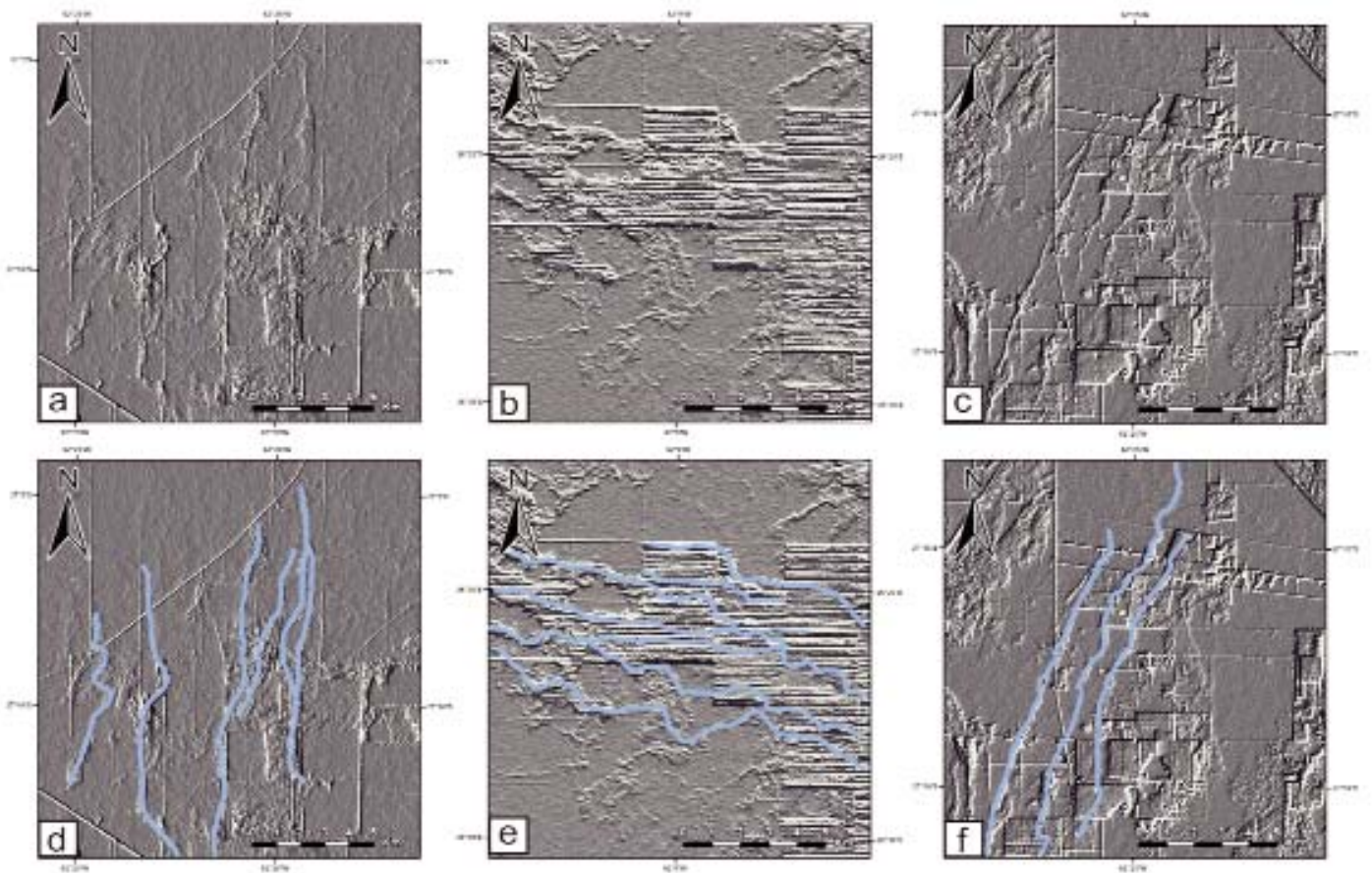
#### Procesamiento digital

Con la finalidad de simplificar la cantidad de datos y optimizar la interpretación visual, en esta etapa se reducen las dimensiones espectrales y espaciales y se efectúan recortes y mejoras de las imágenes. Aquí, se trabajó con recortes de las imágenes para los cuales se confeccionó una no-

menclatura, que consiste en una combinación de letras que refieren a su ubicación geográfica, y según el caso, el proceso al cual fueron sometidos. Se tuvieron en cuenta diferentes tipos y densidades de coberturas vegetales establecidas por ingenieros forestales que trabajan en la región, mediante el análisis visual de fotografías aéreas e imágenes satelitales (Zerda 2001). Ellas son: bosque denso (cobertura boscosa >10%), bosque abierto o muy degradado (zonas en recuperación y palmares), arbustal (cobertura de vegetación >10%, cobertura boscosa <10%), arbustal-pastizal, incendios, agricultura y suelo desnudo. Para realizar un mapa detallado de los pa-

leocauces, se tuvo en cuenta la cobertura de los pastizales y arbustales-pastizales, así como sus diseños meandriformes. Para ello se trabajó esencialmente adoptándose los siguientes procesos:

- i) Combinaciones de bandas ETM+ “Falso-Color 543 (RGB)” que destaca los pastizales en colores magenta (Fig. 3a), en amarillo/blanco se observa suelo desnudo y vegetación herbácea, por su mayor reflectancia, en verde claro destaca arbustales y pastizales, con biomasa menor al bosque (Fig. 3b) y en verde oscuro se realzan los bosques densos; “Falso-Color 752 (RGB)” que resalta la hidrografía en color azul.
- ii) Índice de vegetación normalizado (NDVI)



**Figura 4:** Vistas de recortes de imágenes en donde se realzan las texturas de tres direcciones predominantes de orientación de paleocauces por sobre las zonas cultivadas: a) N-S, b) N 120° y c) N 210°, d) e) y f) ídem con la interpretación realizada de los paleocauces.

para cada recorte, que utiliza las bandas ETM+3 (rojo) y 4 (infrarrojo cercano) y se relaciona directamente con la abundancia de biomasa vegetal (Fig. 3c).

iii) Filtros direccionales para realzar bordes que sigan orientaciones predeterminadas, con coeficientes de filtrajes de 3x3 (se utilizó la técnica de filtrado por convolución, Chuvieco 1996), ajustándose los histogramas de las bandas de imágenes consecutivas para asemejar la apariencia (Fig. 3d).  
iv) Finalmente, se aplicó un realce del contraste con una expansión lineal del 2%, para distribuir mejor los números digitales y mejorar la visualización.

### Interpretación

A partir de los filtros direccionales anteriores se midieron las orientaciones generales de paleocauces, obteniéndose tres principales (Fig. 4): N 120°-140° (NO-SE), N 0° (N-S) y N 220°-240° (NE-SO). Paralelamente, se procesó el modelo de ele-

cción digital en escenas 3D con distintas exageraciones verticales y direcciones de sombreados, para hacer más conspicuos y evidentes los cambios de nivel suaves.

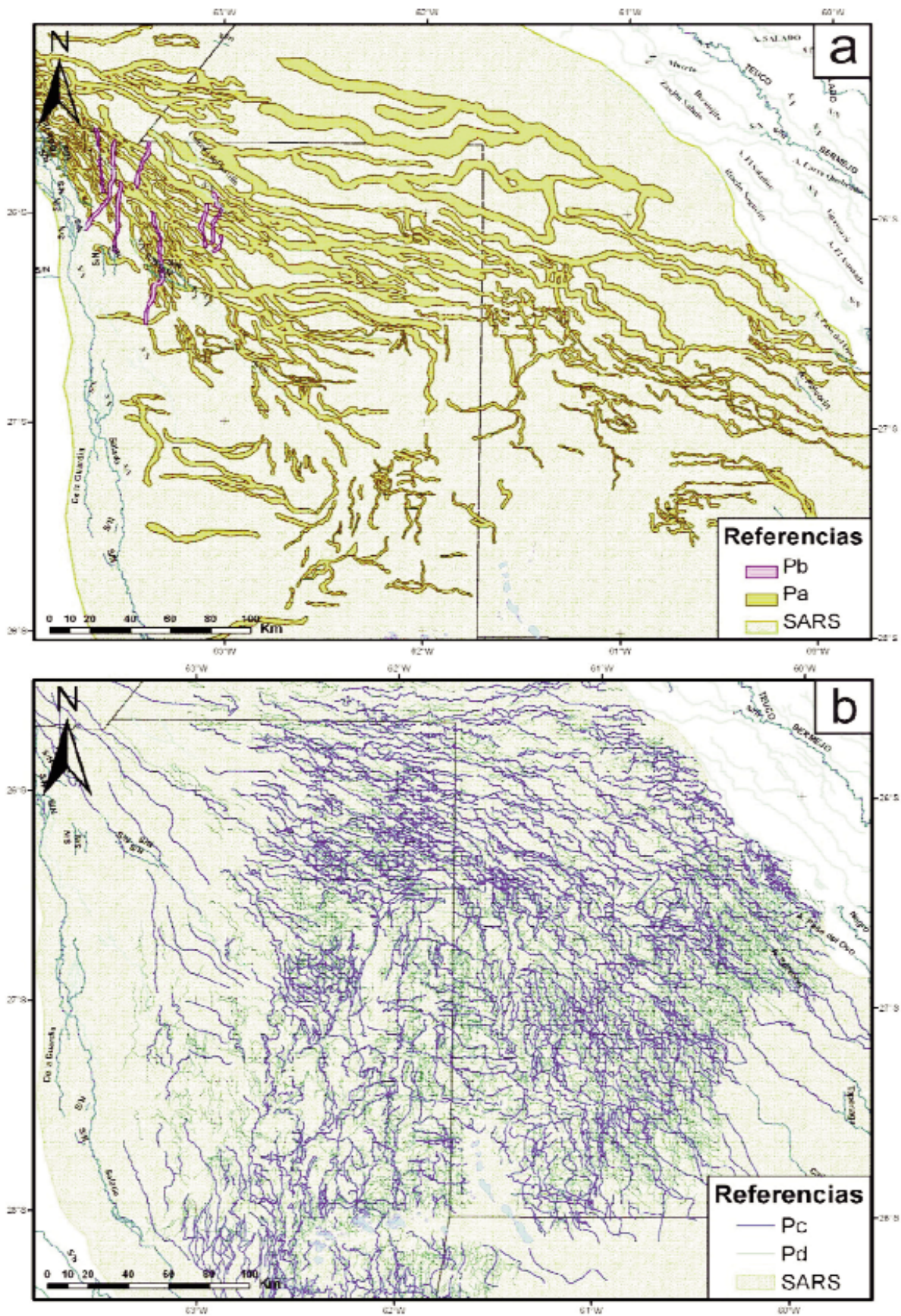
### Análisis e integración de datos

Para la integración y visualización de los resultados obtenidos del procesamiento digital de las imágenes satelitales, de las capas temáticas y del MDE, se construyó un SIG bajo el sistema nacional de proyección geográfica POSGAR Faja 4. Así, mediante interpretación visual se diseñaron y definieron las siguiente capas de interés: Sistema de Abanico Aluvial del río Salado del Norte, estructuras, curvas de nivel (equidistancia 10 metros), paleocauces a, b, c y d cartografiables a escala 1: 100.000, anomalías y modificaciones fluviales (Figs. 5 y 6).

### RESULTADOS OBTENIDOS

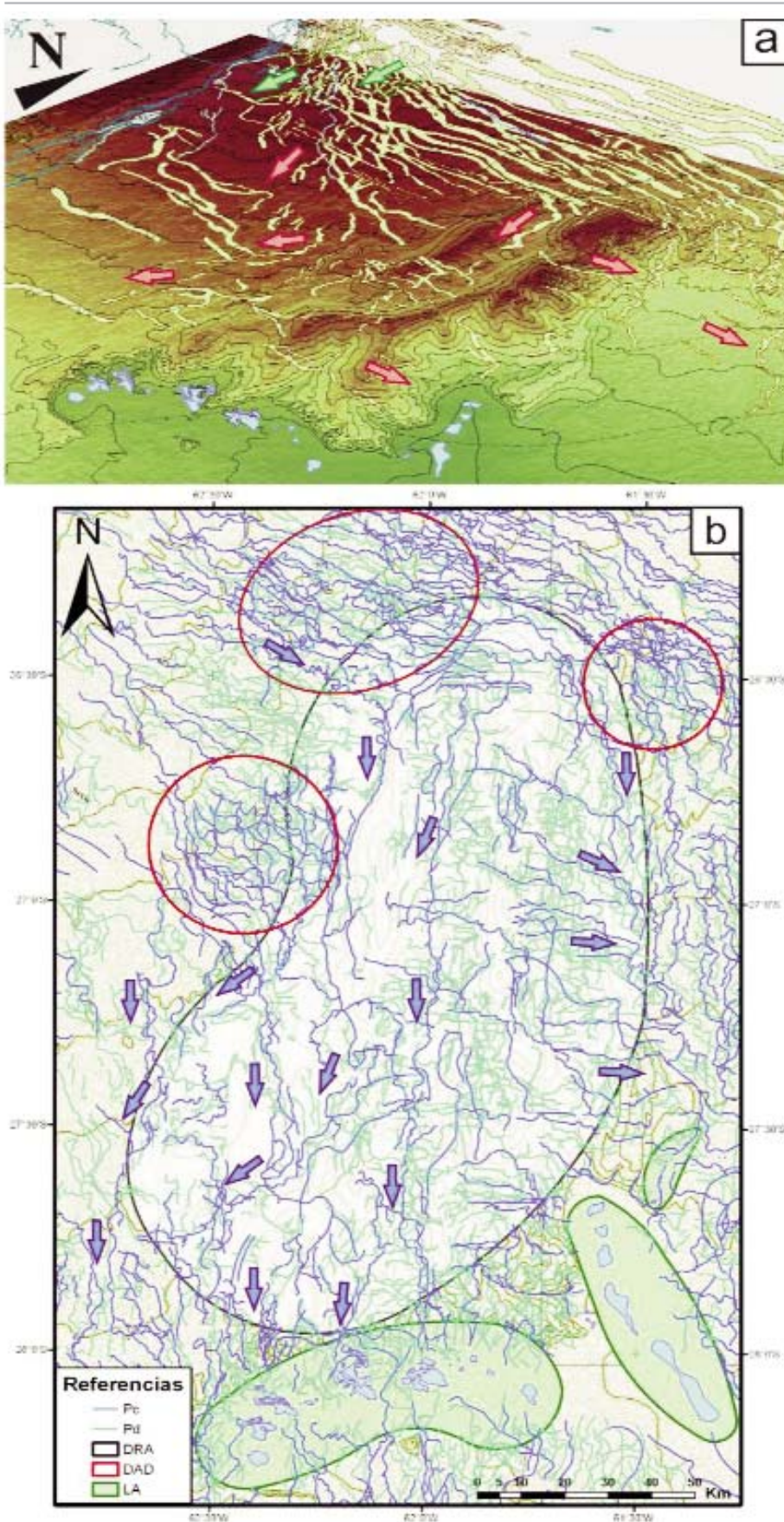
La cubierta vegetal natural depende en

gran medida del carácter y altura relativa del sustrato. Por ello, se puede convertir su distribución en la expresión superficial de los diferentes ambientes fluviales donde se desarrollan. Según Iriondo (1993) los bosques diversificados se concentran sobre los albardones y otras superficies elevadas, las palmeras sobre elevaciones intermedias y los pastizales altos en depresiones, como los paleocauces. A su vez, es importante tener en cuenta que la vegetación nativa sufre una importante degradación debido a varias problemáticas antrópicas, entre ellas la transformación del bosque original a sabanas pirógenas, donde dominan alternativamente los arbustos y pastos. El fuego se origina habitualmente en los paleocauces y las abras naturales, en su mayoría cubiertos por pastizales, y se incrementa con los vientos fuertes de las épocas de quemadas expandiéndose hacia las áreas cubiertas por pastos y arbustos, para finalmente



**Figura 5:** Definición de paleocauces. Sistema aluvial del río Salado (SARS). a) Mapa de paleocauces a (Pa) y b (Pb); b) Mapa de paleocauces c (Pc) y d (Pd).





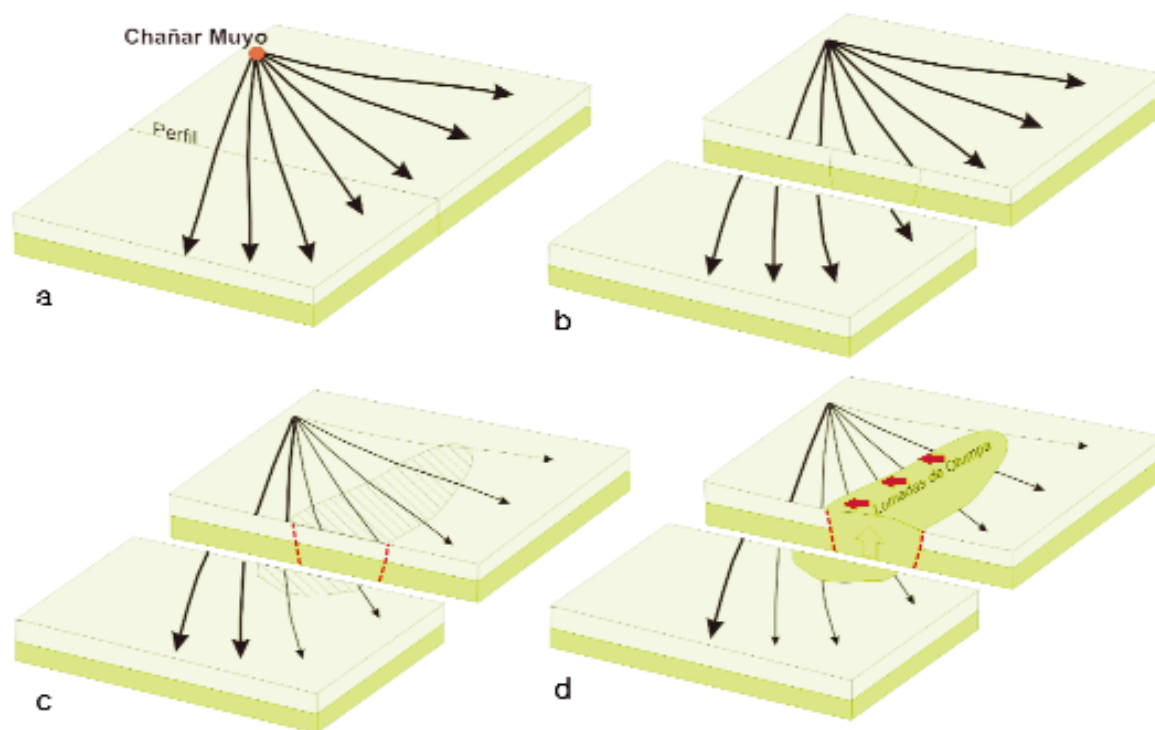
penetrar en el bosque favorecido por la extrema sequedad. El fuego se utiliza también para la eliminación más económica de los desechos del desmonte, cuando se transforman los terrenos con bosque a nuevas áreas para explotación agropecuaria (Zerda 2001).

**Definición de paleocauces**

Mediante el procesamiento digital integrado de las imágenes satelitales y el modelo de elevación digital, se pudieron diferenciar coberturas vegetales y edáficas que por sus morfologías, texturas, colores, direcciones de escurrimiento y edades relativas, indican los siguientes cuatro grupos de paleocauces pertenecientes al antiguo abanico aluvial del río Salado, a su actual llanura aluvial, y a otros cauces formados en la región de los Bajos Submeridionales (Fig. 5).

*Paleocauces a:* Se identifican como **Pa** (Fig. 5a), se los considera como los más antiguos debido a sus rasgos casi completamente obliterados por sedimentos suprayacentes, hecho que dificulta su visualización. Pertenecen a los paleocauces del antiguo Abanico Aluvial del río Salado con sentido de escurrimiento general NO-SE y un diseño distributivo de escala regional. Son de baja sinuosidad y sus planicies aluviales poseen un ancho estimado, dado que sus márgenes no son netos, de 1.000 a 3.000 metros, observándose los más anchos cercanos al ápice del abanico aluvial (Chañar Muyo, Salta). Estos paleocauces se identificaron principalmente con las imágenes en composi-

**Figura 6:** Modificaciones del drenaje. a) Vista basculada al noroeste de las Lomadas de Otumpa donde se reconocen los paleocauces a y b. En su flanco noroccidental, se observa el desvío de los paleocauces a en sentidos N-S y NNE-SSO a NE-SO (flechas rosadas), y de los paleocauces b con orientaciones NNE-SSO a N-S (flechas verdes). Atraviesan las estribaciones en sentido O-E algunos paleocauces a; b) Paleocauces c y d (flechas celestes) en sentido N-S, principalmente en el flanco noroccidental de las Lomadas de Otumpa y en el bajo que las separa, en sentido NNE-SSO a NE-SO en el extremo austral de las estribaciones, y escasos O-E en el flanco sudoriental. Diseño radial asimétrico (DRA), Desorganización Abrupta del Drenaje (DAD) y Lagunas Alineadas (LA).



**Figura 7:** Esquema de evolución del abanico fluvial del río Salado del Norte con el levantamiento de las Lomadas de Otumpa: a) Etapa inicial con la distribución del abanico; b) Vista de la posición de un corte; c) Posición de las Lomadas de Otumpa en rayado con una migración progresiva hacia el S; d) Situación final, en la que se levantan las Lomadas de Otumpa, se disectan cauces, invierte el drenaje sobre su flanco occidental y favorece la erosión de los paleocauces.

ción falso-color 543 (RGB), en colores magenta, verde claro y amarillo/blanco, dado por los pastizales que ocupan su superficie. También, reforzaron su identificación las imágenes con NDVI, en diferentes contrastes (Fig. 3c). En este caso los filtros direccionales no han aportado a la identificación de los mismos. En las zonas elevadas topográficamente, no se observa este grupo.

**Paleocauces b:** En este grupo identificado como **Pb** (Fig. 5a) se definen paleocauces similares a los anteriores, pero con anchos menores (de 1.000 a 2.000 metros) y orientaciones NNE a N, que parecen ser más tardíos en la zona proximal del abanico.

**Paleocauces c:** Se identifican como **Pc** (Fig. 5b). En este grupo se incluyen a los cauces primitivos del río Salado, más modernos que los paleocauces precedentes (**b**), otros cauces activos que aprovechan los primeros y cauces formados en la región de los bajos submeridionales. Están bien demarcados y han sido de primera magnitud, con sentido de escurrimiento principalmente NO-SE, con desvíos locales N-S, NNE-SSO a NE-SO y O-E. Son más angostos que los paleocauces **a** y **b** (ancho promedio de entre 90 y 300 metros) y de di-

seños meandriformes con sinuosidades variables. Sus rasgos son obliterados, principalmente en zonas de cultivo y de incendios, aunque los filtros direccionales han sido relevantes para resaltar la morfología de los canales sobre la cobertura vegetal (Fig. 3d). Se visualizaron principalmente con las imágenes en composición falso-color 543 (RGB), en colores magenta, verde claro y amarillo/blanco, dado por los pastizales (Figs. 3a y 3b).

**Paleocauces d:** Se identifican como **Pd** (Fig. 5b) y definen paleocauces como los anteriores (**c**), pero de un orden menor, con anchos promedios de 150 metros, razón por la cual son de difícil identificación a la escala de trabajo (Figs. 3a, 3b y 3d).

#### Modificaciones del drenaje

El análisis regional del drenaje a partir de anomalías de escurrimiento (siguiéndose las técnicas de Howard 1967, Schumm *et al.* 2000), permitió reconocer desvíos locales del drenaje regional y/o modificaciones en los diseños de cursos que se acomodan a las estructuras y/o topografías regionales, particularmente en áreas de bajo relieve. Se pudo obtener información de rasgos estructurales locales, deformación activa, subsidencia diferen-

cial o cambios en el régimen hidrogeológico, en la zona de influencia de las Lomadas de Otumpa (Fig. 6).

De esta manera, se reconocieron desvíos del escurrimiento en los paleocauces a (Fig. 6a) en sentidos N-S y NNE-SSO a NE-SO principalmente en el flanco noroccidental de las Lomadas de Otumpa, y escasos O-E que atraviesan las mismas incluso en las vecindades de la provincia de Chaco. Se visualizan zonas con ausencia de los paleocauces a. Los paleocauces b se orientan NNE-SSO a N-S (Fig. 6a). Los paleocauces c y d (Fig. 6b) manifestaron desvíos del escurrimiento en sentido N-S principalmente en el flanco noroccidental de las Lomadas de Otumpa y en el bajo topográfico que las separa, mientras que son escasos con esta orientación en su flanco sudoriental. En el extremo austral de ambas estribaciones se observan los paleocauces c y d (Fig. 6b) en sentidos NNE-SSO a NE-SO, y escasos O-E en el flanco sudoriental. Por otro lado, se pueden reconocer modificaciones del patrón del drenaje, observándose radial asimétrico localizado en la zona de las Lomadas de Otumpa que desarrolla cauces largos hacia el este y cortos al oeste. Aquí, los cauces parten desde los al-

tos topográficos, con mayor evidencia en la zona septentrional. Además, se observa una desorganización abrupta del drenaje, principalmente al noroeste y noreste, donde los cauces se agrupan, perdiéndose el diseño y dirección regional (Fig. 6b).

Finalmente, se observa una zona de drenaje centrípeto en el extremo austral de las Lomadas de Otumpa, dado por depresiones localmente orientadas. Está constituida por lagunas alineadas que se discriminaron según su disposición en orientaciones determinadas. El grupo más septentrional, se dispone en dirección N-S y está constituido por cuerpos de 100 a 250 metros de diámetro. Hacia el sudoeste, se observan las Lagunas Saladas de dimensiones mayores, dispuestas en forma levemente arqueada con convexidad hacia el SE, que a su vez presentan un ramal oriental alineado en dirección NNO-SSE, conocido como la Cañada El Saladillo (Fig. 6b).

## CONCLUSIONES

El procesamiento de imágenes satelitales ópticas conjuntamente con un modelo de elevación digital convenientemente asociado, permitió la obtención de resultados suficientemente satisfactorios para lograr no sólo superar las dificultades que representa la vegetación del monte chaqueño (que resulta un obstáculo para la fotointerpretación), si no por el contrario, se pudo aprovecharla para definir paleocauces del río Salado del Norte. Esto resulta en una solución ventajosa, porque los diferentes tipos de coberturas vegetales se distribuyen con un patrón determinado sobre distintas cubiertas sedimentarias, que pueden ser caracterizadas digitalmente.

El estudio del comportamiento del río Salado del Norte, evidenció dos importantes cambios en su dinámica hidrográfica de diferentes órdenes. En escala regional, constituye el gradual desvío del escurrimiento de su cauce principal, que originalmente lo hacía al ESE como los actuales ríos Pilcomayo y Bermejo, hacia el SSE. El ángulo original de expansión del antiguo abanico aluvial en función del ápice de Chañar Muyo, que en sus oríge-

nes era casi de 90° grados, se ve disminuido notablemente (Fig. 7). En escala local, se realizó el mapa detallado de los paleocauces que ha permitido identificar anomalías fluviales de distintos tipos, que se distribuyen esencialmente en zonas aleatorias a las Lomadas de Otumpa. Principalmente, se registran desvíos de los cauces que originalmente escurrían hacia el SE, en sentidos N-S y NNE-SSO, en el flanco noroccidental y en el bajo que separa a estas estribaciones, y escasos en sentido O-E en el flanco sudoriental. Además, se distinguió un drenaje radial asimétrico vinculado a la evolución de las Lomadas de Otumpa, propio de zonas de erosión residual típicas de altos topográficos estructurales. Al mismo tiempo, en la zona de las estribaciones han sido preservados sedimentos aluviales y fluvioeólicos, en relación con el entorno de depósitos aluviales, que han permitido el desarrollo de suelos profundos. Por último, las lagunas alineadas podrían tener un origen tectónico extensional.

Estas anomalías determinan una deformación activa, subsidencia diferencial o cambios en el régimen hidrogeológico, donde el antiguo abanico aluvial del río Salado del Norte fue disectado, interrumpiéndose progresivamente su pendiente natural al extremo, que ahora la invierte localmente hacia el NO y desvía el curso principal hacia el S, donde fluye actualmente.

Las Lomadas de Otumpa representan una reactivación de las antiguas estructuras controlantes del desarrollo occidental del relleno paleozoico de la fosa Las Breñas (Rossello *et al.* 2007, Fig.1). Estas estructuras constituyen zonas de debilidad que son aprovechadas por la convergencia Andina para resolver los acortamientos mediante su levantamiento, manifestándose en relieves incipientes.

Finalmente, se concluye que la hidrografía y geomorfología de la zona estudiada se ven afectadas por la presencia de rasgos de probable afinidad neotectónica que generan incipientes altos topográficos que, sin embargo, son de relevancia para una región con pendientes tan sutiles y monótonas. Por ello, la cartografía

digital de superficie, complementada con el conocimiento geológico de superficie y subsuelo, resulta una herramienta de interpretación insustituible para zonas de llanura con relieve poco evidente y en consecuencia, aporta a la información de la constitución geológica y al manejo de sus recursos naturales.

## AGRADECIMIENTOS

Se desea dejar constancia de nuestro agradecimiento a los Lics. Graciela Marín y Carlos Ninci coordinadores del Simposio de Teledetección del XVII Congreso Geológico Argentino por habernos invitado a presentar este trabajo y a los árbitros anónimos que contribuyeron con la calidad del mismo. Los colegas Roberto Miró (SEGEMAR), Oscar Coriale (INA) y Romina Falbo (OPDS) aportaron valiosa información y Cristóbal P. Bordarampé e Ignacio Cambón contribuyeron con soporte técnico. Este trabajo ha sido financiado en parte por el Proyecto UBACYT EX 272 y X194 "Caracterización tectosedimentaria de los depocentros del corredor cretácico del centro-oeste Argentino: Geometría y aspectos económicos y PIP 5433/2942 "Corredor Cretácico Transargentino: Caracterización tectosedimentaria y económica".

## TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

- Angueira, C. 2007. Geomorfología de Santiago del Estero. Ediciones INTA. Serie de Informes Técnicos EEA (Santiago del Estero) 39: 22 p.
- Angueira, C., Prieto, D., López, J. y Barraza, G. 2007. Sistema de Información Geográfica de Santiago del Estero Ediciones INTA. Centro Regional Tucumán - Santiago del Estero, Serie de Informes Técnicos EEA (Santiago del Estero). CD-ROM.
- Brunetto, E. y Iriondo, M.H. 2007. Neotectónica en la Pampa norte (Argentina). Revista de la Sociedad Geológica de España 20(1-2): 17-29, Madrid.
- Castellanos A. 1968. Desplazamientos naturales, en abanico, del río Salado del

- Norte en la llanura Chaco-Santiagueño-Santafesina. Instituto de Fisiografía y Geología, Universidad Nacional de Rosario, Publicaciones 52: 19 p., Rosario.
- Chebli, G.A., Mozetic, M.E., Rossello E.A. y Buhler, M. 1999. Cuencas sedimentarias de la llanura Chacopampeana. En Caminos, R. (ed.) Geología Argentina, Instituto de Geología y Recursos Minerales, SEGEMAR, Anales 29 (20): 627-644, Buenos Aires.
- Chuvieco, E. 1996. Fundamentos de teledetección espacial. Ediciones RIALP, 3ª Edición Revisada, 568 p., Madrid.
- CGIAR-CSI 2004. The CGIAR Consortium Spatial Information, URL: <http://srtm.csi.cgiar.org/>
- Cobbold, P.R., Rossello, E.A., Roperch, P., Arriagada, C., Gómez, L.A. y Lima, C. 2007. Distribution, timing, and causes of Andean deformation across South America. En Ries, A.C., Butler, R.W.H. y Graham, R.H. (eds.) Deformation of the continental crust: The legacy of Mike Coward. Geological Society, Special Publications 272: 321-343, London.
- Coriale, O. 2006. Estudio de fuentes de agua subterránea con fines de provisión de agua potable y exploración hidrotermal. Informe Técnico del Instituto Nacional del Agua, 104 p., (Inédito), Buenos Aires.
- DeBlieux, C.W. 1949. Photogeology of Golf Coast exploration. American Association of Petroleum Geologists Bulletin 33: 1251-1259.
- ESDI 2004. Earth Science Data Interface, URL: <http://glcfapp.umiacs.umd.edu:8080/esdi/index.jsp>
- GeoCover 1990/2000, URL: <https://zulu.ssc.nasa.gov/mrsid/mrsid.pl>
- GLCF 2009. Global Land Cover Facility, URL: <http://www.landcover.org/index.shtml>
- Howard, A.D. 1967. Drainage analysis in geologic interpretation: a summation. American Association of Petroleum Geologists Bulletin 51(11): 2246-2259.
- Iriondo, M.H. 1984. The Quaternary of Northeastern Argentina. Quaternary South American and Antarctic Peninsula, A.A. Balkema Publication 2: 51-78, Rotterdam.
- Iriondo, M.H. 1987. Geomorfología y Cuaternario de la provincia de Santa Fe. D'Orbignyana 4: 1-54, Corrientes.
- Iriondo, M.H. 1993. Geomorphology and late Quaternary of the Chaco (South America). Geomorphology 7: 289-303.
- Iriondo, M.H. 1997. Models of deposition of loess and loessoids in the Upper Quaternary of South America. Journal of South American Earth Sciences 10: 71-79.
- Iriondo, M.H. 1999. The Neogene of the Llanos-Chaco-Pampa Depression. Episodes 22 (3): 226-231.
- JPL-SRTM-NASA 2000. Jet Propulsion Laboratory, Shuttle Radar Topography Mission, National Aeronautics and Space Administration, URL: <http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/>
- Marengo, H. 2008. Nuevas evidencias de neotectónica en la Llanura Central Santafesina. 17º Congreso Geológico Argentino, Actas 3: 1233-1234, Jujuy.
- Miró, R.C. y Martos, D.E. 2002. Memoria de Hoja geológica de la provincia de Chaco. Escala 1: 500:000. SEGEMAR, (Inédito), 8 p., Buenos Aires.
- Neiff, J. 1986. Sinopsis ecológica y estado actual del Chaco oriental. Revista Ambiente Subtropical 1: 5-35, Corrientes.
- Pasotti, P. 1968. Evidencias morfológicas del levantamiento de la "Pampa Levantada" en un sector de la llanura Santafesino-Bonaerense. Instituto de Fisiografía y Geología, Universidad Nacional de Rosario, Publicaciones 53: 1-46, Rosario.
- Pasotti, P. 1974. La Neotectónica en la Llanura Pampeana. Fundamentos para el mapa neotectónico. Instituto de Fisiografía y Geología, Universidad Nacional de Rosario, Publicaciones 58: 1-27, Rosario.
- Peri, V.G. y Rossello, E.A. 2008. Influencias morfoestructurales e hidrográficas de las Lomadas de Otumpa (Santiago del Estero y Chaco, Argentina). 17º Congreso Geológico Argentino, Actas 1: 418-419, Jujuy.
- Ramos, V.A., Cristallini, E.O. y Pérez, D. 2002. The Pampean flat-slab of the Central Andes. Journal of South American Earth Sciences 15: 59-78.
- Rossello, E.A. y Bordarampé, C.P. 2005. Las Lomadas de Otumpa: nuevas evidencias cartográficas de deformación neotectónica en el Gran Chaco (Santiago del Estero, Argentina). 16º Congreso Geológico Argentino, Actas CD-ROM, Ponencia 210, La Plata.
- Rossello, E.A., Mon, R., Bordarampé, C.P. y Gutiérrez, A. 2005. Evidencias topográficas de actividad neotectónica en la Llanura Chacoparanaense: consecuencias en la organización del drenaje de Mar Chiquita (Córdoba, Argentina). 10º Simposio Nacional de Estudios Tectónicos - 4º International Symposium on Tectonics, Boletim de Resumos Expandidos: 205-208, Curitiba.
- Rossello, E.A., Bordarampé, C.P. y Peri, V.G. 2007. The Otumpa faulting (Gran Chaco plain, Argentina): the farthest megastructure due to the Central Andean flat slab subduction. Subduction Zone Geodynamics Conference (Montpellier), Mémoires Géosciences-Montpellier 41: 62.
- Schumm, S.A., Dumont, J.F. y Holbrook, J.M. 2000. Active tectonics and alluvial rivers. Cambridge University Press, 276 p., Cambridge.
- SSRH-INA 2002. Atlas Digital de los Recursos Hídricos Superficiales de la República Argentina. Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación, Instituto Nacional del Agua, CD-ROM, Buenos Aires.
- Terrizzano, C.M. y Cortés, J.M. 2008. Anomalías de drenaje como indicadores de ligazón débil en sistemas de fallas cuaternarias. Precordillera Sur, Provincia de San Juan. 17º Congreso Geológico Argentino, Actas 3: 1260-1261, Jujuy.
- Zerda, H.R. y Moreira, M.L. 2001. Superficies afectadas por el fuego en el Chaco Santiagueño. Evaluación mediante percepción remota y sistemas de información. Revista de la SECyT (Universidad Católica de Santiago del Estero) 6: 1-152.

Recibido: 6 de Noviembre, 2009

Aceptado: 25 de Marzo, 2010