

# La actividad neotectónica en la sierra Baja de San Marcos - Cruz del Eje, flanco occidental de las Sierras Pampeanas Orientales

Armando MASSABIE<sup>1</sup>, Alicia SANGUINETTI<sup>1</sup>, Gabriela LO FORTE<sup>1,2</sup> y Marcelo CEGARRA<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidad de Buenos Aires, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Departamento de Ciencias Geológicas, Ciudad Universitaria, Pabellón II, C1428EHA, Buenos Aires, Argentina.

<sup>2</sup>CONICET

E-mail: armando@gl.fcen.uba.ar; asan@gl.fcen.uba.ar; galof@gl.fcen.uba.ar; marcega@gl.fcen.uba.ar

**RESUMEN.** El área pedemontana de San Marcos Sierra – Cruz del Eje constituye, en la provincia de Córdoba, Argentina, una comarca clave para el análisis neotectónico en las Sierras Pampeanas Orientales. En esta región se han realizado estudios centrados en la unidad morfoestructural sierra Baja de San Marcos donde, aplicando un control múltiple de datos estructurales, geomorfológicos, sedimentológicos, paleontológicos y radimétricos, se ha determinado temporal y espacialmente la evolución de la actividad neotectónica del fallamiento andino. Se presentan evidencias sobre la reactivación cuaternaria tardía de la Falla Sierra Baja de San Marcos, conspicua falla inversa de vergencia occidental con componentes de desplazamiento de rumbo y de inclinación, enlazando los episodios tectónicos con las modificaciones del paisaje. Estas modificaciones son expresadas por los depósitos de endicamiento del río Quilpo, por los niveles aterrazados, vinculados a los cauces actuales de los ríos de la Costa (San Marcos) y Quilpo, y por los cambios en su desarrollo de la red de avenamiento principal de la región. La edad <sup>14</sup>C corregida de 2.560±120 aap, obtenida para los sedimentos del endicamiento permite acotar un primer episodio de actividad, Holoceno tardío, de la Falla Sierra Baja de San Marcos. Las observaciones efectuadas sobre la misma estructura, en una trinchera excavada para su investigación, confirman su extensión hacia el noroeste, dan evidencias sobre una segunda etapa de movimientos en el Holoceno tardío y determinan sus características estructurales comunes a otras fallas con actividad neotectónica estudiadas en las Sierras Pampeanas Orientales, las cuales responden a una mecánica transpresiva.

Palabras clave: *Neotectónica, Pie de monte, Cuaternario tardío, Falla, Reactivación*

**ABSTRACT.** *Neotectonic activity in the Sierra Baja de San Marcos – Cruz del Eje area, west flank of Sierras Pampeanas Orientales.* The San Marcos Sierra-Cruz del Eje mountain-piedmont (Córdoba province, Argentina) is a key area in order to analyse the neotectonic behaviour of the Sierras Pampeanas Orientales. In this place, the evolution of recent Andean faulting activity has been temporally and spatially determined by multiple control of structural, geomorphological, sedimentological, palaeontological and radiometric data taken from the morphostructural Sierra Baja de San Marcos unit and surrounding areas. Evidence of the Late Quaternary reactivation in the Sierra Baja de San Marcos fault, a striking reverse fault with a western vergence, and strike and dip displacements, is here presented. As a result, a series of tectonic events and landscape modifications are described. The last ones are demonstrated by avulsion deposits of the Quilpo river, by terrace levels linked to the present channels of the la Costa (San Marcos) and Quilpo rivers, and by changes in the main drainage pattern of the region. A <sup>14</sup>C age of 2560± 120 years before present for the avulsion deposits of Quilpo river allows to define a first Late Holocene step in the Sierra Baja de San Marcos fault activity. The observations carried out in an excavated trench confirm its north-western extension, a second Late Holocene movement and determine that it exhibits characteristics alike others transpressive faults with neotectonic activity in the Sierras Pampeanas Orientales.

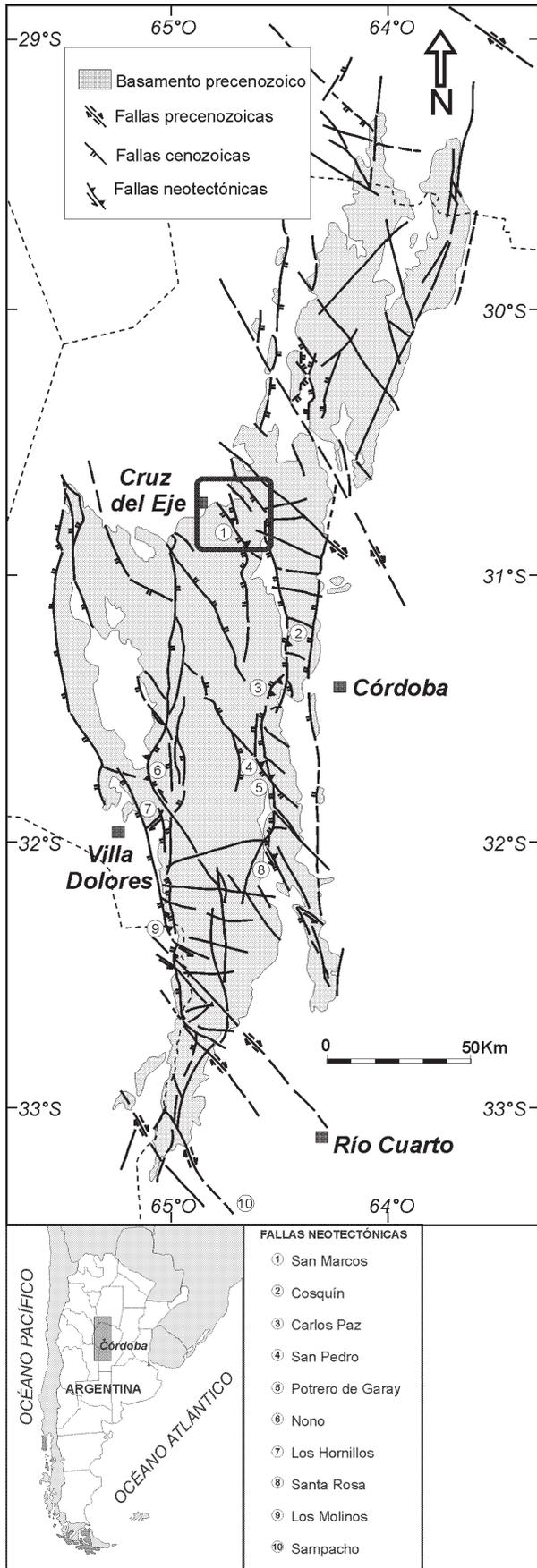
Key words: *Neotectonic, Mountain-piedmont, Late Quaternary, Fault, Reactivation*

## Introducción

La comarca considerada constituye un sector de particular interés en las Sierras Pampeanas Orientales por la suma de factores de control estructural, geomorfológico, sedimentológico, paleontológico y radimétrico que han podido ser discriminados y aplicados al estudio de la actividad neotectónica. Esta región morfo-

estructural presenta una orientación tectónica general norte – sur en correspondencia con la alineación tectónica andina, al igual que el resto de la unidad mayor de las Sierras Pampeanas de la cual forma parte (Fig. 1).

Dentro del cordón de las Sierras Pampeanas Orientales, la sierra Baja de San Marcos se ubica en su sector pedemontano noroccidental, en la provincia de Córdo-



ba (Fig. 1). Esta sierra posee como característica destacable, relaciones morfoestructurales y evidencias de actividad neotectónica que han sido comparadas con la localidad clásica Potrero de Garay (Massabie 1976). Esta última localidad, se halla aproximadamente a 100 km al sudeste, sobre el flanco oriental de las Sierras Pampeanas, en el valle de Calamuchita, y ha sido el lugar donde fue documentada por primera vez la actividad de fallamiento durante el Cuaternario (Schlagintweit 1954).

El análisis de la actividad neotectónica en los alrededores de San Marcos Sierra, centrado en la unidad morfoestructural sierra Baja de San Marcos, cobra también relevancia por la posibilidad de mostrar evidencias de esta actividad del fallamiento andino cuaternario sobre la base de control múltiple de datos. Esto permite reforzar la certidumbre y acotar temporalmente estos movimientos en la comarca, metodología de estudio que fuera señalada y aplicada en trabajos anteriores (Massabie *et al.* 1999, 2000).

Como sucede en muchos ambientes geológicos similares, el estudio del fallamiento debido a la actividad neotectónica en el ámbito de las Sierras Pampeanas Orientales se ve dificultado por las características propias de la región, entre las que se incluye la distribución saltuaria de los sedimentos continentales cuaternarios en cuencas intermontanas aisladas. Esta desconexión, sumada a la carencia de controles bioestratigráficos suficientes, constituye una limitación importante para correlacionar y datar los movimientos recientes en el área.

Por otra parte, aunque se reconocen buenas exposiciones de las estructuras deformativas, tanto por fotointerpretación geológica como en el terreno, ellas son frecuentemente enmascaradas por el desarrollo de la cobertura sedimentaria y del suelo actual, en parte profusamente vegetado y alterados a su vez por la actividad antrópica.

Estas características apoyan la necesidad de aplicar distintos controles a través de análisis multidisciplinario a la hora de acotar, tanto temporal como espacialmente, la deformación cuaternaria.

En este trabajo se presenta el análisis neotectónico del área pedemontana clave de San Marcos Sierra – Cruz del Eje, realizado mediante el empleo de criterios sedimentológicos, paleontológicos, radimétricos y morfoestructurales, lo cual ha permitido caracterizar la reactivación pleistocena - holocena del fallamiento andino en la comarca y efectuar una vinculación de los episodios tectónicos ocurridos con la evolución del paisaje y de la red de avenamiento principal durante el Cuaternario.

Para el mapeo se han empleado como base imágenes

**Figura 1:** Plano general con la ubicación geográfica, la estructura de fallamiento regional y las localidades relevadas de fallamiento cuaternario. Se ubica el área mapeada en detalle (San Marcos – Cruz del Eje). Adaptado de Massabie *et al.* (1999) y Massabie *et al.* (2000).

del satélite SAC-C-MMRS del 26 de junio del año 2001 y Landsat 7 ETM+ del 17 de abril del año 2002, así como fotografías aéreas verticales a escala 1:20.000, obtenidas en el año 1970 para la Dirección de Catastro de la provincia de Córdoba, y la hoja topográfica escala 1:50.000 San Marcos Sierra del Instituto Geográfico Militar. Las observaciones, mediciones y mapeos realizados en el terreno han sido localizados en parte directamente sobre estos materiales y en parte con el apoyo de un posicionador satelital manual de 12 canales.

### Marco geológico regional

Las Sierras Pampeanas constituyen un sistema de montañas de bloque, formado sobre el segmento de subducción subhorizontal de los Andes Centrales del sur entre los 28° - 33° S de latitud (Barazanghi e Isacks 1976; Isacks *et al.* 1982) y han sido definidas como un modelo similar al de la provincia de las *Rocky Mountains* por Jordan y Allmendinger (1986).

La comarca se encuentra en la zona central del antepaís a considerable distancia respecto de la Cordillera de los Andes y presenta, asimismo, una notable sismicidad (Cahill 1990; Cahill e Isacks 1992, Smalley *et al.* 1993) en correlación con la segmentación de la zona de Wadati - Benioff.

Las unidades geológicas están constituidas principalmente por rocas ígneas - metamórficas, que evolucionaron entre el Proterozoico y el Paleozoico superior y que conforman un basamento que fue fragmentado y elevado desde el Mioceno al presente mediante fallas inversas de alto ángulo (González Bonorino 1950) o bien localmente fallas de bajo ángulo luego modificadas a solevantamientos por apilamiento de la cuña bajocorrida (Martino *et al.* 1995).

Las fallas principales, que poseen en general un rumbo norte - sur e inclinan al este subhorizontalizándose al ganar profundidad, producen el ascenso y basculamiento de los bloques. Estas estructuras se hallan mayormente controladas por zonas de debilidad previa, constituidas principalmente por la inversión de fallas normales precenozoicas.

Las fallas oblicuas tienen también una participación sustantiva en la tectónica cenozoica y, junto con las longitudinales, definen la compartimentación regional en bloques de la provincia morfoestructural de Sierras Pampeanas. En particular, esta situación ha sido destacada para las Sierras Pampeanas Orientales por Massabie (1976) y Massabie *et al.* (2000). Al analizar la estructura tectónica de conjunto de esta extensa provincia morfoestructural es claro el control ejercido por megafallas oblicuas de rumbo noroeste y noreste durante la estructuración cenozoica, con evidente predominio del juego noroeste en la porción correspondiente a las Sierras Pampeanas Orientales donde se localiza la comarca en estudio (Fig. 1).

Es destacable que en los lugares donde se han relevado fallas con actividad neotectónica mediante estudios de detalle, también se comprueba en forma sistemática, si bien no excluyente, la presencia de fallamiento oblicuo activo (Massabie y Szlafsztein 1991, Massabie *et al.* 2000). Asociado a este último, se ha comprobado, también, la existencia de deslizamientos en zonas de falla cuaternarias con componentes de inclinación y de rumbo en un régimen tectónico transpresivo (Massabie 1993, Massabie *et al.* 2000).

### Análisis de la actividad neotectónica

#### *Geología local*

En el área abarcada por el estudio afloran rocas de basamento, denominadas Formación San Marcos (Massabie 1982) y distintos niveles de depósitos cuaternarios.

La Formación San Marcos está constituida por granitos, granodioritas y tonalitas, con facies pegmatíticas subordinadas, que presentan xenolitos, tabiques y colgajos de las rocas de caja dados por gneises y anfibolitas. Estas rocas muestran frecuentemente un carácter textural cataclástico que en ciertos sectores corresponde a milonitas y protomilonitas. Esta unidad ha sido asignada al Ordovícico inferior sobre la base de dataciones radimétricas efectuadas en granitos (Massabie 1982).

Los depósitos cuaternarios son mayormente de origen fluvial. Localmente también se han reconocido sedimentos eólicos en las cercanías del balneario Quilpo, sobrepuestos mediante discordancia erosiva a acumulaciones lagunares por endicamiento tectónico transitorio (Massabie y Limarino 1996). Su distribución coincide con las depresiones topográficas más extensas de la zona estudiada por las cuales circularon ríos caudalosos durante el Neógeno y Cuaternario.

Los depósitos fluviales han sido divididos en tres niveles principales de agradación antiguos, además de las terrazas recientes, sobre la base de sus características morfológicas, altitud relativa y litología. La distinción de distintos niveles de agradación, especialmente en sectores relativamente alejados de los cursos de agua actuales, adquiere importancia en relación con la actividad neotectónica reconocida en la región de las Sierras Pampeanas Orientales (Schlagintweit 1954, Massabie 1975, 1976, 1987, 1996, Amos *et al.* 1981, entre otros).

Los niveles principales (Fig. 2) son:

Nivel I. Se trata del nivel de agradación más antiguo de la comarca, cuyos afloramientos se hallan alejados de los cursos de agua actuales (Fig. 2) y alcanzan las mayores alturas relativas. En el valle del río de la Costa se disponen al sur de la localidad de San Marcos Sierra sobre la espalda tendida de la sierra Baja de San Marcos. Este nivel está compuesto por acumulaciones aisla-

das pobremente estratificadas de más de 10 m de espesor, de cantos rodados de hasta un metro de diámetro, de rocas graníticas y metamórficas con intercalaciones de lentes de arena y grava rojiza. Sobre la base de sus rasgos geomorfológicos se lo ha identificado también al norte de la localidad mencionada, sobre la escarpa de falla occidental de la sierra de San Marcos (Fig. 2).

Nivel II. Constituye acumulaciones aterrazadas de varios metros de espesor de cantos rodados, grava y arena provenientes del basamento ígneo – metamórfico aledaño. En el valle del río Quilpo se pone en contacto por falla con la Formación San Marcos, en el extremo septentrional de la sierra Baja de San Marcos (Fig. 2).

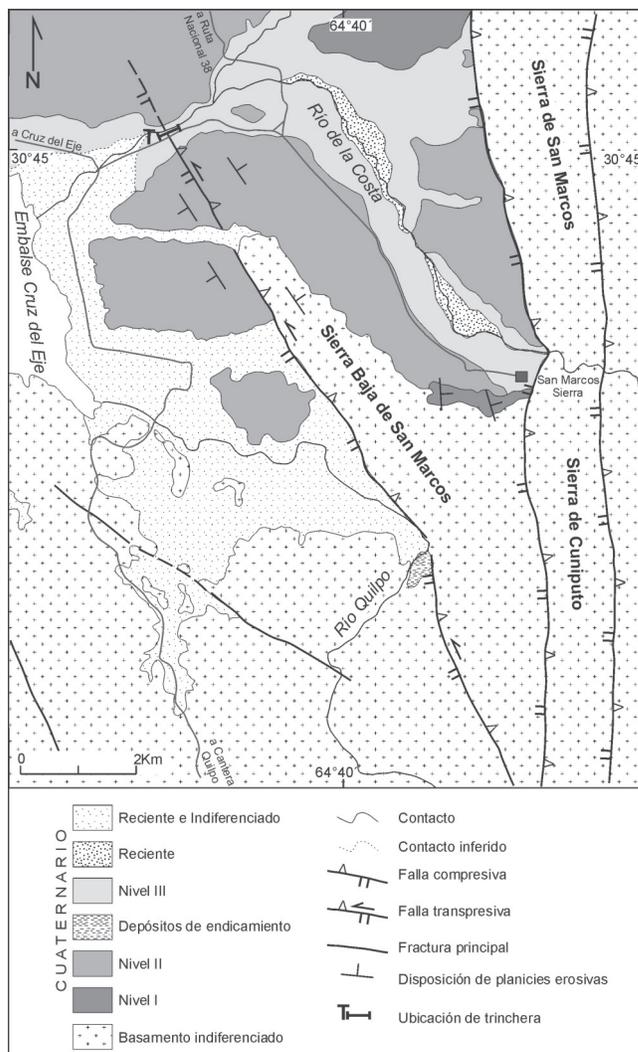
Nivel III. Son depósitos estratificados de pocos metros de espesor de cantos rodados y arena de similar composición a la de las unidades anteriores, que constituyen terrazas bien desarrolladas con mayor proximidad al curso actual del río de la Costa (río San Marcos Massabie 1982 ) y posee cotas inferiores al Nivel II.

### Morfoestructura

La sierra San Marcos – Cuniputo, el cordón más importante en este sector de las Sierras Pampeanas, desarrolla una extensa área pedemontana al pie de la escarpa occidental abrupta donde se encuentra el pueblo de San Marcos Sierra, la localidad más importante hacia el este del área estudiada.

Los desniveles topográficos se desarrollan entre la cota de 1050 m, en las cumbres de la sierra al este, y la cota de 500 m, aproximadamente coincidente con el nivel del embalse de la presa Cruz del Eje, al oeste – sudoeste de la región mapeada. En esta parte de la llanura periserrana (Figs. 2 y 4) se interpone una suave elevación del basamento cristalino, cuya línea de cumbres alcanza la cota de 600 m, que ha sido denominada sierra Baja de San Marcos (Massabie 1976, 1982) y que presenta un desarrollo longitudinal de dirección noroeste con frente escarpado hacia el sudoeste y espalda tendida al noreste. Hacia el noroeste pierde altura hasta que, finalmente, los afloramientos correspondientes a la Formación San Marcos son cubiertos por depósitos cuaternarios aterrazados (Fig. 2).

La escarpa occidental de la sierra Baja de San Marcos (SBSM) está controlada por una falla oblicua de tipo inverso (FSBSM) con componente de desplazamiento de rumbo izquierdo. Alcanza un rechazo vertical de 50 m en el sector del codo del río Quilpo (Fig. 3) y de unos pocos metros en el tramo en que es atravesada por el río de la Costa. Esta estructura forma parte del conjunto de fallas oblicuas de dirección noroeste que interrumpen, y muchas veces desplazan, las fallas también inversas pero de rumbo general norte y vergencia occidental que definen la orientación morfológica longitudinal de la mayoría de los cordones principales de las Sierras Pampeanas Orientales.



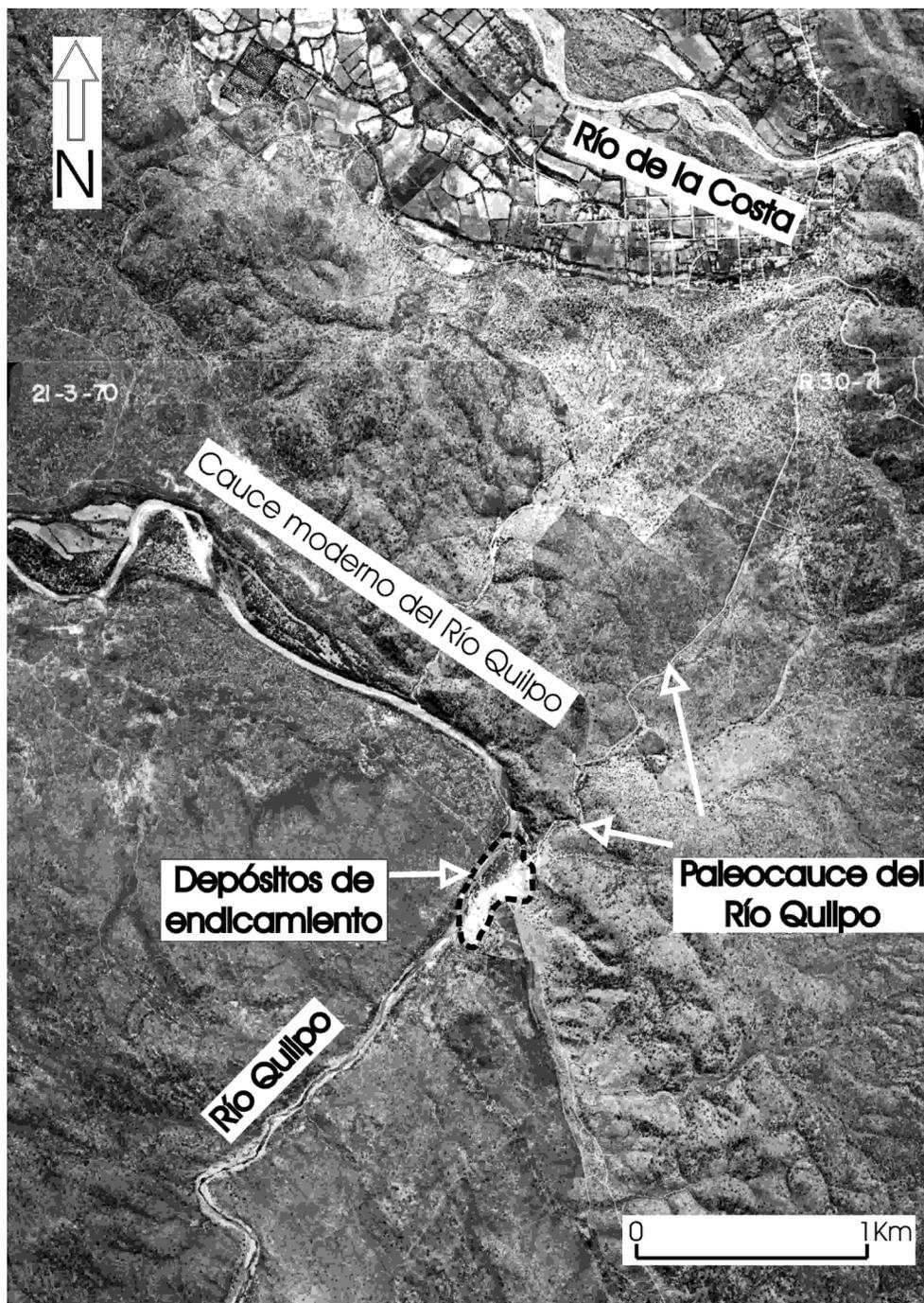
**Figura 2:** Mapa geológico, geomorfológico y estructural de la comarca San Marcos – Cruz del Eje, flanco occidental de las Sierras Pampeanas Orientales.

### Alteración del patrón fluvial

La actividad cuaternaria de la FSBSM ha inducido cambios geomórficos destacados en el sector de San Marcos Sierra – Cruz del Eje (Massabie 1975, Massabie y Limarino 1996). Su reactivación a partir de episodios de fallamiento más antiguos, originó el levantamiento y extensión hacia el noroeste de una divisoria local entre los ríos de la Costa y Quilpo (Figs. 3 y 4), lo cual alteró dichos cursos fluviales.

Estos efectos son comparables a los caracterizados como avulsión, desvío y formación de un lago o pantano producidos por la elevación de un bloque de falla transversal a un curso fluvial (Schumm *et al.* 2000).

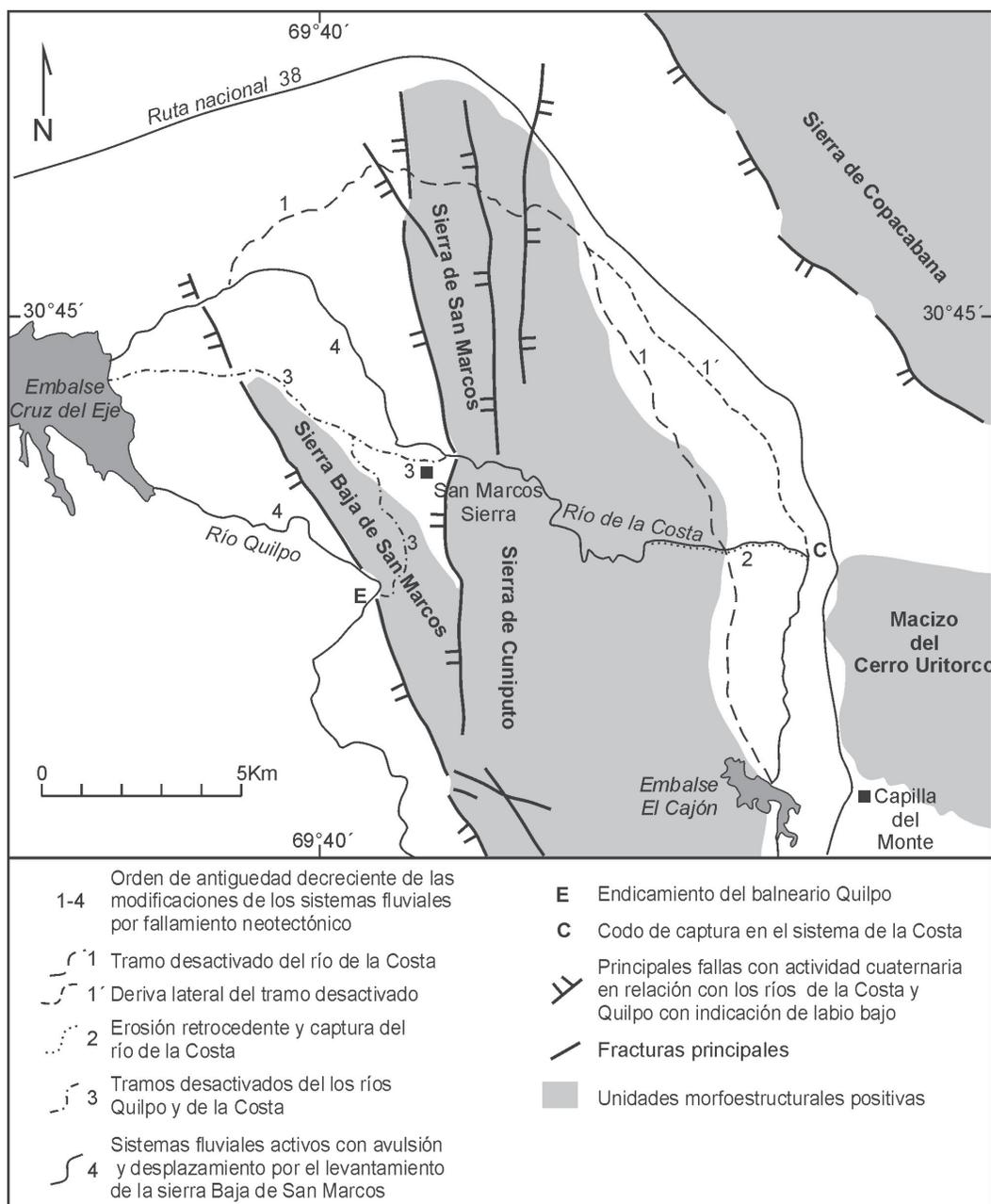
El colector principal ubicado al sur de la sierra Baja de San Marcos es el río Quilpo cuyo sentido de escurrimiento es en general hacia el norte, y constituye un curso subsecuente adaptado fielmente al diseño de



**Figura 3:** Fotografía aérea vertical correspondiente al sector del codo de desvío del río Quilpo con la identificación del paleocauce sobre la sierra Baja de San Marcos, los depósitos de endicamiento y el tramo de cauce moderno.

fracturación del basamento. Frente a la escarpa de esta sierra, el río Quilpo desarrolla una curva cerrada y vira hacia el oeste – noroeste. Este sector coincide a su vez con un notorio cambio morfológico, ya que de río íntimamente adaptado a la estructura del basamento sin depósitos fluviales de importancia, pasa a ser un río divagante, que forma meandros en una planicie aluvial bien desarrollada (Fig. 3), hasta alcanzar el sector del actual embalse Cruz del Eje.

Poco distancia agua arriba del codo en el balneario Quilpo, el curso rectilíneo tiene un rumbo nordeste con el que coincide la traza inferida de una fractura que atraviesa la sierra Baja de San Marcos por la quebrada principal de este pequeño bloque serrano. La boca de dicha quebrada, frente a la cual se produce el codo, se observa algo desplazada hacia el sudeste, aunque empalmando bien con el curso actual del río desde su tramo agua arriba hasta la localidad del balneario Quilpo



**Figura 4:** Evolución cuaternaria del avenamiento principal en los alrededores de San Marcos – Cruz del Eje (modificado de Massabie 1975, Massabie y Limarino 1996).

(Fig. 3). En el codo del río Quilpo referido (Figs. 2, 3 y 4) se registran los depósitos sedimentarios de endicamiento que se describen en el apartado siguiente.

Teniendo en cuenta estas observaciones, se infiere que la causa del desvío del río Quilpo, con la consiguiente modificación local de estilo geomorfológico y formación del codo de desvío frente al faldeo escarpado de la sierra Baja de San Marcos, fue el levantamiento por falla de esta sierra que llega a anular la circulación de las aguas de este cauce por la quebrada transversal que formaba parte de su cauce antiguo (Massabie 1975, Massabie y Limarino 1996; Figs. 3 y 4).

Otras evidencias sobre el control de la evolución geomórfica de la comarca por tectonismo cuaternario se asocian con el tramo del río de la Costa ubicado al norte de la sierra Baja de San Marcos.

En este sector el río de la Costa describe una curva amplia, rodeando el extremo septentrional de la sierra Baja de San Marcos (Figs. 2 y 4). El Nivel II de agradación ubicado al noreste del curso actual del río muestra mayor erosión que su equivalente al sudoeste, ya que en el sector septentrional de afloramientos del Nivel II se preservan barrancas conspicuas, grabadas por erosiones en forma de arcos y espolones producto

de divagaciones posteriores del mismo río, asociadas a planicies de inundación más modernas. Hacia el sur, son mucho menos notables las barrancas erosivas del mismo Nivel II y se encuentran separadas por afloramientos extensos del Nivel III del cauce actual (Fig. 2).

Este diseño asimétrico de la distribución de los niveles de agradación cuaternarios del río de la Costa y su posición con relación al cauce actual y reciente, pone de relieve un desplazamiento lateral del río hacia el noreste, el cual se vincula al levantamiento de la sierra Baja de San Marcos por fallamiento activo.

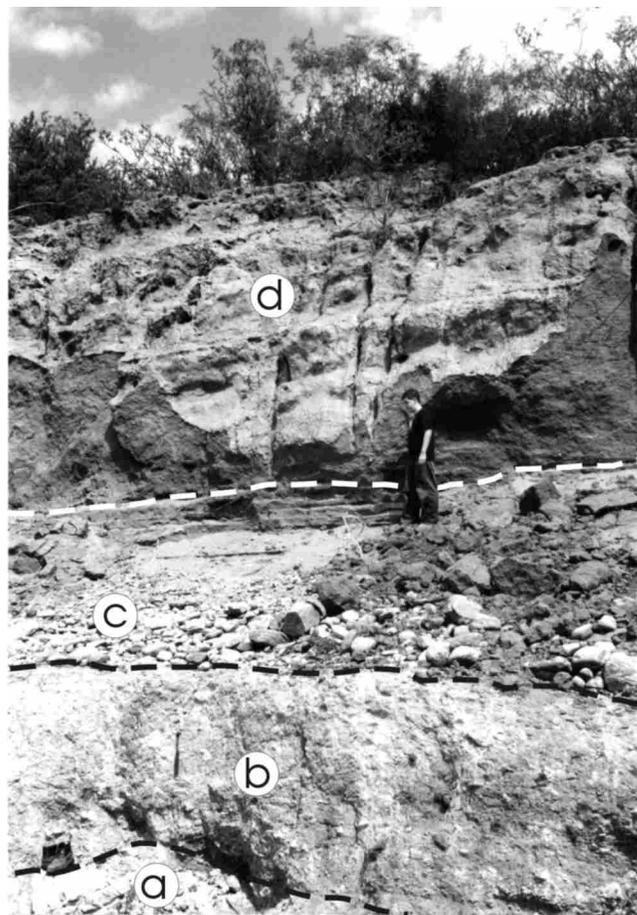
#### *Facies fluviales y de endicamiento del río Quilpo*

El control ejercido por la actividad tectónica de la FSBSM ha quedado registrado tanto en la localización del cauce del río Quilpo como en sus depósitos. En particular, en las inmediaciones del balneario Quilpo (Fig. 2), donde se localiza el codo, la acción erosiva del río labró dos extensas barrancas donde es posible observar el relleno sedimentario del valle.

Sobre la base de tres perfiles levantados a lo largo del curso del río y de observaciones generales realizadas en el área, Massabie y Limarino (1996) reconocieron dos unidades cuaternarias principales. Una inferior, integrada por depósitos de origen fluvial y en parte lacustres pertenecientes al río Quilpo, y una superior, de probable origen eólico, mediando entre ambas una superficie de discordancia erosiva de moderado relieve.

En la unidad inferior, más desarrollada, que alcanza ocho metros de espesor, pueden a su vez diferenciarse tres secciones (Fig. 5). La inferior está compuesta por conglomerados y escasas areniscas con estructuras tractivas, que representan sedimentos fluviales de canal, incluyendo barras y depósitos residuales. La sección media está básicamente formada por pelitas laminadas, aunque muestra en su tramo basal una intercalación de arenisca mediana a gruesa maciza y en parte guijarrosa. Sufrir una importante reducción de espesor y significativos cambios litológicos en dirección agua arriba del río Quilpo, donde finalmente pierde su identidad confundiendo con los depósitos de la sección inferior. Sobre la base de su composición, geometría y de la total ausencia de superficies canalizadas, así como la importante participación de estructuras laminadas, la sección media ha sido interpretada como el resultado de una fase de endicamiento del río Quilpo (Massabie y Limarino 1996).

La sección superior corresponde a un delgado intervalo estratigráfico, en parte erosionado como queda evidenciado por el desarrollo de una superficie irregular que representa el paleorrelieve pre-eólico. Presenta litologías y estructuras similares a las de la sección inferior, por lo cual estaría representando la ruptura del endicamiento y la reactivación del sistema fluvial.



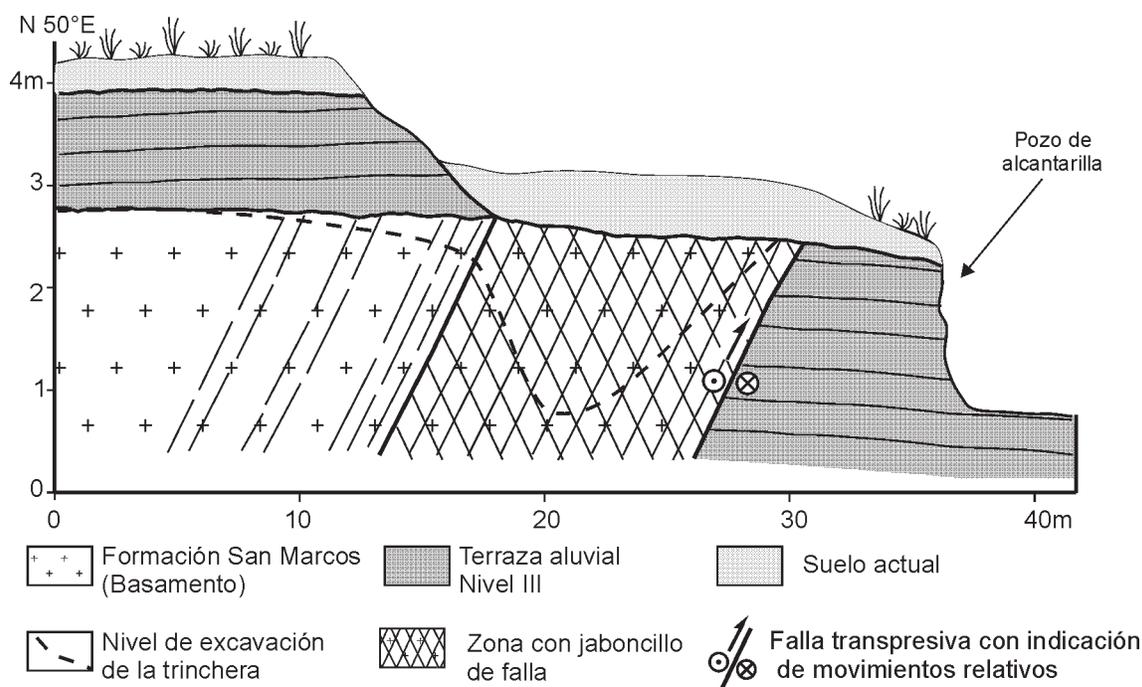
**Figura 5:** Sección vertical aflorante del endicamiento Quilpo en la margen izquierda del río. a: basamento. b: regolito. c: facies fluvial inferior. d: limos laminados de la facies intermedia correspondiente a la extensión mayor del endicamiento.

#### *Estudios paleontológicos y edad <sup>14</sup>C*

En los niveles cuspidales de la fase lacustre de endicamiento, sección media, se han coleccionado conchillas de gastrópodos bien conservadas correspondientes a una asociación límnic, lo que es coherente con la caracterización sedimentológica observada en estos depósitos. Dicha asociación está compuesta por *Odontostomus (Spixia) columellaris* Parodiz, *Odontostomus (Plagiodontes) dentatus* (Wood), *Lymnaea* cf. *L. beatrix* d'Orbigny, *Bulimulus (Bulimulus) apodemetes* d'Orbigny y *Odontostomus (Scalarinella)?* sp. (Massabie et al. 2001).

De este material fueron seleccionadas las conchillas de *Odontostomus (Plagiodontes) dentatus* (Wood) con mejor preservación para efectuar estudios isotópicos obteniéndose finalmente, una edad <sup>14</sup>C corregida de 2560 ± 120 aap (Massabie et al. 2001).

La valoración de esta edad es confirmada por análisis de <sup>13</sup>C y <sup>18</sup>O con relación al contenido de CO<sub>2</sub>, determinándose un error total del + 0,1 % y valores de δ<sup>3</sup>C = - 8,2 ‰ y de δ<sup>18</sup>O = +0,4 ‰.



**Figura 6:** Sección estructural de la Falla Sierra Baja de San Marcos (FSBSM) basada en la excavación de una trinchera transversal y otras observaciones locales en afloramientos cercanos (modificado de Massabie *et al.* 2002).

Estos valores de  $\delta^{18}\text{O}$  han sido interpretados como resultado del equilibrio del agua meteórica en un sistema fluvial donde la evaporación ha tenido importancia enriqueciendo la concentración isotópica, características que son concordantes con el ambiente lacustre aquí observado a través de los estudios sedimentológicos y paleontológicos realizados. Los valores de  $\delta^{13}\text{C}$ , a su vez, se corresponden con los de un ambiente continental donde el contenido de dicarbonato del agua está relacionado al decaimiento de la materia orgánica producido por acción vegetal. Asimismo, teniendo en cuenta que es improbable el contenido de  $^{14}\text{C}$  antiguo a través de aporte calcáreo externo al sistema, la actividad inicial del  $\text{CO}_2$  que forma las conchillas procedería totalmente del carbono atmosférico para la época considerada (Massabie *et al.* 2001).

Los estudios isotópicos permiten, entonces, definir una edad confiable que sustenta la datación de las facies de endicamiento y en consecuencia de la reactivación neotectónica de la FSBSM.

#### Relevamiento de zona de falla en trinchera

Con la finalidad de extrapolar el alcance regional del fallamiento se realizaron relevamientos *in situ*, incluyendo la realización de una trinchera ubicada en un lugar seleccionado a partir del análisis de datos de superficie, metodología que es de aplicación reciente en la comarca de las Sierras Pampeanas (Sagripanti *et al.* 1999; Costa *et al.* 2001, Massabie *et al.* 2002).

La trinchera realizada (Fig. 6) para analizar la extensión de la FSBSM se ubicó al oeste de la localidad de San Marcos Sierra, unos 300 m al sudoeste del cauce del río de la Costa (Massabie *et al.* 2002, río de la Costa Hoja IGM 3166-18-2, San Marcos Sierra). El lugar seleccionado coincide con la inflexión superior de la traza de la falla en la cubierta sedimentaria, más allá de los últimos afloramientos de basamento sobre la escarpa y hacia el noroeste (Fig. 2).

La continuidad de la falla se definió por fotointerpretación y por observaciones de campo efectuadas en trabajos previos (Massabie 1996) debido a la alineación de "lloraderos" producto del control ejercido por la zona de falla sobre el escurrimiento. También se realizaron observaciones sobre las márgenes izquierda y derecha del río de la Costa, que permitieron confirmar la continuidad de la falla en el terreno.

Sobre esta trinchera (Fig. 6) se expone el labio alto de la FSBSM integrado por depósitos fluviales estratificados, conglomerádicos y parcialmente cementados por calcáreo (tosca), correspondientes al Nivel III de terraza del río de la Costa. Esta unidad se apoya directamente sobre rocas tonalíticas foliadas de la Formación San Marcos, en las que se presentan juegos de diaclasas con pátinas ferruginosas rojizas que disminuyen su espaciado hacia el borde de la zona de falla.

Esta última, desarrollada a expensas de la Formación San Marcos, se halla cubierta por relleno antrópico y suelo. Se diferencia claramente por su coloración castaño rojiza y estructura de brecha de falla determinada

por un entrelazado de superficies de discontinuidad y zonas de cizalla menores, con la presencia constante de rellenos de jaboncillo arcilloso rojizo. Predominan fallas menores de acimut 310°, 330° y 360° con inclinaciones empinadas y espejos de fricción con estrías verticales y horizontales. La disposición general es de una falla de 60° a 80° de inclinación al noreste. En el labio bajo se dispone el Nivel III de conglomerados fluviales que ha sido sobrepuesto tectónicamente por la Formación San Marcos (Massabie *et al.* 2002, Fig. 6).

El relevamiento de la trinchera confirma la extensión hacia el noroeste de la FSBSM y las relaciones estructurales muestran claras similitudes con otras fallas estudiadas en lugares distantes de las Sierras Pampeanas Orientales, fallas de Santa Rosa, de Potrero de Garay y de Carlos Paz (Massabie y Szlafsztain 1991), donde el labio alto incluye una potente brecha de falla de varios metros de espesor desarrollada a expensas de rocas del basamento, la cual se sobrepone directamente a los depósitos cuaternarios que forman parte del labio bajo.

En todos los casos se trata de fallas de definida mecánica transpresiva, la cual ha sido comprobada a lo largo de los segmentos de falla de disposición oblicua con respecto a la alineación tectogénica andina de rumbo meridiano en las Sierras Pampeanas Orientales.

La FSBSM expuesta en la trinchera muestra que ejerce un estrecho control sobre la geomorfología local actual, al definir una divisoria de agua paralela a la traza de la falla. A partir de ella, se desarrollan pendientes topográficas de sentidos opuestos, hacia el poniente y naciente, en el extremo noroeste de la sierra Baja de San Marcos (Massabie 1996), las cuales están controladas por la distinta altura relativa del basamento subyacente y un suave basculamiento hacia el naciente del bloque colgante (Fig. 2).

Asociado a este control morfoestructural, se verifica también una marcada influencia sobre la hidráulica del escurrimiento del agua subterránea freática, la cual tiene recarga a partir del frente escarpado occidental de la Sierra de San Marcos, al naciente, en los niveles aterrazados pedemontanos.

Al alcanzar la FSBSM, el agua freática se acerca a la superficie del terreno y llega a aflorar originando litorales. Esto se debe, en primer lugar, al ascenso del techo del basamento subyacente, poco permeable, en el bloque colgante y en segundo término, a la barrera impermeable transversal determinada por la propia zona de falla, donde las microfracturas están rellenas por arcilla de falla (Figs. 2, 4 y 6). Esta situación produce la concentración del escurrimiento del agua subterránea hacia el noroeste, a lo largo de la traza de la falla, en dirección al sector de descarga natural correspondiente al tramo del río de la Costa que cruza perpendicularmente la FSBSM (Figs. 2 y 4).

La dinámica del escurrimiento subterráneo actual en los depósitos aluvionales que ocupan el sector del va-

lle del río de la Costa, agua arriba de la traza de la falla, ha sido además confirmada con la ejecución de la trinchera. El eje longitudinal de la excavación exploratoria es de dirección noreste, transversal a la falla, y el ingreso del agua freática a la trinchera se produjo exclusivamente por la zona de falla cortada, desde su talud lateral sudeste.

## Discusión

Al iniciar los trabajos sobre actividad neotectónica en la región pedemontana de San Marcos Sierra - Cruz del Eje (Massabie 1976, 1982, 1987, Massabie y Szlafsztain 1991, Massabie y Limarino 1996) los indicadores clave fueron: los rasgos geomorfológicos en términos del diseño del avenamiento de la red fluvial, los depósitos del Cenozoico tardío representados por las secuencias de endicamiento y los distintos niveles aterrazados cuaternarios mapeados, y las relaciones morfoestructurales entre los sistemas serranos con núcleos del basamento precámbrico ascendido controlado por el fallamiento andino.

La identificación de depósitos de endicamiento con sus facies características y contenido paleontológico han permitido, sobre la base de estudios radiométricos e isotópicos, obtener una edad de referencia para el Holoceno tardío de 2560 ± 120 aap para documentar un episodio previo de fallamiento neotectónico en la comarca pedemontana de San Marcos Sierra - Cruz del Eje. Esta etapa de actividad de la FSBSM tendría una antigüedad máxima entorno a 4000 aap sobre la base de una estimación de 1500 años necesarios para la acumulación de los depósitos fluviales y límnicos que yacen entre el basamento y el estrato portador de las conchillas datadas por <sup>14</sup>C en el sector de endicamiento (Massabie *et al.* 2003). Costa y Vita-Finzi (1996) proporcionaron también una edad holocena para el fallamiento en la misma región sobre la base de dataciones <sup>14</sup>C. La suma de este tipo de resultados sostiene, por lo tanto, la juventud del fallamiento neotectónico en la comarca.

A su vez el conjunto de evidencias morfoestructurales, geomorfológicas, sedimentológicas paleontológicas y temporales impulsaron otros estudios sobre la extensión y presencia hacia el noroeste de la FSBSM, lo cual motivó la ejecución de una trinchera de investigación para el estudio en detalle de la zona de falla y su relación con los depósitos cuaternarios.

Sobre la base de los antecedentes disponibles y los estudios efectuados, la actividad cuaternaria de la FSBSM admite postular más de un episodio independiente de actividad neotectónica, evidenciado por su relación espacial con los depósitos cuaternarios y por la evolución del paisaje durante ese período.

El primer episodio de movimientos cuaternarios identificado se asocia con el contacto por falla entre el Nivel II de terraza y el basamento, en la escarpa occiden-

tal de la sierra (Massabie 1976, 1982, 1987, Amos *et al.* 1981), y con el basculamiento hacia el nacimiento del Nivel I, en el cual se preservan rastros de avenamiento desactivado. Con esta fase de movimientos neotectónicos se vincula también el endicamiento transitorio del río Quilpo en la zona del codo, cuya edad holocena tardía se basa en el fechado  $^{14}\text{C}$  obtenido recientemente (Massabie *et al.* 2001).

El otro episodio de movimientos cuaternarios, más moderno, se relaciona con la actividad que originó el contacto por falla del Nivel III con el basamento, hecho puesto en evidencia al ejecutar la trinchera. En este caso, las evidencias son de índole geomórfica, ya que entre la constitución del Nivel II y del Nivel III existió un proceso erosivo rápido y un marcado cambio del nivel de base que dio lugar *a posteriori* al Nivel III, formado en equilibrio con el nuevo estadio del paisaje.

La actividad neotectónica analizada en la región de San Marcos Sierra – Cruz del Eje tuvo clara expresión en la evolución del paisaje cuaternario y es comparable con la observada por Jackson *et al.* (1996), en sus estudios sobre el control del crecimiento de fallas activas basado en los diseños del avenamiento en Otago central, Nueva Zelanda.

Durante el Pleistoceno tardío – Holoceno temprano se asume que existieron en la región condiciones climáticas de mayor humedad y que el sistema serrano San Marcos – Cuniputo constituía lomas bajas (Fig. 4) a la latitud del macizo del cerro Uritorco. Este formaba, a su vez, parte de la escarpa principal a cuyo pie occidental se extendía una cubierta prácticamente continua y espesa de abanicos aluviales que sobrepasaron incluso el sistema serrano San Marcos – Cuniputo. Estos depósitos formaron el Nivel I mapeado en los alrededores de Capilla del Monte, Charbonier, Escobar y San Marcos Sierra (Massabie 1982), los cuales se preservan como relictos aislados de abanicos aluviales más extensos.

Durante el Holoceno se produce una progresiva modificación del clima a condiciones de mayor aridez. Concomitantemente, se infiere una reactivación de la falla San Marcos – Cuniputo que motiva la desconexión casi total entre el avenamiento activo con nacientes en el macizo del cerro Uritorco y la red de drenaje que se desarrolla al oeste del sistema serrano San Marcos – Cuniputo (Fig. 4). La única excepción destacable a este cambio es el río de la Costa que, por una vigorosa erosión retrocedente, logra vincularse mediante captura con el sistema fluvial de los ríos Dolores, Calabalumba y Quebrada de Luna en el piedemonte occidental del macizo del cerro Uritorco (Fig. 4 y Massabie, 1975). Esa situación dio lugar a que los principales cursos fluviales caudalosos de régimen permanente en la región de San Marcos Sierra – Cruz del Eje fueran, durante el Holoceno, los ríos Quilpo y de la Costa, los que generaron el nivel II en la comarca del actual valle de San Marcos Sierra hasta su confluencia

en el río Cruz del Eje (Actual Embalse).

La sierra Baja de San Marcos adquiere un mayor relieve también durante el Holoceno, período durante el cual se identifican al menos dos episodios de fallamiento neotectónico. El primero de ellos, provoca el abandono de la planicie aluvial correspondiente al Nivel II a lo que se asocia el contacto por falla entre dicho nivel y el basamento en la escarpa de la SBSM, el endicamiento transitorio y el proceso de avulsión del río Quilpo, junto con el desplazamiento hacia el noreste del río de la Costa.

El segundo episodio de actividad neotectónica, da lugar al abandono de la planicie aluvial correspondiente al Nivel III por el río de la Costa a lo cual se asocia el contacto por falla del basamento con este nivel y la modificación definida, a partir de este movimiento, del escurrimiento del agua subterránea contenida en los depósitos aluviales de la parte media del valle de San Marcos Sierra.

## Conclusiones

La comarca estudiada reúne un conjunto de factores de control geológico de valor crítico para la realización de estudios neotectónicos en zonas pedemontanas de las Sierras Pampeanas.

Del estudio realizado se establece que la Falla sierra Baja de San Marcos, con actividad en episodios andinos más antiguos, ha tenido reactivaciones cuaternarias.

Esta actividad cuaternaria se ha traducido en el desarrollo de cuatro niveles aterrazados del cauce actual del río de la Costa, en la formación de depósitos límnicos por endicamiento transitorio en el río Quilpo y en la modificación del diseño de la red de avenamiento principal de la región San Marcos Sierra – Cruz del Eje.

Estos movimientos, fueron acompañados por el constante desplazamiento lateral hacia el nordeste del río de la Costa, como consecuencia del levantamiento episódico de la sierra Baja de San Marcos y la extensión hacia el noroeste de la FSBSM.

A partir del análisis de factores de control estructurales, geomorfológicos, sedimentológicos, paleontológicos y radimétricos, las dos últimas etapas reconocidas del levantamiento de la sierra Baja de San Marcos son atribuidas al Holoceno tardío.

## Agradecimientos

Los trabajos fueron financiados en el marco de los proyectos UBACyT ExTW20 y Ex048, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires. Las imágenes satelitales SAC-C y LANDSAT 7 fueron proporcionadas por convenio con la Comisión Nacional de Actividades Espaciales (CONAE). Se agradecen las revisiones efectuadas por los árbitros.

## TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

- Amos, A.J., Caligari, R y Siches, C., 1981. Las fallas activas en la República Argentina. 1º Simposio de Geología Aplicada a la Ingeniería. Actas 1: 235-242.
- Barazangi, M. and Isacks, B.L., 1976. Spatial distribution of earthquakes and subduction of the Nazca plate beneath South America. *Geology*, 4: 686-692.
- Cahill, T., 1990. Earthquakes and tectonics of the Central Andean subduction zone. Ph. D. Dissertation, Cornell University, 110 p., Ithaca.
- Cahill, T. y Isacks, B., 1992. Seismicity and shape of the subducted Nazca plate. *Journal of Geophysical Research*. 97 (B12): 17503-17529.
- Costa, C. y Vita-Finzi, C., 1996. Late Holocene faulting in the Southeast Sierras Pampeanas of Argentina. *Geology*, 24 (12) : 1127-1130.
- Costa, C., Murillo, V., Sagripanti, G. y Gardini, C., 2001. Quaternary intraplate deformation in the southeastern Sierras Pampeanas, Argentina. *Journal of Seismology*. 5: 399-409.
- González Bonorino, F., 1950. Geologic cross-section of the Cordillera de los Andes at about parallel 33°S.L. (Argentina and Chile). *Bulletin of the Geological Society of America*, 61: 17-86.
- Isacks, B., Jordan, T., Allmendinger, R. y Ramos, V., 1982. La segmentación tectónica de los Andes Centrales y su relación con la geometría de la Placa de Nazca subductada. 5º Congreso Latinoamericano de Geología. Actas 3: 587-606, Buenos Aires.
- Jackson, J., Norris, R. y Youngson, J., 1996. The structural evolution of active fault and fold systems in central Otago, New Zealand: evidence revealed by drainage patterns. *Journal of Structural Geology*. 18 (2-3): 217-234.
- Jordan, T. y Allmendinger, R., 1986. The Sierras Pampeanas of Argentina: a modern analog of Laramide deformation. *American Journal of Sciences*. 286: 737-764.
- Martino, R., Kraemer, P., Escayola, M., Giambastini, M. y Arnosio, M., 1995. Transecta de las Sierras Pampeanas de Córdoba a los 32°S. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*. 50 (1-4): 60-77.
- Massabie, A., 1975. Investigaciones geológicas entre Charbonier y Cosquín, Provincia de Córdoba, República Argentina. Universidad de Buenos Aires, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Tesis doctoral inédita 143 pp.
- Massabie, A., 1976. Estructura tectónica cenozoica entre Charbonier y Cosquín, provincia de Córdoba. 6º Congreso Geológico Argentino. Actas 1: 109-123.
- Massabie, A., 1982. Geología de los alrededores de Capilla del Monte y San Marcos, provincia de Córdoba. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*. 37(2): 153-173.
- Massabie, A., 1987. Neotectónica y Sismicidad en la región de las Sierras Pampeanas Orientales, Sierras de Córdoba, Argentina, Actas 10º Congreso Geológico Argentino. Actas 1: 271-274.
- Massabie, A., 1993. La fase neotectónica Córdoba, Sierras Pampeanas Orientales, Argentina. 9º Reunión de Microtectónica. Resúmenes p. 12
- Massabie, A., 1996. Fallamiento neotectónico en las Sierras Pampeanas Orientales. Implicancias aplicadas a diferentes escalas. *Asociación Argentina de Geología Aplicada a la Ingeniería*. 10: 187-198.
- Massabie, A. y Limarino, C., 1996. Facies de endicamiento en el Río Pintos y su relación con la evolución neotectónica de la sierra de San Marcos, Córdoba. 6º Reunión Argentina de Sedimentología. Acta: 237-241, Bahía Blanca.
- Massabie, A. y Szlafsztein, C. 1991. Condiciones geomecánicas y edad del fallamiento neotectónico en las Sierras Pampeanas Orientales, Córdoba, Argentina. *Revista Asociación Argentina de Geología Aplicada a la Ingeniería*, 6: 154-168.
- Massabie, A., Mutti, D., Sanguinetti, A. y Nestiero, O., 1999. Control múltiple del fallamiento neotectónico en las Sierras Pampeanas Orientales, provincias de Córdoba, San Luis y Santiago del Estero. *Revista de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente*, 13: 117-123, Buenos Aires.
- Massabie, A. C., Cegarra, M., Idoyaga, M. Mutti, D. Nestiero, O. y Sanguinetti, A., 2000. Neotectonic faulting zoning in the Eastern Sierras Pampeanas, central Argentine. 8th Congress of the International Association for Engineering Geology and the Environment. 6: 4231-4238, A. A. Balkema, Rotterdam.
- Massabie, A., Limarino, C., Panarello, H., Cordero, R. y Bertels, A., 2001. Late Holocene tectonic damming in the Eastern Sierras Pampeanas, Córdoba, Argentina. 3º Simposio Sudamericano de Geología Isotópica, *Revista Comunicaciones Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Geología*. 52: 108 (Abbreviated Abstracts; versión completa del trabajo de 4 p. en CD del Symposium), Pucón.
- Massabie, A., Cegarra, M., Sanguinetti, A. y Lo Forte, G., 2002. Actividad neotectónica del fallamiento andino en la región pedemontana de San Marcos Sierra, Córdoba, Argentina. en: Cabaleri N., Cingolani, C.A., Linares, E., López de Luchi, M.G., Osters, H.A. y Panarello, H.O. (eds.). Actas 15º Congreso Geológico Argentino. 2: 529-534.
- Massabie, A., Panarello, H., Cegarra, M., Cordero, R., Lo Forte, G., Sanguinetti, A. y Valencio, S., 2003. Isotope constraints and radiocarbon age applied to Late Holocene landscape evolution due to San Marcos Fault activity, Córdoba, Argentina. 4º South American Symposium on Isotope Geology. Actas 1: 215-218.
- Sagripanti, G., Costa, C. Giacardi, A., Aguilera, D., Schiavo, H., Campanella, O. y Dolso, A., 1999. Nuevos datos sobre la actividad cuaternaria de la falla Las Lagunas, Departamento de Río Cuarto, Córdoba. 14º Congreso Geológico Argentino. Actas 1: 42.
- Schlagintweit, O., 1954. Una interesante dislocación en Potrero de Garay (Valle de Calamuchita), sierra Chica y Grande de la Provincia de Córdoba. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*. 9 (3): 135-154.
- Schumm, S., Dumont, J. y Holbrook, J., 2000. Active Tectonics and Alluvial Rivers. Cambridge University Press 276 p., Cambridge.
- Smalley, R.Jr., Pujol, J., Regnier, M., Chiu, J., Isacks, B., Araujo, M. y Puebla, M., 1993. Basement seismicity beneath the Andean Precordillera thin - skinned thrust belt and implications for crustal and lithospheric behaviour. *Tectonics*, 12: 63-76.

**Recibido:** 30 de diciembre, 2002

**Aceptado:** 15 de agosto, 2003