

# NUEVAS EVIDENCIAS DE DEFORMACIONES CUATERNARIAS ASOCIADAS A LA FALLA SIERRA CHICA, SIERRAS PAMPEANAS DE CÓRDOBA

Guillermo L. SAGRIPANTI<sup>1</sup>, Diego VILLALBA<sup>1</sup> y Mónica B. VILLEGAS<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Geología. Universidad Nacional de Río Cuarto. E-mail: gsagripanti@exa.unrc.edu.ar

## RESUMEN

En la intraplaca argentina, entre los 31° 45' y 32° 45' de latitud S, en el frente occidental de la Sierra Chica, Sierras Pampeanas de Córdoba, la presencia de morfologías superficiales y deformaciones en sedimentos cuaternarios permiten deducir que la actividad tectónica neógena en la región, tuvo continuidad en el Holoceno y probablemente ha tenido asociada la ocurrencia de paleoterremotos. Los objetivos de la presente contribución son presentar nuevas evidencias de deformaciones cuaternarias asociadas a la falla Sierra Chica, extender su traza hacia el sur en la llanura y hacer una estimación preliminar del potencial sismogénico asociado a esta estructura. Se relevaron siete perfiles transversales a la traza de una falla secundaria del frente principal de levantamiento de la Sierra Chica. Estos presentan el basamento cristalino precámbrico, depósitos conglomerádicos y sedimentos no cohesivos cuaternarios, afectados por deformaciones dúctiles y frágiles correspondientes a reactivaciones pleistocenas y holocenas de la estructura. Los resultados obtenidos han permitido extender la traza de la falla hacia el S en la llanura hasta el arroyo Tegua, relevar estructuras deformacionales en sedimentos finos no reportadas hasta el presente y estimar la magnitud máxima de un terremoto futuro, entre  $M_s$  6,7-7,5 y  $M_w$  =7,5, asociado a la falla Sierra Chica.

**Palabras clave:** *Falla, potencial sismogénico, trincheras, paleomagnitud, paleoterremotos.*

## ABSTRACT

*New evidences of Quaternary deformations associated with the Sierra Chica fault, Sierras Pampeanas of Córdoba.*

In the argentinean intraplate, between the 31° 45' and 32° 45' of latitude S, in the western front of the Sierra Chica, Sierras Pampeanas of Córdoba, the presence of superficial morphology and deformations in quaternary sediments allow to deduce that the Neogene tectonic activity in the region, had continuity in the Holocene and probably it has had the occurrence associate of paleoearthquakes. The objectives of the present contribution are presents new evidences of quaternary deformations associated with the Sierra Chica fault, to extend his trace towards the south in the plain and to do a preliminary estimation of the seismogenic potential associated with this structure. Seven transverse profiles were relieved to the trace of a secondary fault of the principal uplift front of the Sierra Chica. They present the Precambrian crystalline basement, conglomerate and not cohesive quaternary sediments deposits affected by ductile and fragile deformations corresponding to reactivations during of Pleistocene and Holocene of the structure.

The obtained results have allowed to extend the trace of the fault towards the S in the plain up to the Tegua creek, to relieve structures deformacionales in thin sediments not was reported up to the present and to estimate the maximum magnitude of a future earthquake, between  $M_s$  6,7-7,5, and  $M_w$  =7,5 associated with the Sierra Chica fault.

**Keywords:** *Fault, seismogenic potential, trench, paleomagnitude, paleoearthquakes.*

## INTRODUCCIÓN

La actitud subhorizontal de la placa de Nazca, entre los 28°-33° de latitud sur, es atribuida a la subducción de la dorsal asísmica Juan Fernández por debajo de la placa Sudamericana. Algunas expresiones en la intraplaca asociadas a la subducción subhorizontal, de edad cenozoica tardía, son terrenos de bloques limitados por fa-

llamiento inverso como las Sierras Pampeanas, considerándose que éstas pueden ser un reflejo de este estilo tectónico entre las latitudes citadas. Otras manifestaciones son la ausencia de actividad volcánica a esta latitud y la profundidad de los focos de los terremotos (Pilger 1981, Jordan *et al.* 1983, Jordan y Almendinger 1986, Ramos *et al.* 2002).

Se considera que la actitud de la placa es la

responsable, en la intraplaca argentina, de la importante sismicidad superficial aproximadamente a la latitud de 33° S, entre la Precordillera y las Sierras Pampeanas (Costa y Vita Finzi 1996, Ramos 1999). Por otra parte, Smalley *et al.* (1993) interpretan que la sismicidad cortical se concentra en una región estrecha a lo largo del margen E del antepaís en áreas ubicadas sobre subducción normal mientras que, por encima de

zonas de subducción subhorizontal, una amplia región del antepaís es altamente sísmica.

A la latitud de 33° S entre los 64° y 65° de longitud O se han relevado morfologías superficiales y deformaciones cosísmicas en sedimentos cuaternarios. En este sector la sismicidad superficial leve a moderada es frecuente y existen antecedentes históricos y prehistóricos de la ocurrencia de terremotos destructores, considerándose a estas manifestaciones asociadas a la horizontalización de la placa de Nazca. Las morfoestructuras relevadas en este sector de las Sierras Pampeanas de Córdoba permiten inferir que la actividad tectónica neógena ha sido intensa (Sagripanti 2006, Sagripanti *et al.* 2001, Sagripanti y Villalba 2009, Seitz 2009, Villalba 2011, Gallo 2011, Sagripanti y Villalba 2011).

Es importante destacar que la dimensión y distribución de las deformaciones superficiales reconocidas en las sucesiones sedimentarias asociadas a la traza de las estructuras y los antecedentes de la ocurrencia de terremotos, históricos y prehistóricos, ponen en evidencia que hay fallas que poseen un importante potencial sísmogénico, el que es sólo parcialmente conocido (Sagripanti y Villalba 2009, 2011, Seitz 2009, Villalba 2011, Gallo 2011).

Las deformaciones cuaternarias en las Sierras Pampeanas son aisladas y de escasa extensión superficial y expresan el estilo de la tectónica andina regional, que consiste en fallas inversas lítricas generalmente buzantes al E, ubicadas marginalmente a bloques levantados y basculados del basamento cristalino durante la orogenia andina (Costa 1999). Se considera que la arquitectura de las morfoestructuras correspondientes al cordón de la Sierra Chica de Córdoba, Sierras Pampeanas Orientales, es el resultado del fallamiento cenozoico en la región, que posee una orientación preferencial meridiana y presenta asociados fallamientos secundarios oblicuos a los anteriores.

Los estudios neotectónicos desarrollados en la falla del frente occidental de la Sierra Chica son numerosos, entre los más importantes merecen citarse los realizados por Schlagintweit (1954), Massabie (1987),

Kraemer *et al.* (1988), Wagner-Manslau (1988), Massabie *et al.* (1991, 2006) y Costa *et al.* (2001). Estos autores reconocen en el faldeo occidental de la Sierra Chica, principalmente en el valle de Calamuchita, fallas inversas de alto ángulo (> 50° E) que afectan el basamento ígneo-metamórfico de edad precámbrica-paleozoica inferior y fallas inversas de bajo ángulo (20°-30° E) cuyo bloque elevado, formado por basamento, cabalga o sobrecorre a depósitos sedimentarios de edad cenozoica.

Hasta el presente, al sur del embalse de Río Tercero, no se han reportado evidencias de deformaciones que afecten únicamente sedimentos finos no cohesivos, cuaternarios, asociados a esta estructura, y menos aún han sido utilizadas como evidencias que permitan constatar la continuidad de alguna sección de la falla hacia el sur, en la llanura, e interpretar la ocurrencia de sismos prehistóricos. Obtener esta relevante información permitirá evaluar, en el futuro, de forma más realista el potencial sísmogénico de la falla de la Sierra Chica.

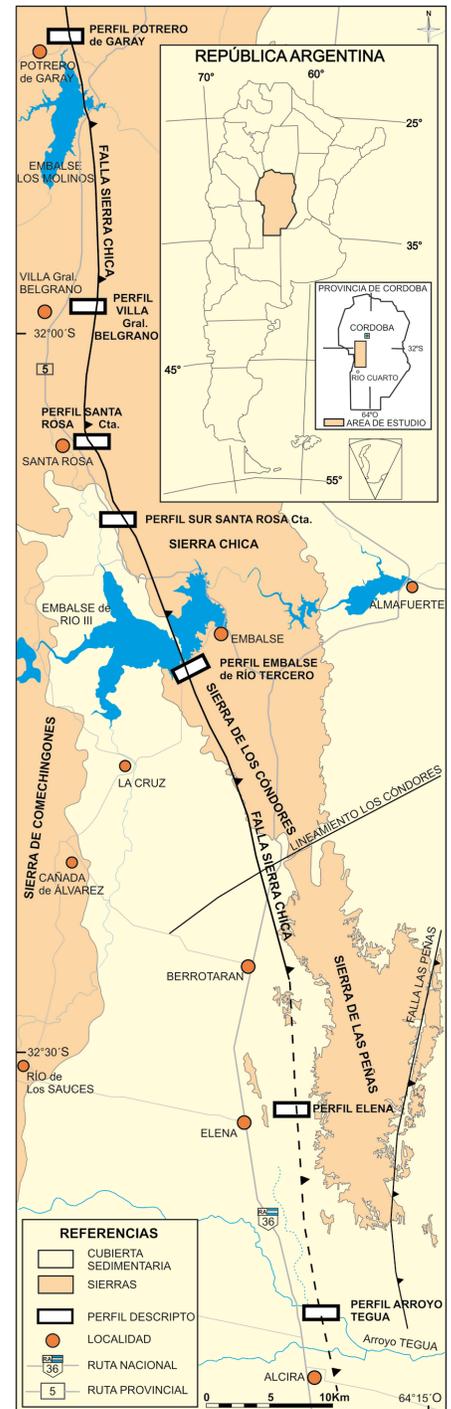
Los objetivos de la presente contribución son, como resultado de investigaciones neotectónicas, presentar nuevas evidencias de deformaciones en sedimentos cuaternarios asociados a la falla de la Sierra Chica, extender su traza hacia el sur en la llanura y hacer una estimación preliminar del potencial sísmogénico asociado a esta estructura.

El área de estudio se ubica sobre la traza de la falla Sierra Chica, aproximadamente desde la latitud 31° 45' hasta 32° 45' S, entre la localidad de Potrero de Garay al norte y el arroyo Tegua al sur (Fig. 1).

## MARCO GEOLÓGICO Y SISMICIDAD

Las principales unidades estratigráficas aflorantes en el área de estudio son el basamento cristalino de edad precámbrica-paleozoica inferior-media, una secuencia volcanosedimentaria cretácica y la cubierta sedimentaria cenozoica.

El basamento cristalino está compuesto por metamorfitas (esquistos, gneises orto y paraderivados, mármoles, anfibolitas



**Figura 1:** Mapa de ubicación de la zona de estudio, fallas principales, lineamientos y perfiles relevados en el presente trabajo de investigación.

y anatexitas) que forman los Complejos Metamórficos sierra de las Peñas y Sierra Chica, intruidas por cuerpos graníticos y pegmatíticos.

La secuencia volcanosedimentaria de edad cretácica inferior, según Gordillo y Lencinas (1979), comprende una sucesión

sedimentaria compuesta por dos miembros continentales de estratos rojos y dos pulsos de volcanismo basáltico, sinsedimentarios, intercalados a la que denominó Grupo Los Cóndores (Bonalmi *et al.* 2005). Esta secuencia está formada por conglomerados polimícticos sin basaltos, areniscas rojas con limoareniscas e intercalaciones de yeso (Formación Embalse Río Tercero); basaltos y traquitas (Vulcanitas Cerro Colorado); conglomerados polimícticos con basaltos intercalados (Conglomerado Cerro Libertad) y basaltos picríticos, traquiandesíticos, basanitas y traquiandesitas (Vulcanitas Rumipalla). Las sedimentitas cenozoicas, terciarias, están compuestas por conglomerados y brechas con calcretes, eocenas (Formación Villa Belgrano), y por brechas y conglomerados con matriz arenosa y lentes de areniscas del Mioceno superior-Plioceno de la Formación Casa Grande, Bonalmi *et al.* (2005).

Las sedimentitas cenozoicas, cuaternarias, descritas y fechadas por Cantú (1992) y Cantú *et al.* (2006), están compuestas por:

- Arenas finas con gravas dispersas, gravas finas y gruesas intercaladas con arenas medias a gruesas con estructura en artesa y origen fluvial, de edad plio-pleistocena (Formación Alpa Corral) equivalente a la Formación Estancia Belgrano (Bonalmi *et al.* 2005).
- Sedimentos limosos (loessoides) de color pardo amarillento (fluviales y palustres) y limosos a limo arenosos muy finos de color pardo rojizo (eólicos), Pleistoceno medio a superior (Formación Pampiano), equivalente a la Formación Toro Muerto (Bonalmi *et al.* 2005).
- Arenas medias a gruesas, intercaladas con sedimentos limo-arenosos de origen fluvio eólico que corresponden a las distintas facies de un importante ciclo fluvial, del Pleistoceno superior (Formación Chocancharava).
- Sedimentos limo arenosos finos de color pardo amarillento y loess retransportados hídricamente, con capas de arenas finas, correspondientes a un ciclo fluvial de escasa magnitud, del Holoceno inferior a medio (Aloformación Arroyo Las Lajas).
- Sedimentos eólicos arenosos muy finos

a limosos (Formación Laguna Oscura), de edad holocena (entre 6.000-4.000 a AP).

Las deformaciones cuaternarias en las Sierras Pampeanas, que expresan el estilo de la tectónica regional andina, consisten en fallas inversas lítricas generalmente inclinadas al E (González Bonorino 1950). Estas estructuras son reactivaciones de fracturas preexistentes y en la mayoría de los casos están controladas por anisotropías de la estructura interna del basamento. Las deformaciones se encuentran asociadas a las zonas pedemontanas de las sierras de San Luis, Comechingones y Chica de Córdoba, y se manifiestan como corrimientos del basamento cristalino afectando a los sedimentos cuaternarios (Massabie y Szlafsztajn 1991, Massabie 1996, Costa 1999, Massabie *et al.* 2006).

Un análisis del fallamiento neotectónico, asociado a la orogenia Andina, realizado en la ladera occidental de la Sierra Chica de Córdoba, entre las localidades de Charbonier y Santa Rosa de Calamuchita, ha permitido interpretar dos eventos tectónicos cenozoicos importantes. Uno a fines del terciario, Mioceno-Plioceno, caracterizado por fallamiento inverso de alto ángulo ( $> 50^\circ$  E) que afectó al basamento ígneo-metamórfico. El otro evento de edad pleistocena media-superior, es caracterizado por fallas inversas de bajo ángulo ( $20^\circ$  y  $30^\circ$  E) considerados corrimientos del basamento cristalino, intensamente fracturado, sobre depósitos sedimentarios cuaternarios. El modelo tectónico propuesto considera que en el nivel de erosión actual coexiste el fallamiento de alto ángulo controlado por la anisotropía del basamento con el fallamiento pleistoceno tardío de bajo ángulo, considerado como un corrimiento emergente (Massabie 1976, Kraemer *et al.* 1988, Wagner-Manslau 1988, Massabie y Szlafsztajn 1991, Massabie 1996, Costa *et al.* 2001, Bonalmi *et al.* 2005, Massabie *et al.* 2006).

La falla de la Sierra Chica es una de las más importantes de las sierras de Córdoba. Su escarpa, que enfrenta al oeste se extiende por más de 200 km desde la localidad de Capilla del Monte en el valle de Punilla, al norte, hasta el sur del lineamiento Los Cóndores a la latitud de la localidad de Be-

rrotarán. A partir de este sector se ramifica en varios lineamientos ubicados en el flanco occidental de la sierra de Las Peñas. Posee un rumbo general N-S y presenta dos inflexiones, una al sur de la localidad de Villa Carlos Paz y la otra al sur del dique Los Molinos, donde se la reconoce como falla Santa Rosa. Es importante destacar que el rumbo general de la estructura coincide con el de la foliación original del basamento. Se interpreta que, durante los eventos cenozoicos (Plioceno superior y Pleistoceno medio o superior) la geometría y la actitud del plano de falla habría sido controlada por la fábrica de las migmatitas y gneises (Bonalmi *et al.* 2005).

Esta estructura atraviesa la zona de Potrero de Garay y ha sido descrita en este sector por Schlagintweit (1954), Massabie (1976, 1987), Wagner-Manslau (1988), Szlafsztajn (1991), Massabie y Szlafsztajn (1991), Massabie *et al.* (1991), Costa *et al.* (2001) y Massabie *et al.* (2006). La mayoría coincide en que el fallamiento cuaternario, está formado por rocas gnéissicas y graníticas de edad precámbrica-paleozoica inferior que sobrecorren a sedimentos finos cuaternarios, como arenas y sedimentos loessoides.

La falla Santa Rosa posee numerosos antecedentes que la describen, realizados por Massabie (1976, 1987), Kraemer *et al.* (1988), Wagner-Manslau (1988), Massabie y Szlafsztajn (1991), Massabie *et al.* (1991), Costa *et al.* (2000, 2001), Bonalmi *et al.* (2005) y Massabie *et al.* (2006). Estos autores interpretan que el bloque hundido corresponde a un cenoglomerado de piedemonte, de probable edad cuaternaria, que la zona de corrimiento o deslizamiento está formada por un nivel de arcillas rojizas en contacto con el bloque elevado formado por basamento cristalino, migmatitas y gneises pertenecientes al Complejo Metamórfico Sierra Chica. Este cabalga a los sedimentos cuaternarios con un plano de rumbo  $340^\circ$  N y buzamiento variable entre  $30^\circ$  y  $40^\circ$  E.

El área de las sierras de Córdoba ha sido epicentro de numerosos terremotos de magnitud (Richter)  $M \geq 5,0$ , históricos y prehistóricos, con períodos de recurrencia que superan el lapso temporal cubierto

por el registro de la sismicidad histórica. Con relación a estos últimos, los estudios paleosismológicos realizados en el sur de Córdoba indican que, en este sector de la intraplaca han tendido ocurrencia, en los últimos 4.000 años, al menos cuatro paleoterremotos que habrían alcanzado la M 7,0 (Sagripanti *et al.* 2009, Sagripanti y Villalba 2011). Además, en el borde occidental de la sierra de Las Peñas se han relevado deformaciones en sedimentos cuaternarios que han permitido interpretar al menos dos paleoterremotos de M 6,9 (Gallo 2011). La determinación de parámetros sismogénicos de algunas fallas de la región, cuyos valores están indicando la ocurrencia de fuertes terremotos (M 7,0) superiores a los registros históricos, coinciden con el umbral de magnitud propuesto por Costa (2004), de M 6,5 y M 7,0 o superiores, para paleoterremotos con epicentro en las Sierras Pampeanas de Córdoba.

Algunos de los terremotos históricos con epicentro al norte de la provincia de Córdoba han superado la M 5,0, entre ellos, Deán Funes de M 6,5 (1908), Villa Giardino de M 5,6 (1947), Cruz del Eje de M 6,7 (1955), sin que se hayan constatado rupturas superficiales asociadas, salvo el Gran Terremoto de Sampacho de M 6,0 (1934), con epicentro en la región sur, que según Mingorance (1991) generó un desplazamiento superficial compresional cósmico.

La sismicidad en cercanías de las localidades de Santa Rosa, Villa General Belgrano, Cosquín y La Falda, que podría asociarse a la falla de la Sierra Chica, normalmente es moderada-leve y superficial (profundidad hipocentral de hasta 33 km). Si bien la magnitud de la mayoría de los microsismos es  $M < 3,0$  se registran sismos que, en algunos casos, alcanzan la M 5,0 e intensidades que varían entre III y IV Mercalli Modificada (MM).

Algunos registros instrumentales de sismos recientes ocurridos en la zona de Santa Rosa de Calamuchita y Villa General Belgrano, de  $M \geq 3,0$ , obtenidos por el Instituto Nacional de Prevención Sísmica (INPRES) se resumen a continuación: Julio de 1997 (M 3,6 y M 4,1), Marzo de

2003 (M 5,0), Junio de 2004 (M 4,3), Octubre de 2005 (M 3,5), Abril de 2008 (M 3,0), Noviembre de 2008 (M 3,3), Mayo de 2010 (M 3,0), Enero de 2011 (M 3,6) y Febrero de 2011 (M 3,0).

En tanto que la actividad sísmica hacia el norte, relacionada a la falla de Sierra Chica, se concentra en cercanías de las localidades de Cosquín y La Falda. Algunos registros son, Julio de 2008 (M 3,0), Enero de 2009 (M 4,0) y Marzo de 2011 (M 3,0) con intensidades que varían entre II y III MM.

## METODOLOGÍA

En distintas secciones a lo largo de una falla secundaria del frente principal de levantamiento de la Sierra Chica se ubican los perfiles en los que se realizó la descripción y análisis de las deformaciones dúctiles y frágiles cuaternarias.

Con el propósito de asegurar continuidad en la descripción e interpretación de la estructura, a nivel regional, se retomaron dos perfiles analizados previamente por otros autores (Schlagintweit 1954, Massabie 1976, 1987, Kraemer *et al.* 1988, Wagner-Manslau 1988, Szlasfsztein 1991, Massabie y Szlasfsztein 1991, Massabie *et al.* 1991, Costa *et al.* 2001) en la zona de Potrero de Garay y Santa Rosa de Calamuchita, y se describieron cinco nuevos hacia el sur, el primero de los cuales se intercala con los anteriores. Estos han sido ordenados, de norte a sur, como: Potrero de Garay, Villa General Belgrano, Santa Rosa de Calamuchita, Sur Santa Rosa de Calamuchita, Embalse de Río Tercero, Elena y Arroyo Tegua (Fig. 1).

La metodología seguida para la ubicación de los sitios potenciales a relevar, fue la realización del foto-análisis de fotos aéreas verticales a escalas 1:5.000, 1:20.000 y 1:60.000, relevamiento aéreo con toma de fotos oblicuas a baja altura y con bajo ángulo de incidencia solar, relevamiento geológico-neotectónico de campo complementado con técnicas de relevamiento paleosismológicas y estudios de prospección geofísica como geoeléctrica y gravimetría. Estos últimos principalmente al sur de Embalse de Río Tercero, en la llanura, para relevar la topografía subterrá-

nea del basamento (Gallo 2011).

En cada perfil se reconocieron las unidades litológicas aflorantes que, de base a techo, se denominaron en forma consecutiva como Unidad A (UA), Unidad B (UB), etc. Al mismo tiempo se identificaron y describieron las estructuras deformacionales presentes.

## RELEVAMIENTO DE DEFORMACIONES CUATERNARIAS

### Perfil Potrero de Garay

El perfil se describió en una sección de la falla secundaria de la Sierra Chica denominada Potrero de Garay que posee un azimut entre  $340^\circ$  N- $350^\circ$  N y un buzamiento de  $35^\circ$ - $37^\circ$  E (Fig. 1). La orientación aproximada del perfil es O-E, (Fig. 2a) y se ubica a 3 km al norte de la localidad homónima, en proximidades del río San Pedro.

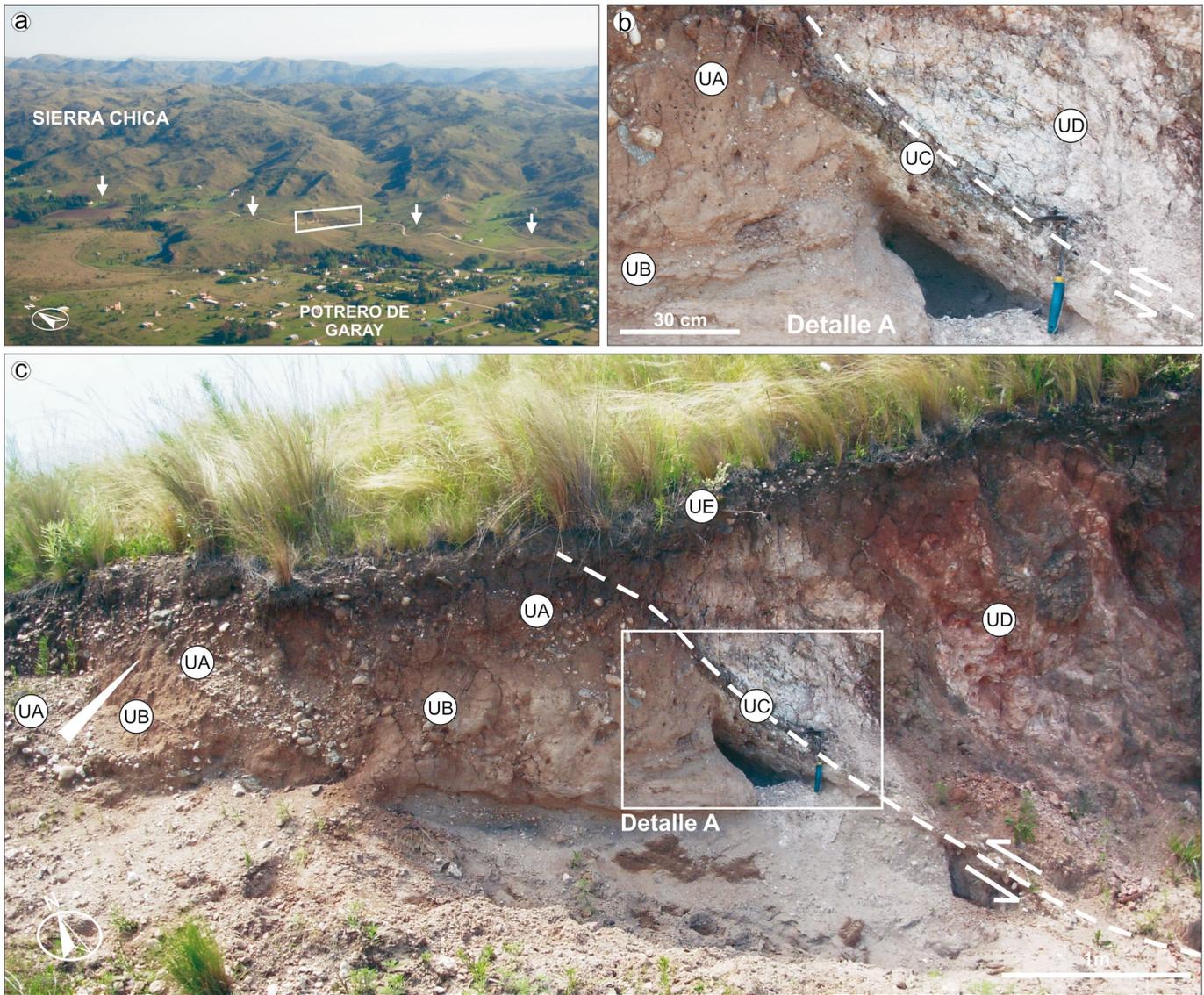
En el sector del perfil, la falla secundaria ejerce un control estructural a la red de escurrimiento superficial principalmente del río San Pedro y asociadas a ésta se reconocieron morfoestructuras superficiales como escarpas y escarpas pequeñas con orientación meridional enfrentando al O, generadas en los abanicos aluviales.

El perfil está conformado por las siguientes unidades:

**UA:** sedimentos conglomerádicos correspondientes a un depósito aluvial-coluvial con materiales gruesos, redondeados, formados por litoclastos de hasta 10 cm de longitud, ligeramente granodecrecientes y con clastos imbricados de composición granítica a metamórfica subordinados. La unidad inclina entre  $25^\circ$  y  $27^\circ$  E.

**UB:** sedimentos finos, limosos, con gravas dispersas, mal seleccionados con intercalaciones locales de lentes finos, laminados, de arenas finas a muy finas. La secuencia es concordante a la anterior. El material limoso corresponde a sedimentos loésicos retransportados.

**UC:** arcillas verdosas de 15-20 cm de espesor, materiales característicos del plano de corrimiento de la falla. Composicionalmente son minerales retrogradados (Fig. 2b).



**Figura 2:** a) Foto aérea oblicua en la que las flechas indican la traza de la falla y el recuadro blanco en perspectiva el sitio del perfil. b) Detalle de las arcillas (UC) reconocidas en el plano de corrimiento. c) Perfil O-E de la trinchera con la exposición del corrimiento.

**UD:** rocas gnésicas y graníticas de edad Precámbrico-Paleozoico inferior, intensamente fracturados, formando bloques de distintas dimensiones dependiendo de la competencia de las rocas afectadas.

**UE:** sedimentos correspondientes al relleno moderno ligeramente edafizado (suelo actual) de aproximadamente 20 cm de espesor.

**Interpretación:** El perfil (Fig. 2c) presenta en la base dos ciclos, reconocibles, de UA que pasa transicionalmente a UB y que se las interpreta como secuencias de abanicos que gradan a depósitos coluviales de sedimentos loésicos retransportados, la

edad asignada es Cuaternario. Sobre estos materiales, en contacto tectónico se encuentran las rocas del basamento intensamente fracturado (UD). Los materiales de UC delimitan y resaltan el plano de corrimiento.

Los sedimentos cuaternarios forman parte del bloque hundido de la falla y, si bien el corrimiento es importante, no presentan evidencias claras de deformación, salvo la disposición caótica que presentan los materiales de UA, en el contacto con la zona de corrimiento.

La UD conforma el bloque elevado. La fábrica original del gneis ha sido obliterada

por deformación frágil y meteorización en la zona próxima al corrimiento. Mientras que, a lo largo de la exposición, estas rocas presentan planos de discontinuidad paralelos al plano de falla, cuyo rumbo en este sector es 340° N-350° N. Estos planos tienen tres orientaciones preferenciales, sintéticos a la falla e inclinan entre 28° y 45° E, antitéticos que inclinan entre 25° y 36° O, y un juego de planos subhorizontales que inclinan al E.

De la descripción de las unidades litológicas y la interpretación de las deformaciones relevadas se interpreta, en coincidencia con lo ya presentado por otros autores,



**Figura 3:** a) Foto aérea oblicua en la que las flechas indican la escarpa de falla, el recuadro blanco en perspectiva el sitio del perfil. b) Detalle de las arcillas (UB) reconocidas en el plano de corrimiento. c) Perfil E-O de la trinchera presentando la exposición del corrimiento.

que el fallamiento correspondería al segundo evento tectónico cenozoico importante ocurrido en la región, al que le asignan edad pleistocena media superior.

#### Perfil Villa General Belgrano

El perfil se ubica a 2 km al norte de la localidad de Villa General Belgrano, próximo a la ruta provincial N° 5 (Fig. 1), en una sección de la falla secundaria de la Sierra Chica que posee un azimut de  $030^{\circ}$  N. La orientación aproximada del perfil es E-O (Fig. 3a).

En el sector del perfil y hacia el norte del mismo, asociadas a la falla, se reconocieron morfoestructuras superficiales como

escarpas, con orientación sub-meridional enfrentando el NO, ubicadas al O de la escarpa correspondiente al levantamiento principal de la sierra.

El perfil está conformado por las siguientes unidades:

**UA:** sedimentos conglomerádicos, clasto sostén, con clastos redondeados y angulares a subangulares de rocas del basamento cristalino, con tamaños que varían entre 1 y 30 cm aproximadamente que gradan a sedimentos finos, loessoides. Localmente en el conglomerado se observan lentes de arenas mal seleccionadas, con clastos redondeados y abundante matriz areno-limosa. Se interpreta como una secuencia

grano decreciente correspondiente a un depósito pedemontano (abanico aluvial-coluvial), se considera como conglomerado con matriz arenosa. La edad asignada a este depósito es cuaternaria.

**UB:** arcillas rojizas y verdosas de 15 a 25 cm de potencia, compuesta por minerales retrogradados (Fig. 3b). Estos materiales sueltos de génesis cataclástica, resaltan el plano de corrimiento de la falla.

**UC:** basamento intensamente fracturado compuesto por un gneis de color verdoso, producto de la alteración. Se reconocen bloques graníticos incluidos en la metamorfita intensamente fracturada y cloritizada.

*UD*: sedimentos correspondientes al relleno moderno ligeramente edafizado (suelo actual) de 15 a 20 cm de potencia.

*Interpretación*: el perfil (Fig. 3c) presenta sedimentos correspondientes a un depósito aluvial-coluial (UA), la presencia de distinta granulometría de los sedimentos se interpreta como una secuencia de abanicos que gradan a depósitos coluviales de sedimentos loésicos retransportados, la edad asignada es Cuaternario. Sobre yacen a estos materiales, en contacto tectónico las rocas del basamento intensamente fracturado (UC). Los materiales de la UB se ubican en el plano de corrimiento que inclina 25° E (Fig. 3b).

Los sedimentos cuaternarios forman parte del bloque hundido de la falla y, si bien el corrimiento es importante, no se reconocen las deformaciones que caracterizan el piso de un corrimiento de esta magnitud.

El bloque elevado está formado por rocas del basamento precámbrico (UC) y posee planos de discontinuidad sintéticos cuya actitud es concordante con la del fallamiento secundario. Estos planos y la foliación original de la roca han sido obliterados por la alteración y el fracturamiento.

Las deformaciones relevadas como también su actitud y geometría permiten interpretar que la edad del fallamiento correspondería al segundo evento tectónico ocurrido en la región, al que se le asigna la edad pleistocena media superior.

### Perfil Santa Rosa de Calamuchita

El perfil se ubica en la localidad de Santa Rosa de Calamuchita, próximo a la ruta provincial N° 5 (Fig. 1), en una sección de la falla secundaria de la Sierra Chica denominada Santa Rosa que posee un azimut de 320° N. La orientación aproximada del perfil es E-O (Fig. 4a).

En este sector, se reconocieron morfoestructuras superficiales como escarpas con orientación meridional enfrentando el O, que resultan del fallamiento de los abanicos aluviales.

El perfil está conformado por las siguientes unidades:

*UA*: depósito sedimentario formado por

bloques y clastos de rocas metamórficas en una matriz pelítica-arenosa, se lo considera un fanglomerado de piedemonte, verticalmente gradan a secuencias de material psefítico más fino, matriz soportado, con gradación normal grosera. La potencia del mismo es de al menos 40 metros. La edad según Kraemer *et al.* (1988) es correspondiente al límite Terciario-Cuaternario.

*UB*: cataclasitas finas, arcillosas de color rojizo claro, características del plano de corrimiento de la falla, cuya composición son minerales retrogradados los cuales gradan transicionalmente a la roca del bloque correspondiente presentando coloración rojiza oscura en el bloque del techo y pardo verdosa en el piso. Posee una potencia máxima de 50 cm (Fig. 4b).

*UC*: basamento cristalino formado por migmatitas y gneises pertenecientes al Complejo Metamórfico Sierra Chica, presenta un color verdoso como producto de la alteración y se encuentra intensamente fracturado. Este grado de alteración y fracturamiento ha obliterado la foliación original de la roca. Localmente se observan intrusiones graníticas plegadas.

*UD*: sedimentos correspondientes al relleno moderno ligeramente edafizado (suelo actual), de aproximadamente 15 cm de potencia.

*Interpretación*: en el perfil (Fig. 4c) que tiene una posición perpendicular al rumbo de la falla, se reconocen sedimentos correspondientes a un depósito aluvial-coluial (UA) de piedemonte cuya edad asignada es Cuaternario. Sobre éstos, en contacto tectónico, se encuentran las rocas del basamento intensamente fracturado (UC) y los materiales de la UB que delimitan el plano de corrimiento que inclina 35° E (Fig. 4b).

Los sedimentos cuaternarios que conforman el bloque hundido de la falla no presentan las deformaciones que se supone deberían quedar registradas en un corrimiento de esta magnitud. Solo en la vista frontal de la exposición se reconocen planos de discontinuidad subhorizontales, próximos al plano de falla.

En el bloque elevado de basamento cristalino (UC) se reconocen deformaciones dúctiles, y frágiles como planos de discon-

tinuidad que, en algunos casos, son sintéticos al plano de falla, con inclinaciones de 30° E que se horizontalizan hacia el techo. Planos antitéticos, inclinados 30° O y planos subhorizontales flexurados. En la exposición frontal del perfil (N-S) se reconocen planos de discontinuidad subhorizontales y otros que inclinan entre 40° y 50° S.

Sobre la base de las evidencias de deformaciones relevadas, asociadas a los antecedentes de esta exposición, se interpreta que el fallamiento, en coincidencia con lo ya presentado por otros autores, correspondería a la segunda fase tectónica, que la asignan al Pleistoceno medio superior.

### Perfil Sur de Santa Rosa de Calamuchita

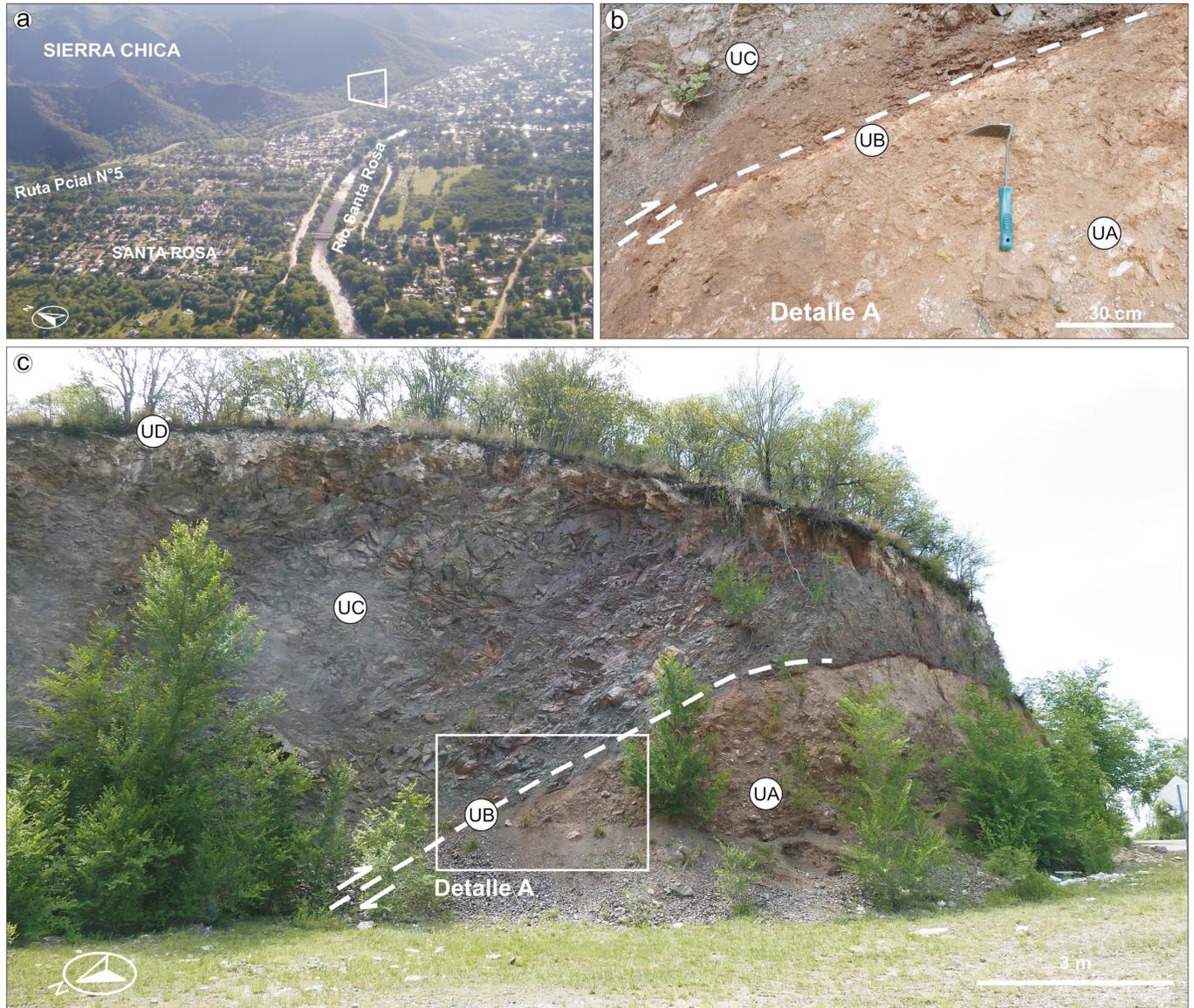
El perfil se ubica a 5 km al sur de la localidad de Santa Rosa de Calamuchita, próximo a la ruta provincial N° 5 (Fig. 1), en una sección de la falla de la Sierra Chica denominada Santa Rosa que posee un azimut de 320° N. La orientación aproximada del perfil es NNO - SSE (Fig. 5a), siendo la exposición frontal del corrimiento la analizada.

El perfil está conformado por las siguientes unidades:

*UA*: depósito sedimentario formado por litoclastos de roca metamórfica y granítica subordinada en una matriz pelítica arenosa, correspondiente a facies finas de un fanglomerado de piedemonte que por sus características texturales y composicionales se lo correlaciona con la UA descrita en el perfil anterior, por lo que se le asigna una edad pliocena-pleistocena. La potencia del mismo es de al menos 40 metros.

*UB*: cataclasitas finas, arcillosas de color rojizo claro (20 cm) compuesta de minerales retrogradados que gradan transicionalmente a la roca del bloque correspondiente presentando coloración rojiza oscura en el bloque del techo y gris verdosa en el piso. Posee una potencia máxima de 50 cm.

*UC*: basamento cristalino formado por migmatitas y gneises pertenecientes al Complejo Metamórfico Sierra Chica, intensamente fracturado, presenta un color verdoso y una patina rojiza como producto de la alteración.



**Figura 4:** a) Foto aérea oblicua presentando la ubicación del sitio del perfil (recuadro blanco en perspectiva). b) Detalle de las arcillas (UB) relevadas en el plano de corrimiento. c) Perfil E-O, presentando la exposición del corrimiento.

**UD:** sedimentos correspondientes al relleno moderno edafizado, de aproximadamente 25 cm de potencia.

**Interpretación:** en el perfil de estudio (Fig. 5b), cuya exposición posee una orientación paralela al rumbo de la falla, se reconocen materiales correspondientes a un depósito de piedemonte (UA). Sobre estos sedimentos, en contacto tectónico, se encuentran los materiales de UB que delimitan el plano de corrimiento (Fig. 5c) y las rocas del basamento (UC).

Los sedimentos cuaternarios corresponden al bloque hundido de la falla, si bien en algunos sectores de la exposición fron-

tal del perfil se visualizan planos de discontinuidad subhorizontales que son las únicas deformaciones que se reconocen, a pesar de haber soportado un corrimiento de basamento precámbrico-paleozoico sobre materiales cenozoicos.

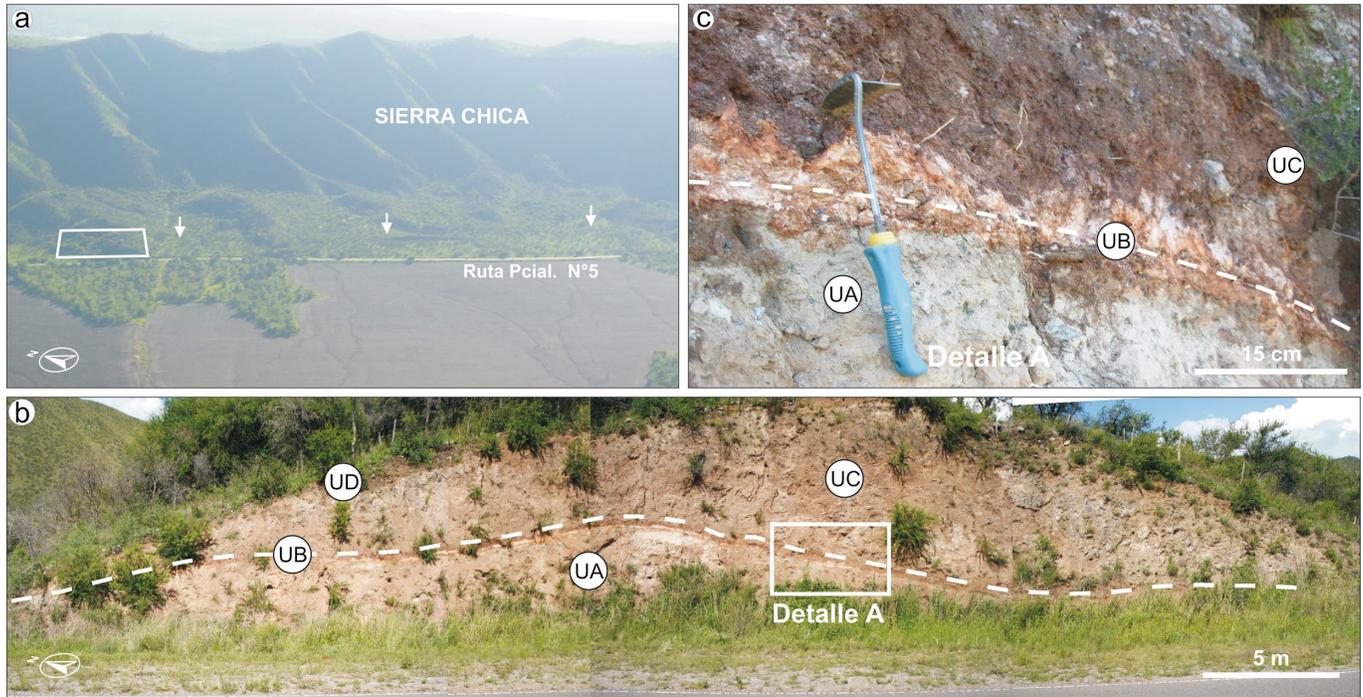
El bloque elevado es basamento cristalino (UC), se encuentra intensamente fracturado formando bloques irregulares, el grado de meteorización y fracturamiento ha obliterado la foliación original de la roca. En algunos sectores el perfil presenta planos de discontinuidad que inclinan al sur. La vista de frente de la superficie de corrimiento posee una geometría

curva acentuada.

Sobre la base de las evidencias de deformaciones relevadas en esta exposición se interpreta que la edad del fallamiento correspondería al segundo evento tectónico ocurrido en la región, que es pleistocena media superior.

#### **Perfil Embalse de Río Tercero**

El perfil de la trinchera natural se ubica en la costa sur del embalse de Río Tercero, entre la central nuclear y el Club Náutico Río Tercero (Fig. 1), en una sección de la falla secundaria de la Sierra Chica que posee un azimut de 337° N. La orien-



**Figura 5:** a) Foto aérea oblicua donde las flechas indican la traza de la falla y el recuadro blanco en perspectiva el sitio de la trinchera. b) Perfil NNO-SSE, presentando la vista frontal del corrimiento. c) Detalle de las arcillas (UB) presentes en el plano de corrimiento.

tación aproximada del mismo es NE-SO (Fig. 6a).

El perfil está formado por las siguientes unidades:

**UA:** conformada por areniscas rojizas de al menos 60 cm de potencia (Fig. 6b), pelitas y areniscas finas a muy finas laminadas e interestratificadas de color rojizo. Esta unidad es equivalente a la Formación Embalse Río Tercero, de edad cretácica inferior, definida por Gordillo y Lencinas (1967).

**UB:** cataclasitas finas oscuras, de tamaño arcilla, de aproximadamente 25 cm de potencia, cuya composición son minerales retrogradados característicos del plano de corrimiento de la falla (Fig. 6c), que definen una zona localizada alrededor del mismo (Fig. 6d).

**UC:** roca correspondiente a una colada basáltica de aproximadamente 3 m de potencia. Se considera a esta unidad como la Formación Cerro Colorado, de edad cretácica inferior, definida por Gordillo y Lencinas (1967).

**UD:** sedimentos correspondientes al relleno moderno edafizado.

**Interpretación:** en el perfil de la trinchera

(Fig. 6c), se reconocen materiales correspondientes a un depósito de ambiente de planicie de inundación (UA) de edad cretácica inferior. Sobre este depósito sedimentario se encuentra el basalto (UC) que presenta en su base un nivel intensamente fracturado que corresponde a UB, y no se reconoce el típico contacto, de alteración por temperatura, que han producido en toda el área las coladas basálticas sobre las sedimentitas.

El techo de las areniscas rojizas (UA) así también como la base de la UC se encuentran intensamente fracturadas y falladas, se considera que conforman, junto a UB, el plano de despegue o de corrimiento que posee un azimut de  $330^{\circ}$  N, y adopta una geometría lítrica con una inclinación de  $20^{\circ}$  E, se interpreta que el movimiento de la falla es inverso. Todas estas unidades están basculadas hacia el E.

Las evidencias de deformaciones, frágiles y dúctiles, relevadas permiten interpretar que el corrimiento ha sido de importante magnitud, similar al reconocido en los perfiles anteriormente descritos. Si se tiene en cuenta además, que el perfil está sobre la traza de la falla de probada acti-

vidad neógena, se considera que el fallamiento que ha afectado a estas unidades es probablemente de esta edad.

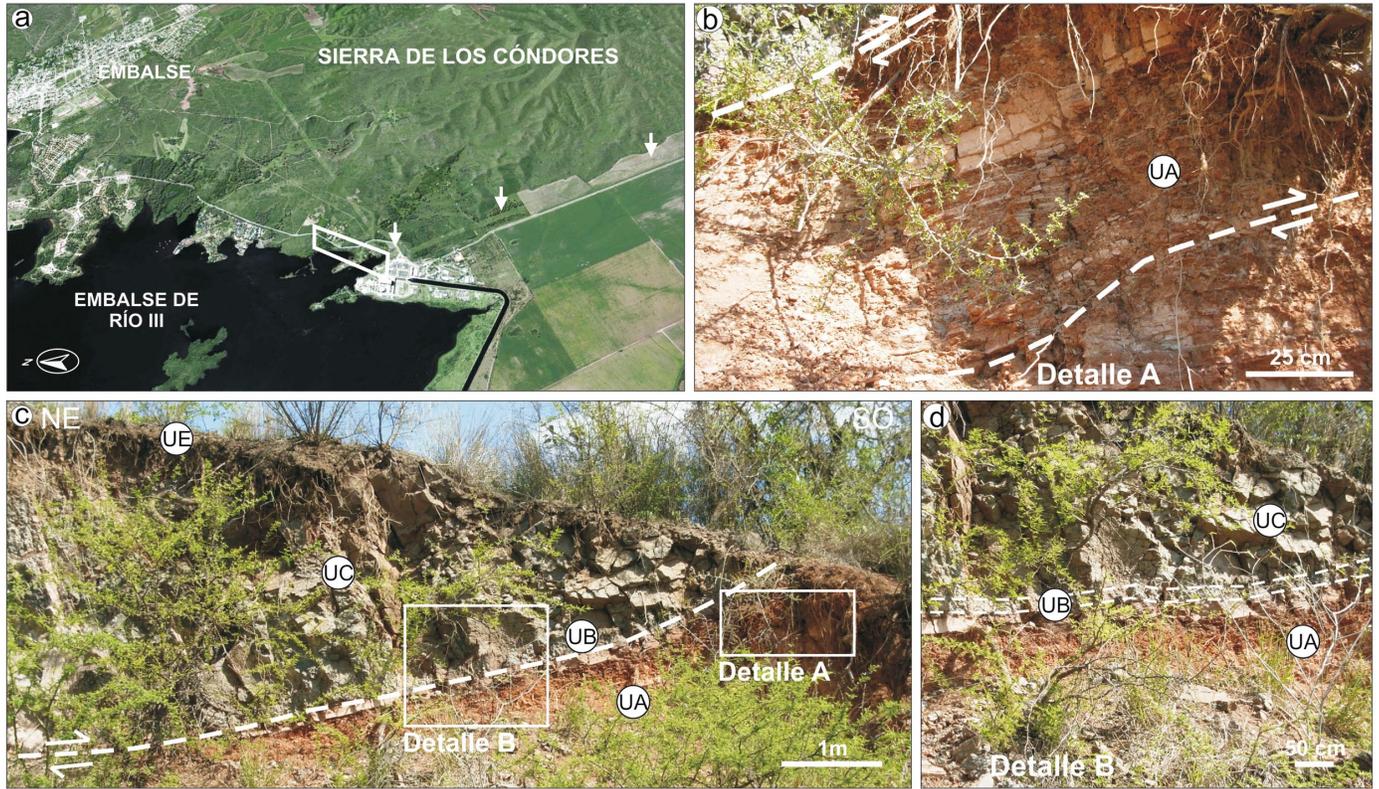
### Perfil Elena

Los perfiles de las trincheras, naturales, denominadas T1 y T2 se ubican en la cabecera de una cárcava cuyo eje tiene una orientación general aproximada de  $255^{\circ}$  N, desarrollada en la vertiente oriental del arroyo del Barreal, a 4,5 km al NE de la localidad de Elena y sobre un lineamiento de orientación aproximada  $354^{\circ}$  N, que correspondería a una sección de la falla secundaria de la Sierra Chica (Fig. 1).

En este sector, asociadas a este lineamiento, se reconocieron morfoestructuras superficiales como pequeñas escarpas con orientación meridional, escarpas tectónicas afectando los sedimentos cuaternarios, de entre 30 y 90 cm de altura (Fig. 7a y b), enfrentando el O y estructuras deformacionales (dúctiles y frágiles) en sedimentos finos cuaternarios.

El perfil está conformado por las siguientes unidades:

**UA:** sedimentos limo arenosos de color pardo claro que se correlacionan con la



**Figura 6:** a) Imagen obtenida de Google Earth, donde el recuadro blanco en perspectiva indica la ubicación de la trinchera en la margen sur del embalse de Río Tercero. b) Detalle de las areniscas (UA) afectadas por el corrimiento. c) Perfil de la trinchera, la línea de trazos resalta superficie de corrimiento. d) Detalle de la zona de cataclasitas (UB) reconocidas en el basalto.

Formación Chocancharava de edad pleistocena superior definida por Cantú (1992) y Cantú *et al.* (2006).

**UB:** sedimentos loésicos y arenas muy finas de color pardo claro equivalentes a la Formación Laguna Oscura, de edad holocena superior (Cantú 1992, Cantú *et al.* 2006).

**UC:** suelo actual desarrollado sobre sedimentos loessoides.

**Interpretación:** la trinchera T1 se ubica en la margen izquierda de la cárcava y tiene una orientación aproximada de  $070^{\circ}$  N (Fig. 7c), enfrentando al NO. En el perfil se reconoce, dentro de UA, un nivel limo arenoso con mayor cementación de 40-50 cm de potencia, que está dislocado formando bloques de hasta 1 m de largo, éstos se encuentran escalonados y basculados inclinando  $20^{\circ}$  E. Se identificó una estructura sedimentaria de corte y relleno correspondiente a un pequeño canal efímero (Fig. 7c), que también se encuentra expuesto en la pared opuesta de la cárcava (Fig. 7d). Esto permitió medir el desplaza-

miento de su eje tanto en el plano vertical (90 cm más arriba), como horizontal (70-90 cm hacia el norte).

La trinchera T2 se ubica a 10 metros al S de la anterior (Fig. 7e) y tiene una orientación  $290^{\circ}$  N, enfrentando al NE. En la base aflora UA, donde se relevaron pliegues, generados por niveles sobrecorridos controlados por distintos planos de falla. La vergencia de estas estructuras es al O y el ángulo de inclinación de  $33^{\circ}$  E. Se interpreta, que estas deformaciones, corresponden a una zona de falla con movimiento inverso.

En la UB, sección superior de la secuencia, se relevaron planos de discontinuidad con orientación meridiana inclinando  $36^{\circ}$  E. Se interpretó que estos planos, desarrollados en sedimentos finos cuaternarios, corresponderían a la propagación de la zona de falla hacia la superficie.

Sobre la base de la información obtenida se pudo definir que la falla tiene una orientación meridiana y un buzamiento de  $36^{\circ}$  E (Fig. 7d), es de movimiento inverso,

con una componente de rumbo sinistral. Los paleoterremotos interpretados que han dado origen a estas deformaciones han sido al menos dos, el primero de edad aproximada Pleistoceno superior y el segundo de edad holocena superior. Se estima que el desplazamiento, vertical por evento fue de 35 cm y el horizontal de 45 cm aproximadamente y se considera que la propagación de la zona de falla ha generado rupturas superficiales, que se correlacionan con las pequeñas escarpas reconocidas en superficie.

#### Perfil Arroyo Tegua

Las trincheras naturales, denominadas T3 y T4 se ubican a 4 km al E del puente de la ruta nacional N° 36 sobre el arroyo Tegua. Estas se encuentran en la margen izquierda del arroyo, a ambos lados de la confluencia del arroyo del Barreal (Figs. 1 y 8a). Este último es controlado por un lineamiento tectónico que posee un azimut de  $357^{\circ}$  N y que correspondería a una sección de la falla secundaria de la Sierra



**Figura 7:** a) Foto aérea oblicua en la que las flechas indican las pequeñas escarpas y el recuadro blanco en perspectiva el sitio de las trincheras. b) Vista panorámica de una de las pequeñas escarpas enfrentando el O. c) Perfil de la trinchera T1, la línea de trazos resalta la geometría del pequeño canal y la base de los bloques dislocados. d) Block diagrama presentando la localización de las trincheras y la actitud interpretada del plano de falla. e) Perfil de la trinchera T2, la línea de trazos resalta los corrimientos, pliegues y planos de discontinuidad.

Chica. La orientación aproximada de las trincheras es E-O. En este sector se reconocieron, en los sedimentos cuaternarios, morfoestructuras superficiales asociadas a la traza de la falla,

como pequeñas escarpas con orientación meridional enfrentando al O y estructuras deformacionales, dúctiles y frágiles (compresivas y distensivas). Las unidades que conforman el perfil,

equivalentes a las definidas y datadas por Cantú (1992) y Cantú *et al.* (2006), son las siguientes:  
 UA: se encuentra formada por arenas finas con gravas dispersas, gravas finas y

gruesas intercaladas con arenas medias a gruesas (correlacionadas con la Formación Alpa Corral), de origen fluvial y edad asignada al límite plio-pleistoceno.

**UB:** sedimentos limosos de color pardo amarillento, de origen eólico, y limosos a limo arenosos muy finos de color pardo rojizo y origen fluvial. Estos sedimentos corresponden a la Formación Pampiano, de edad asignada pleistoceno media a superior.

**UC:** está constituida por arenas medias a gruesas, intercaladas con sedimentos limo-arenosos de origen fluvio eólico que corresponden a las distintas facies de un importante ciclo fluvial (Formación Chocancharava). La edad asignada de estos materiales es pleistoceno superior.

**UD:** sedimentos limo arenosos finos dispuestos en capas con escasa laminación interna de color pardo amarillento o marrón grisáceo y loess retransportados hídricamente, que se interdigitan con capas de arenas finas. Corresponden a un ciclo fluvial de escasa magnitud (Aloformación Arroyo Las Lajas), de edad asignada holoceno inferior a media.

**UE:** sedimentos arenosos muy finos a limosos, eólicos, de 75 cm de potencia. Corresponden a la Formación Laguna Oscura y la edad asignada es holoceno, entre 6.000-4.000 a AP.

**UF:** suelo actual, desarrollado sobre sedimentos loessoides.

**Interpretación:** la trinchera T3 se ubica en la margen izquierda del arroyo Tegua próxima a la intersección de éste con el arroyo del Barreal, tiene una orientación aproximada O-E (Fig. 8a y b) y enfrenta al sur.

En la mitad inferior del perfil las unidades UA, UB y UC se encuentran verticalmente desplazadas por una zona de falla con rumbo submeridiano e inclinación al E, que disturba intensamente a los sedimentos cuaternarios. Asociado a este desplazamiento y como evidencia de movimientos prehistóricos, se relevó una cuña coluvial formada por materiales correspondientes a UB y UC (Fig. 8b). Se considera que las deformaciones reconocidas dentro de la zona de falla y el depósito coluvial son evidencias de un paleoterremoto ocurrido con posterioridad a la sedi-

mentación de UC (Pleistoceno superior).

En la parte superior del perfil de la trinchera, las estructuras frágiles reconocidas corresponden a la propagación de los planos de la zona de falla a través de UD hasta interesar la base de UE. Esta deformación tiene asociados planos de discontinuidad sintéticos y también afecta la cuña coluvial preexistente (Fig. 8b). Por otra parte la deformación dúctil se reconoció en UE, y está representada por pliegues anticlinales y sinclinales con pequeña amplitud de onda (30 cm) y longitud de onda de 2,50 m, que se extienden más claramente fuera del perfil a lo largo de aproximadamente 60 m. Los pliegues poseen vergencia al O y la orientación de sus ejes es paralela al rumbo determinado para la zona de falla. Se interpretó que las deformaciones (planos de falla, discontinuidades y pliegues) corresponden a un paleoterremoto ocurrido en el Holoceno que reactivó la zona de falla.

En el perfil, el plano de falla queda evidenciado por una zona, de 50 cm de ancho, en la que las unidades sedimentarias del bloque elevado se encuentran deformadas presentando laminaciones plegadas. La actitud de estas estructuras deformacionales de escala mesoscópica y el desplazamiento vertical de las unidades permite interpretar que el movimiento de la falla, es inverso, con un rechazo vertical de aproximadamente 70 cm y una orientación azimuthal de 330° N e inclinación de 35° E (Fig. 8a y b). En el bloque hundido la deformación en los sedimentos, principalmente los correspondientes a la UB y UC, en el contacto con la zona de falla (Fig. 8c) tiene escasa manifestación.

La trinchera T4 se ubica próxima a la anterior (Fig. 9a) al E del arroyo del Barreal, tiene una orientación aproximada O-E (Fig. 9b) y enfrenta al S. En el perfil se reconoce a las UC, UD y UE afectadas por un plano de falla de alto ángulo que inclina al E (Fig. 9b y c), el desplazamiento relativo de los bloques genera una escarpa enfrentando al E. La UD se encuentra bien expuesta en el bloque elevado mientras que, en el bloque hundido, ha sido parcialmente cubierta por una cuña coluvial.

Se interpreta, sobre la base de la informa-

ción obtenida, que la falla tiene un movimiento normal con un desplazamiento vertical de alrededor de 1 m y una orientación azimuthal de 330° N inclinando 70° E (Fig. 9b). Se considera que esta falla es una deformación distensiva desarrollada en el bloque elevado de la falla inversa reconocida en la trinchera T3.

Sobre la base del análisis paleosismológico de las deformaciones cuaternarias relevadas se interpretó, en las trincheras T3 y T4, la ocurrencia de un paleoterremoto al que se le asigna una edad aproximada posterior al Pleistoceno superior, y en la trinchera T3 otro cuya ocurrencia se asigna al Holoceno superior. Probablemente el desplazamiento vertical en cada evento haya sido de, al menos, 35 cm.

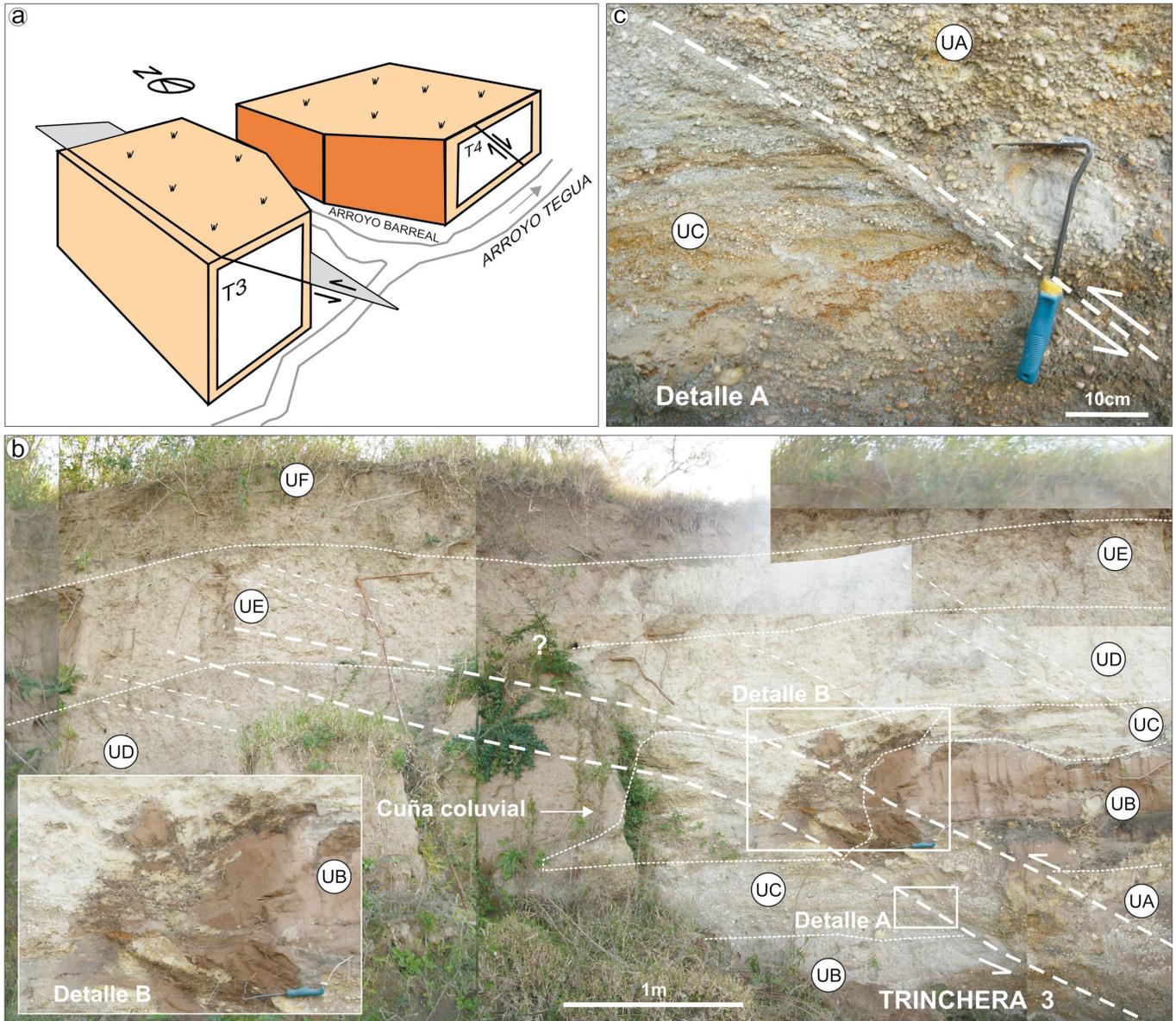
## ESTIMACIÓN PRELIMINAR DEL POTENCIAL SISMOGÉNICO

En regiones donde ocurren con frecuencia grandes terremotos, como los límites de las placas tectónicas, la magnitud máxima puede ser obtenida directamente de los registros históricos. En cambio en regiones continentales estables, la ocurrencia de estos fenómenos naturales es menos frecuente, por lo tanto la magnitud debe ser estimada indirectamente (Clark *et al.* 2010).

En este caso la información que aporta la paleosismología es importante en la reconstrucción del registro de la sismicidad prehistórica en estas regiones y para la estimación de la magnitud, ya que esto permite hacer una aproximación al conocimiento del potencial sísmico de una falla en particular.

La paleosismología mejora significativamente la comprensión del peligro sísmico a largo plazo, y se basa en la capacidad para estimar la magnitud y número de terremotos a partir de la medición de la longitud de la escarpa y desplazamiento (Leonard 2010). En fallas activas, la longitud de sus escarpas junto al desplazamiento por evento pueden proveer dos estimaciones independientes de la magnitud máxima para la falla (Clark *et al.* 2010).

Entre los parámetros necesarios para de-

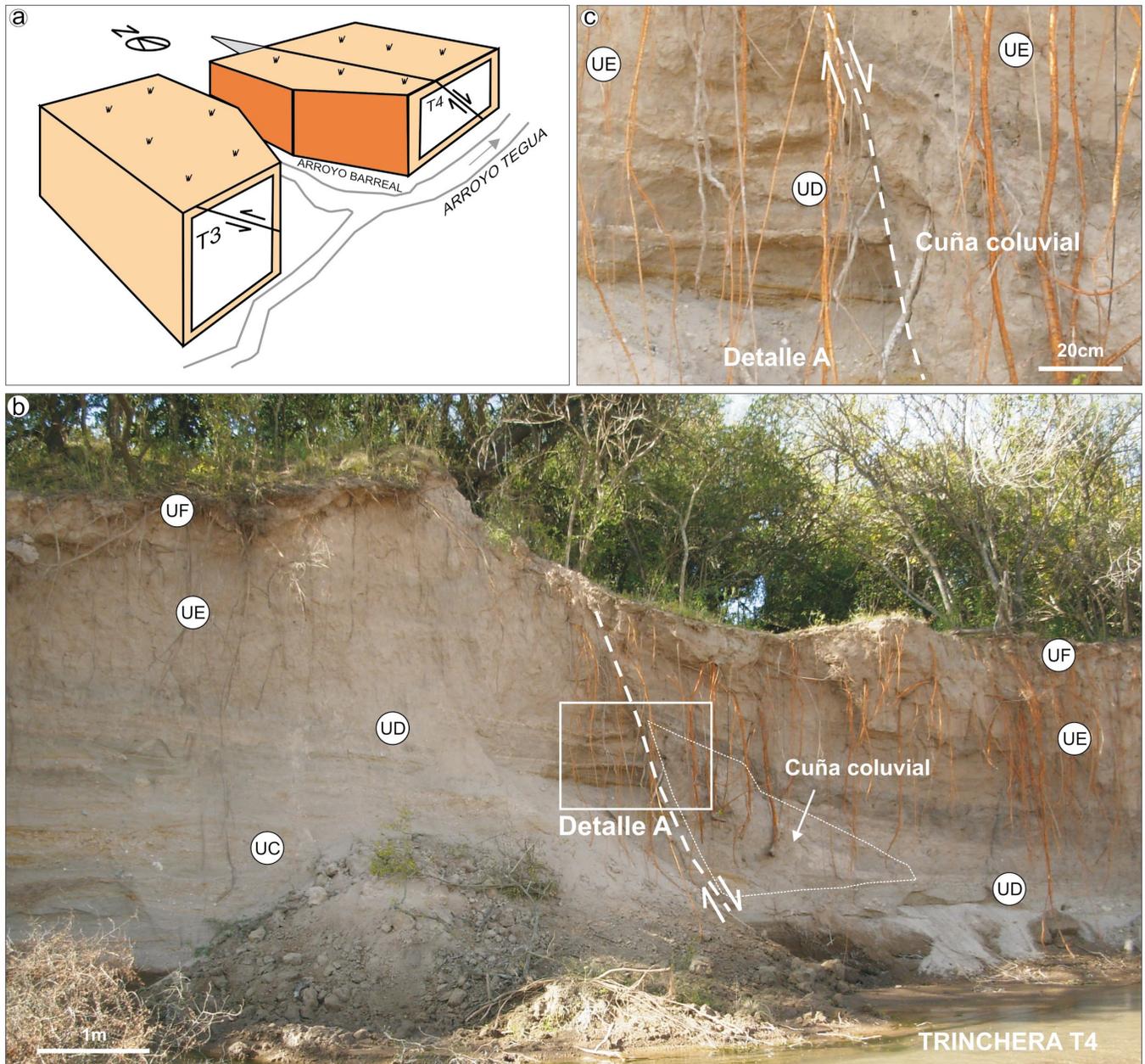


**Figura 8:** a) Block diagrama presentando la localización de la trinchera T3 y la actitud interpretada del plano de falla. b) Perfil O-E de la trinchera T3, la línea de trazos resalta la posición de la zona de falla, los planos de discontinuidad, el plegamiento de los sedimentos cuaternarios (UE), la cuña coluvial y un detalle de la misma (Detalle B). c) Detalle de la zona de falla de movimiento inverso afectando a los sedimentos cuaternarios.

terminar el potencial sismogénico de una falla, la estimación de la paleomagnitud de un terremoto es uno de los más importantes. La longitud de ruptura junto al desplazamiento de falla son evidencias primarias usadas en la determinación de la magnitud (Bonilla 1988, Reiter 1988, Wells y Coppersmith 1994, Mc Calpin 1996). Estas evidencias asociadas a paleoeventos, que normalmente se presentan como superficies de rupturas o de deformación, permiten escalar el tamaño de un terremoto por medio de fórmulas empíricas (Bonilla *et al.*

1984, Wells y Coppersmith 1994). En la actualidad otra escala usada y que describe en forma más completa el tamaño de un terremoto es la magnitud de momento ( $M_w$ ), ya que en su valoración, entre otros parámetros, se considera el área de la falla. El cálculo del valor de la  $M_w$  se puede realizar aplicando fórmulas empíricas como las propuestas por Wells y Coppersmith (1994) y Somerville (2006). Con el fin de realizar una estimación del potencial sismogénico asociado a la falla Sierra Chica, hasta la actualidad solo par-

cialmente conocido, se utilizó la información que aportan las deformaciones cuaternarias relevadas. Dado que en todos los perfiles se identificaron evidencias de la fase tectónica asignada al Pleistoceno superior, para estimar la magnitud máxima de un terremoto potencial se asumió que, si se reactivaran durante un único terremoto futuro toda las secciones en estudio la longitud de ruptura, comprendida entre Potrero de Garay y arroyo Tegua, alcanzaría aproximadamente 100 km. Se consideró como desplazamiento vertical el rele-



**Figura 9:** a) Block diagrama presentando la localización de la trinchera T4 y la actitud interpretada del plano de falla. b) Perfil O-E de la trinchera T4, la línea de trazos resalta la posición del plano de falla y la cuña coluvial. c) Detalle del plano de falla de movimiento normal afectando a los sedimentos cuaternarios.

vado en el perfil Elena, que es de 35 cm, y como profundidad hipocentral 33 km, de acuerdo a los antecedentes sismológicos de la región.

Se calculó la magnitud para este potencial terremoto aplicando las fórmulas empíricas de Bonilla *et al.* (1984) que consideran, en un caso, la longitud de ruptura y en el otro solo el desplazamiento vertical por evento. Resultando una magnitud de al menos  $M_s = 7,5$  y  $M_s = 6,7$ , respectivamente.

La magnitud de momento ( $M_w$ ), del potencial terremoto, se calculó por medio de la aplicación de las fórmulas empíricas propuestas por Wells y Coppersmith (1994) y Somerville (2006). Los valores obtenidos son  $M_w = 7,5$  y  $M_w = 7,6$ , respectivamente.

## CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos permiten probar que la falla Sierra Chica se extiende

37 km hacia el S en la llanura, desde el lineamiento Los Cóndores hasta el arroyo Tegua, definiendo una sección de la falla, denominada Las Peñas de movimiento inverso con componente de rumbo de sinistral, y que, muy posiblemente continúa más al Sur.

Las estructuras deformacionales en sedimentos finos no cohesivos, cuaternarios, relevadas se consideran como los primeros reportes de este tipo de estructuras, asociadas a dos paleoterremotos ocurri-

dos en el Pleistoceno superior y Holoceno superior respectivamente, en la zona de llanura de la sección Las Peñas, falla Sierra Chica.

Las deformaciones neógenas más importantes entre los 28° y 33° de latitud S, en Argentina, se concentran en su mayoría entre el frente orogénico Andino y las Sierras Pampeanas. Sin embargo, las deformaciones reconocidas en el borde occidental de la Sierra Chica ponen en evidencia que también este sector de la intraplaca ha estado sometido a episodios de movimientos y deformaciones, no menos importantes, que han incidido en la evolución del paisaje local. Estas permiten corroborar que el régimen tectónico compresivo actuante en el Cenozoico tiene continuidad en el Holoceno.

Las evidencias de deformaciones cuaternarias relevadas y descritas junto a los paleoterremotos interpretados en la zona de llanura de la sección Las Peñas y los valores de magnitud estimados, permiten considerar a la falla Sierra Chica como una posible fuente de fuertes terremotos. La magnitud de un terremoto futuro asociado a la falla podría ser de  $M_s = 6,7$  y  $M_w = 7,5$ . Se considera que estos valores superan ampliamente los registros históricos de la región y que son consistentes con el umbral de energía, de  $M 6,5$  y  $M 7,0$  o superiores, propuesto por Costa (2004) para fuertes terremotos con epicentro en las Sierras Pampeanas.

#### AGRADECIMIENTOS

Al Dr. Mario Gimenez (UNSJ), Lic. Aldo Giaccardi (UNSL), Lic. David Aguilera y Lic. Juan Felizzia (UNRC) por su colaboración y aportes en la realización de los estudios geofísicos.

A los editores Dr. Carlos Costa y Dr. Pablo Pazos por su predisposición, lectura crítica del manuscrito y sugerencias que han permitido mejorar este artículo.

#### TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

Bonalumi, A.A., Martino, R., Sfragulla, J.A., Carrignano, C.A. y Tauber, A. 2005. Hoja Geológica Villa María 3363-I. Programa Nacional

de Cartas Geológicas de la República Argentina, 1:250.000, 74 p., Buenos Aires.

Bonilla, M.G. 1988. Minimum earthquake magnitude associated with coseismic surface faulting. *Bulletin of the Association of Engineering Geologists* 25: 17-29.

Bonilla, M.G., Mark, R.K. y Lienkaemper, J.J. 1984. Statistical relations among earthquake magnitude, surface rupture length, and surface fault displacement. USGS. Open-File Report 84-256, Version 1.1: 50 p.

Cantú, M.P. 1992. El Holoceno en la provincia de Córdoba. *Holoceno de la República Argentina*. Cadinqua 1: 1-16, Paraná.

Cantú, M., Schiavo H., Becker A., Zhou L. y Grumelli, M. 2006. Pleistoceno superior tardío-Holoceno de la cuenca media del arroyo Santa Catalina, provincia de Córdoba, Argentina. 3° Congreso Argentino de Cuaternario y Geomorfología. *Actas* 2: 777-786, Córdoba.

Clark, D., Mc Pherson, A. y Collins, C. 2010. Mmax estimates for the Australian stable continental region (SCR) derived from paleoseismicity data. Australian Earthquake Society Conference, Perth, western Australia 15 p., Perth.

Costa, C.H. 1999. Rasgos estructurales del territorio argentino, tectónica cuaternaria en las Sierras Pampeanas. Instituto de Geología y Recursos Minerales - SEGEMAR. *Geología Argentina Anales* 29: 779-784.

Costa, C.H. 2004. ¿Microtectónica en el Cuaternario?: Métodos y aplicaciones de la paleosismología. *Revista de la Asociación Geológica Argentina Serie D: Publicación Especial* 7: 9-19.

Costa, C.H. y Vita Finzi, C. 1996. Late Holocene faulting in the Southeast Sierras Pampeanas of Argentina. *Geology* 24: 1127-1130.

Costa C.H., Machette M.N., Dart R., Bastias, H., Paredes J., Perucca L., Tello G., y Haller, K. 2000. Mapa and Database of Quaternary Faults and Folds in Argentina. International Lithosphere Program, USGS. Open-file report 00-0108, 81p.

Costa, C.H., Murillo, V., Sagripanti, G.L. y Gardini, C. 2001. Quaternary intraplate deformation in the southeastern Sierras Pampeanas, Argentina. *Journal of Seismology* 5: 399-409.

dePolo, C.M. y Slemmons, D.B. 1990. Estimation of earthquake size for seismic hazards. *Geological Society of America* 3: 1-22.

Gallo, M. 2011. Estudio neotectónico de la fa-

lla Sierra Chica en la sección Las Peñas-Los Cóndores. Universidad Nacional de Río Cuarto, Tesis de licenciatura (inédita) 103 p., Río Cuarto.

González Bonorino, F. 1950. Algunos problemas geológicos de las Sierras Pampeanas. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 5: 81-110.

Gordillo, C. y Lencinas, A. 1967. Geología y petrología del extremo norte de la Sierra de los Cóndores, Córdoba. *Boletín Academia Nacional de Ciencias* 46: 73-108, Córdoba.

Gordillo, C. y Lencinas, A. 1979. Sierras Pampeanas de Córdoba y San Luis. 2° Simposio de Geología Regional Argentina. *Academia Nacional de Ciencias* 1: 577-650, Córdoba.

Jordan, T.E. y Allmendinger, R.W. 1986. The Sierras Pampeanas of Argentina; a modern analogue of Rocky Mountain foreland deformation. *American Journal of Science* 286: 737-764.

Jordan, T.E., Isacks, B., Allmendinger, R.W., Bremen, J. y Ramos, V.A. 1983. Andean Tectonics related to geometry of subducted Nazca Plate: *Geological Society of America Bulletin* 94: 341-361.

Kraemer, P., Martino, R., Giambastiani, M. y Sfragulla, J. 1988. Análisis dinámico cinemático preliminar de la falla Santa Rosa, Departamento de Calamuchita, Provincia de Córdoba. 5° Reunión de Microtectónica *Actas* 1: 107-114, Córdoba.

Leonard, M. 2010. Earthquake Fault Scaling: Relating rupture length, width, average displacement, and moment release. *Bulletin of the Seismological Society of America* 100: 1971-1988.

Massabie, A. 1976. Estructura tectónica cenozoica entre Charbonier y Cosquín, provincia de Córdoba. 6° Congreso Geológico Argentino. *Actas* 1: 109-123, Buenos Aires.

Massabie, A. 1996. Fallamiento neotectónico en las Sierras Pampeanas Orientales. Implicancias aplicadas a diferentes escalas. *Actas Asociación Argentina de Geología Aplicada a la Ingeniería* 10: 187-198.

Massabie, A.C. y Szlafsztein, C.F. 1991. Condiciones geomecánicas y edad del fallamiento neotectónico en las Sierras Pampeanas Orientales, Córdoba, Argentina. *Actas Asociación Argentina de Geología Aplicada a la Ingeniería* 6: 154-168.

Massabie, A., Cegarra, M. y Sanguinetti, A. 2006.

- Estructura y edad de fallamiento cuaternario a la latitud de Bialet Massé, Sierra Chica de Córdoba. 12° Reunión sobre Microtectónica y Geología Estructural. Asociación Geológica Argentina publicación especial 9: 107-112, Salta.
- Mc Calpin, J.P. 1996. *Paleoseismology*, Academic Press Inc. 587 p., California.
- Mingorance, F.A. 1991. Análisis y evaluación del tectonismo reciente asociado a la falla Sampacho, provincia de Córdoba, Argentina Central. *Instituto Panamericano de Geofísica e Historia* 35: 13-39, México.
- Pilger, R. 1981. Plate reconstructions, aseismic ridges, and low-angle subduction beneath the Andes. *Geological Society of America Bulletin* Parte 1, 92: 448-456.
- Ramos, V.A. 1999. Rasgos estructurales del territorio argentino. *Geología Argentina. Instituto de Geología y Recursos Minerales. Anales* 29: 715-784.
- Ramos, V.A., Cristallini, E. y Pérez, D. 2002. The Pampean flat-slab of the Central Andes. *Journal of South American Earth Sciences* 15: 59-78.
- Reiter, L. 1988. *Earthquake hazard analysis*. Columbia University Press, 241 p., New York.
- Schlagintweit, O. 1954. Una interesante dislocación en Potrero de Garay (valle de Calamuchita) y observaciones sobre la Sierra Chica y Grande de Córdoba. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 9: 135-154.
- Sagripanti, G.L. 2006. Neotectónica y peligro sísmico de la región de Sampacho, departamento Río Cuarto. Provincia de Córdoba. Tesis doctoral, Universidad Nacional de Río Cuarto, (inédita), 300 p., Río Cuarto.
- Sagripanti, G.L. y Villalba, D. 2009. Paleosismicidad y estimación del intervalo de recurrencia de fuertes terremotos asociados a fallas de intraplaca a la latitud de 33° S: Falla Las Lagunas, Sampacho, Córdoba. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 65: 417-428.
- Sagripanti, G.L., Costa, C.H., Origlia, H.D. y Schiavo, H.F. 2001. Avances en la caracterización del peligro sísmico en el departamento Río Cuarto, Córdoba. Argentina. 4° Congreso de Geología y Minería de la Sociedad Cubana de Geología GEOMIN 2001 Actas CD: 77-88, La Habana.
- Sagripanti, G.L., Villalba, D., Grosso, M.V. y Daga, R.B. 2003. Análisis morfológico de escarpas, aplicado a la reconstrucción de la sismicidad prehistórica de la falla Las Lagunas, Sampacho, Córdoba. 2° Congreso Nacional de Cuaternario y Geomorfología Actas 1: 369-377, Tucumán.
- Sagripanti, G.L., Villalba, D., Bettiol, A. y Seitz, C. 2009. Sismicidad y paleosismicidad en la región sur de la provincia de Córdoba. Análisis del peligro y riesgo sísmico asociado. *Revista de la Asociación Argentina de Geología Aplicada a la Ingeniería y Ambiente* 23: 45-53.
- Sagripanti, G.L., Schiavo, H.F., Felizzia, J., Villalba, D., Aguilera, H., Giaccardi, A. y Membrives, J. 2011. Fuertes paleosismos de intraplaca y sus retornos vinculados a la falla Las Lagunas, Sierras Pampeanas de Córdoba. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 68: 52-70.
- Seitz, C. 2009. Relevamiento neotectónico de nuevas secciones de la falla Las Lagunas, sur de Córdoba. Universidad Nacional de Río Cuarto, Tesis de licenciatura, (inédita) 102 p., Río Cuarto.
- Smalley, R. Jr., Pujol, J., Regnier, M., Chiu, J.M., Chatelain, J.L., Isacks, B.L., Araujo, M., y Puebla, N. 1993. Basement seismicity beneath the Andean Precordillera thin-skinned thrust belt and implications for crustal and lithospheric behavior. *Tectonics* 12: 63-76.
- Somerville, P. 2006. Review of magnitude-area scaling of crustal earthquakes. Report to WGCEP 22 p., URS Corp., Pasadena.
- Szlasfszstein, C. 1991. Aspectos geológicos de los alrededores de Potrero de Garay (Provincia de Córdoba). Universidad Nacional de Buenos Aires, Tesis de licenciatura, (inédita) 86 p., Buenos Aires.
- Villalba, D. 2011. Estudio neotectónico y geodésico tendiente a comprobar movimientos prehistóricos y recientes de la falla Las Lagunas, Sampacho. Universidad Nacional de Río Cuarto, Tesis de licenciatura (inédita) 142 p., Río Cuarto.
- Wagner-Manslau, A. 1988. Estudio geológico-estructural del valle de Calamuchita entre Villa General Belgrano y Santa Rosa de Calamuchita. Provincia de Córdoba. Universidad Nacional de Buenos Aires, Tesis de licenciatura (inédita) 73 p., Buenos Aires.
- Wells, D.L. y Coopsmith, K.J. 1994. New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area and surface displacement. *Bulletin Seismological Society of America* 84: 974-1.002.

Recibido: 21 de diciembre, 2011.

Aceptado: 15 de junio, 2012.