

# FUERTES PALEOSISMOS DE INTRAPLACA Y SUS RETORNOS VINCULADOS A LA FALLA LAS LAGUNAS, SIERRAS PAMPEANAS DE CÓRDOBA

Guillermo L. SAGRIPANTI<sup>1</sup>, Hugo F. SCHIAVO<sup>1</sup>, Juan A. FELIZZIA<sup>1</sup>, Diego VILLALBA<sup>1</sup>, Héctor D. AGUILERA<sup>2</sup>, Aldo D. GIACCARDI<sup>2</sup> y José A. MEMBRIVES<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup> Departamento de Geología, Universidad Nacional de San Luis, San Luis. E-mail: adavid@unsl.edu.ar; agiaccia@unsl.edu.ar

## RESUMEN

En la intraplaca argentina, a la latitud 33°S, región sur de la provincia de Córdoba, la presencia de morfologías superficiales y deformaciones en sedimentos sueltos cuaternarios hacen suponer que la actividad tectónica neógena tuvo continuidad en el Holoceno y que seguramente fue acompañada por la ocurrencia de paleoterremotos. Los objetivos del presente trabajo son, por medio de investigaciones paleosismológicas realizar la reconstrucción del registro de la sismicidad prehistórica de la región y una estimación del potencial sísmogénico de una fuente, con probada actividad cuaternaria, que sean de base en la estimación del riesgo sísmico de la región. Se excavaron seis trincheras transversales a la traza de la falla Las Lagunas, en sedimentos de origen eólico, fluvial y lagunar, en las cuales se relevaron estructuras cosísmicas, deformacionales y de licuefacción, de escala mesoscópica. Los resultados obtenidos han permitido proponer un modelo de retrodeformación para la falla, calcular el período de recurrencia de fuertes terremotos que es del orden de 1,2 - 2,0 Ka, calcular la magnitud de algunos paleoeventos,  $M_s \geq 6,6$  y hacer una estimación de la magnitud del terremoto máximo.

**Palabras clave:** *Falla, intraplaca, trincheras, paleoterremotos, sismitas.*

## ABSTRACT

*Strong intraplate paleoearthquakes and their recurrence related to Las Lagunas fault, Sierras Pampeanas of Cordoba.*

Evidences like landforms and deformations in loose quaternary sediments, in the argentinian intraplate, at latitude 33° S, southern part of the Cordoba province, suggest that the Neogene tectonic activity continues into the Holocene and certainly had been associated to strong paleoearthquakes. The objectives of this work are to make a reconstruction of the prehistoric seismicity record of the region by paleoseismological investigations, and to estimate the seismogenic potential of a source with proven Quaternary activity, with the aim of setting the basis to estimate the seismic risk of the region. Six trenches were dug across the trace of the Las Lagunas fault, cutting eolian, fluvial, and lagoon sediments. In the sites, several coseismic deformation and liquefaction structures were observed at a mesoscopic scale. The results allowed the proposal of a retrodeformation model for the fault, calculating the period of recurrence of strong earthquakes, around of 1,2 - 2,0 Kyr. The magnitude of some paleoevents  $M_s \geq 6,6$  and maximum earthquake were also estimated.

**Keywords:** *Fault, intraplate, trench, paleoearthquake, seismites.*

## INTRODUCCIÓN

El levantamiento del basamento de las Sierras Pampeanas a la latitud 28°-33°S, indica que la deformación del mismo, de algún modo, está condicionada por la subducción subhorizontal de la placa de Nazca (Jordan *et al.* 1983, Jordan y Almendinger 1986). La horizontalización de esta placa genera en la intraplaca argenti-

na importante sismicidad superficial a la latitud de 33°S, entre la Precordillera y las Sierras Pampeanas (Costa y Vita Finzi 1996, Ramos 1999). Además, según Smalley *et al.* (1993) la sismicidad cortical está concentrada en una región angosta a lo largo del margen este del antepaís en áreas sobre subducción normal, mientras que, por encima de zonas de subducción sub-horizontal una amplia región del an-

tepaís es altamente sísmica. Otras manifestaciones de la horizontalización de la placa de Nazca a la latitud de 33°S, entre los 64°-65° de longitud O, son la presencia de morfologías superficiales, deformaciones cosísmicas en sedimentos cuaternarios, sismicidad superficial, y ocurrencia histórica y prehistórica de terremotos destructores (Sagripanti *et al.* 2001). Estas deformaciones reconocidas en el

extremo sur de las Sierras Pampeanas de Córdoba hacen suponer que la actividad tectónica neógena, en esta región, ha sido intensa.

La sismicidad prehistórica, histórica e instrumental en la región sur de Córdoba se ha logrado reconstruir parcialmente. El registro sísmico histórico e instrumental desde el año 1826 hasta la actualidad supera los 150 microsismos y sismos, siendo entre ellos el más importante el “Gran Terremoto de Sampacho” del año 1934, de magnitud (Richter) M 6,0. La reconstrucción de la sismicidad prehistórica, la determinación del potencial sismogénico de algunas fallas ubicadas en esta región y la determinación del intervalo de recurrencia de fuertes terremotos han sido completada en parte, dificultando analizar adecuadamente el peligro sísmico asociado e interpretar el modelo de deformación en estructuras de intraplaca de un sector del centro de la República Argentina (Sagripanti 2006).

La dimensión y distribución de las deformaciones superficiales como las reconocidas en las secuencias sedimentarias asociadas a la traza de fallas y los antecedentes de la ocurrencia de terremotos destructores con epicentro en la región, ponen en evidencia que hay fallas que poseen un importante potencial sismogénico, el que es sólo parcialmente conocido.

Los objetivos de la presente contribución son, por medio de investigaciones paleosismológicas, obtener información que permita la reconstrucción de la sismicidad prehistórica asociada a una falla de intraplaca, estimar la magnitud de fuertes paleoterremotos, el intervalo de retorno de los mismos y estimar el potencial sismogénico de una fuente con probada actividad cuaternaria, que sirva de base en la estimación del riesgo sísmico de la región. El área de estudio se ubica aproximadamente a la latitud 33°S en el extremo suroccidental de las Sierras Pampeanas de Córdoba, entre las últimas estribaciones de la sierra de Comechingones (localidad de Achiras) y la localidad de Sampacho (Fig. 1). En este sector se encuentra la falla Las Lagunas que posee importantes caracte-

rísticas morfológicas para su estudio y para lograr una mejor comprensión de la paleosismicidad de intraplaca en un contexto tectónico de subducción subhorizontal. Esta falla, se supone es la responsable del “Gran Terremoto de Sampacho” de M 6,0 (Mingorance 1991, Sagripanti 2006).

## CONCEPTOS DE PALEOSISMOLOGÍA Y ANTECEDENTES

En ambientes de intraplaca se considera que, contar sólo con el registro sísmico histórico e instrumental es insuficiente para comprender la sismicidad de una zona, ya que, los intervalos de recurrencia de terremotos moderados-fuertes exceden este período de registro. Es por ello que las investigaciones paleosismológicas se consideran como una potente herramienta para reconocer e interpretar las deformaciones producidas durante fuertes terremotos ( $M > 6,5$ ) que generan rupturas en superficie (Bonilla 1988, Mc Calpin 1996).

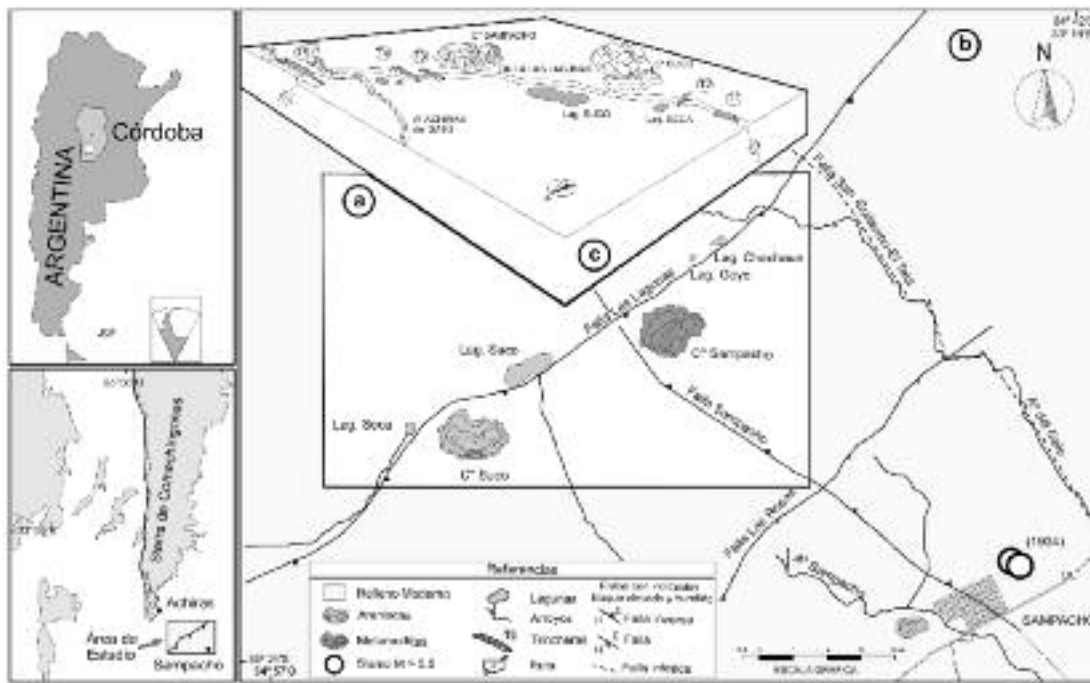
Las investigaciones paleosismológicas permiten extender hacia atrás en el tiempo, el límite de observación e interpretación y posibilitan reconstruir la sismicidad prehistórica de una región, aportando información sobre el número de paleoterremotos, paleomagnitudes, tasas de desplazamiento e intervalos de recurrencia de fuertes terremotos en regiones donde se dispone de escasa información sísmológica y las fallas no presentan evidencias claras de deformaciones recientes en superficie (Mc Calpin 1996, Yeats *et al.* 1997). Estos estudios se basan en la búsqueda de evidencias en el registro geológico, por medio de la excavación y descripción e interpretación de las deformaciones y trazas fósiles generadas por fuertes paleoterremotos, expuestas en los perfiles de las trincheras. El tamaño y distribución de las deformaciones depende de la energía liberada, la profundidad hipocentral, la duración del movimiento, el carácter de la falla y los materiales afectados (Machette 1989, De Polo y Slemmons 1990, Pantos-

ti y Yeats 1993, Meghraoui y Doumaz 1996, Crone *et al.* 1997, Audemard *et al.* 1999, Philip *et al.* 2001).

En las investigaciones neotectónicas y principalmente las paleosismológicas, se considera que “el pasado es la llave del futuro”, a diferencia de la mayoría de los estudios que se rigen por el adagio geológico del principio del “uniformismo”, que plantea que el “presente es la llave del pasado” (Yeats *et al.* 1997). Es significativo destacar entonces que en la actualidad los estudios neotectónicos y morfotectónicos, complementados con investigaciones paleosismológicas, guardan un gran interés ya que proveen información valiosa para la evaluación más precisa del peligro sísmico en regiones pobladas, bajo amenaza, donde se proyecten importantes obras de ingeniería. Esta práctica en la actualidad, a nivel mundial, se ha transformado en una herramienta fundamental en la toma de decisiones para la planificación y desarrollo de las actividades del hombre.

Uno de los parámetros fundamentales que describe la paleosismicidad de una falla y que es un componente crítico en la evaluación del peligro sísmico es el intervalo de recurrencia de fuertes paleoterremotos (Mc Calpin 1996). Si bien los intervalos de recurrencia de este tipo de eventos en la intraplaca son prolongados, del orden de cientos o miles de años, en algunos casos la ocurrencia de éstos tiende a agruparse temporalmente, indicando períodos de quietud y de alta actividad. Se considera a esta tendencia como un patrón de agrupamiento (*clustering*) temporal de terremotos (Crone *et al.* 2003).

Los antecedentes de investigaciones neotectónicas en fallas de intraplaca no son numerosos ya que, el mayor desarrollo de las mismas hasta el presente se concentra en zonas de borde de placa. Sin embargo, son las contribuciones de Wallace (1977), Bucknam y Anderson (1979), Crone *et al.* (1992), Machette *et al.* (1993) y Mc Calpin (1996), consideradas de interés, porque proveen importante información para el conocimiento y evaluación del peligro sísmico en regiones sísmicamente activas.



**Figura 1:** a) Mapa de ubicación del área de estudio; b) traza de la falla Las Lagunas, epicentro del Gran Terremoto de Sampacho del año 1934; c) block diagrama presentando la localización de las trincheras realizadas en el presente estudio, indicado por el recuadro en planta de la parte central (ver Fig. 2).

Las investigaciones que se han llevado a cabo en las Sierras Pampeanas de Córdoba y San Luis (Schlagintweit 1954, Kraemer *et al.* 1988, Massabié 1996, Massabié y Szlafsztein 1991, Costa y Vita Finzi 1996, Costa *et al.* 2000, 2001, Costa 2004), han permitido avanzar en el conocimiento neotectónico de la región. Entre los antecedentes de estudios sismológicos, neotectónicos y paleosismológicos desarrollados en el sector oriental de las sierras de Comechingones, se pueden citar las contribuciones de Olsacher (1935), Mingorance (1987, 1991), Sagripanti *et al.* (1998a, 1998b, 2001, 2005), Costa *et al.* (2001), Aguilera *et al.* (2002), Sagripanti (2006), Sagripanti y Villalba (2006), y Sagripanti *et al.* (2009), quienes han hecho un aporte importante al conocimiento de la neotectónica y el peligro sísmico en la región.

## MARCO GEOLÓGICO Y SISMICIDAD

Las principales unidades estratigráficas aflorantes en el área de estudio son el basamento cristalino del Precámbrico-Paleozoico inferior-medio y una cubierta sedimentaria de edad cenozoica.

El basamento cristalino está compuesto por metamorfitas (esquistos, gneises, anfíbolitas y migmatitas) intruidas por cuerpos graníticos y pegmatíticos. Como así también, está conformado por sedimentitas pérmicas formadas por areniscas cuarcíticas de grano fino a medio, compactas, que están expuestas en el cerro Suco y en las canteras de Sampacho, conocidas como “Areniscas Sampacho” y definidas como Formación Ranqueles por Hüniken *et al.* (1981).

Las sedimentitas cenozoicas compuestas por arenas, limos y arcillas, descritas y fechadas por Cantú (1992) y Cantú *et al.* (2006), se presentan a continuación:

1) La Formación Alpa Corral, se encuentra formada por arenas finas con gravas dispersas, gravas finas y gruesas intercaladas con arenas medias a gruesas con estructura en artesa. Su origen es fluvial y su edad está asignada al límite Plio-Pleistoceno.

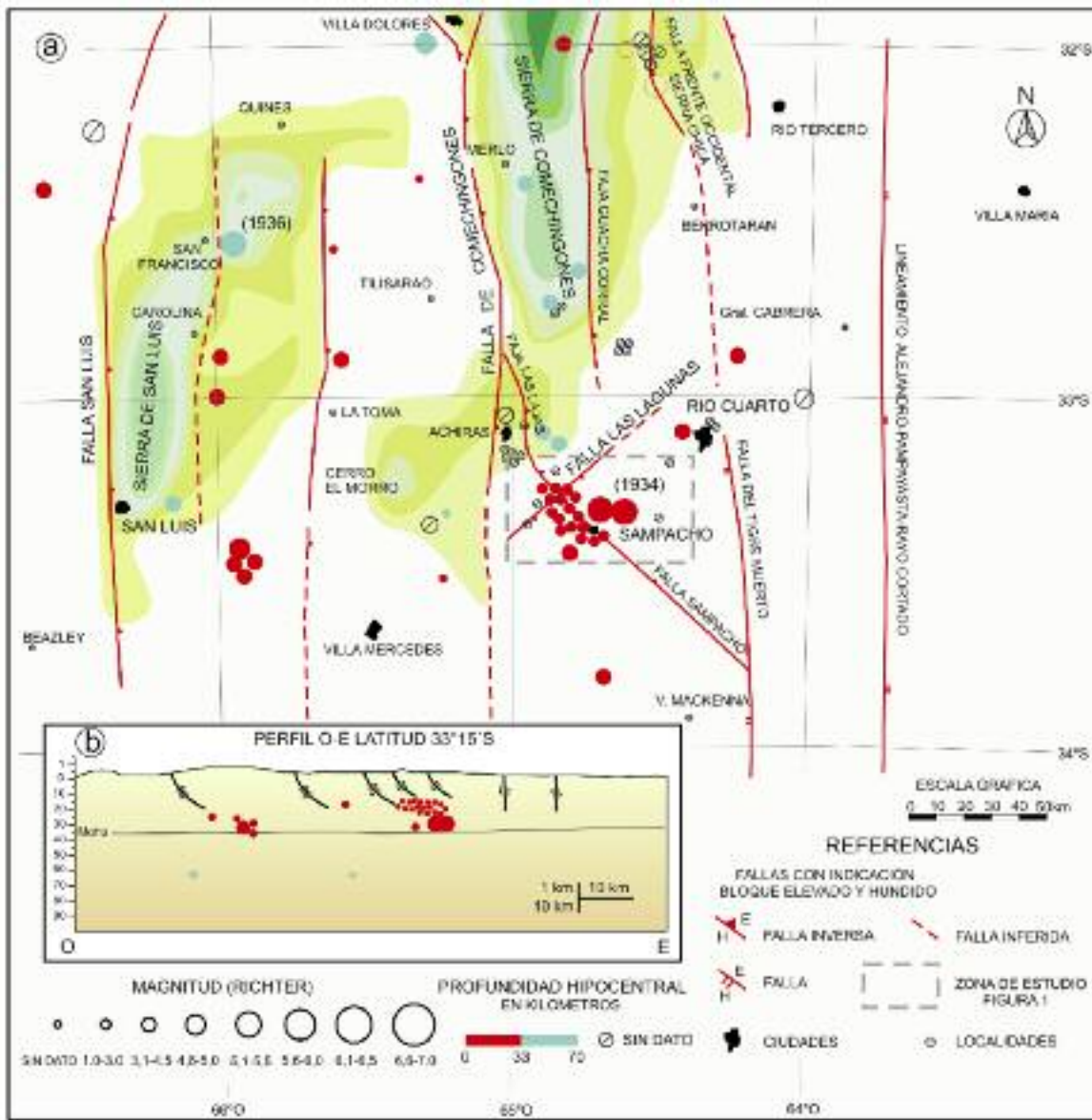
2) La Formación Pampeano está constituida por dos miembros; uno compuesto por sedimentos limosos eólicos (loess) de color pardo rojizo a pardo amarillento, de origen fluvial y palustre, el otro miembro, de origen eólico, está formado por materiales limosos y limo arenosos muy

finos, de color pardo rojizo. La edad asignada para estos sedimentos es pleistoceno medio a superior.

3) La Formación Chocancharava está constituida por las distintas facies de un importante ciclo fluvial de canal, de aguas tranquilas, de canal abandonado y de llanura de inundación o de lagunas con diatomeas. La edad asignada es pleistoceno superior.

4) La Formación Laguna Oscura está compuesta por sedimentos eólicos, arenosos muy finos a limosos. La edad determinada, luminiscencia por estimulación óptica, para esta formación es holocena entre 6.000-4.000 a AP (Cantú *et al.* 2006).

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 este, ubicadas marginalmente a bloques levantados y basculados del basamento cristalino durante la orogenia andina. Estas estructuras parecen ser reactivaciones de fracturas preexistentes y en la mayoría de los casos están controlados por anisotropías de la estructura interna del basamento. Estas deformaciones se encuentran asociadas a

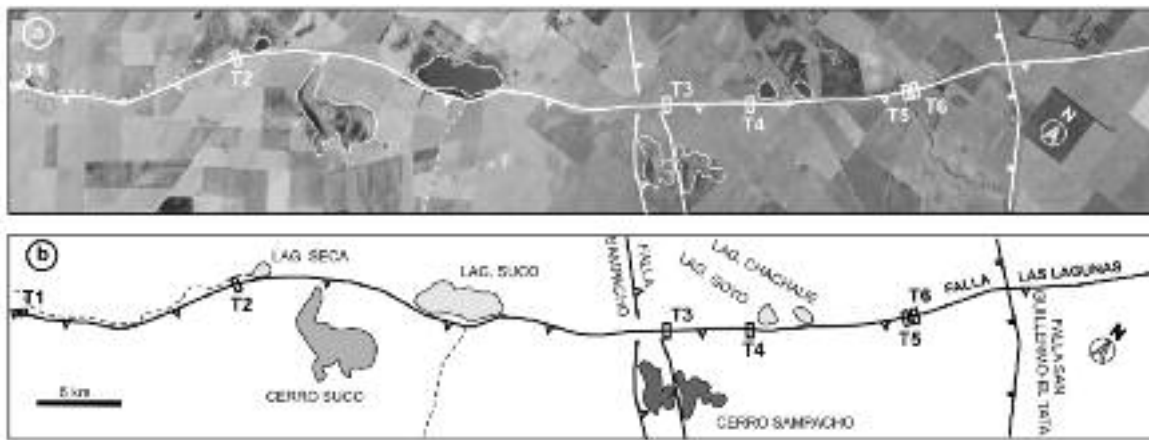


las zonas pedemontanas de las sierras de San Luis, Comechingones y Chica de Córdoba, que se manifiestan como corrimientos del basamento cristalino afectando también a los sedimentos cuaternarios (Costa 1999). La estructura del sector suroriental de las últimas estribaciones de la sierra de Comechingones, donde se encuentra el área de estudio, presenta las características definidas para las Sierras Pampeanas de Córdoba. Se caracteriza por presentar bloques diferencialmente ascendidos o descendidos y basculados, limitados por fallas cuya orientación preferencial es meridional. La disposición de éstos genera una morfología

escalonada y ondulada cuya expresión disminuye hacia el SE. Las estructuras normalmente ejercen un importante control sobre el escurrimiento subterráneo y superficial en sus nacientes, cuenca media y baja (Sagripanti 2006). Las estructuras generadas por deformación frágil presentes son lineamientos y fallas con orientación preferencial N, NO y NE (Fig. 2) algunas de éstas expresan el carácter de las Sierras Pampeanas de Córdoba. Se consideran antiguas dislocaciones que han sido reactivadas por la tectónica cenozoica, afectando tanto al basamento cristalino como a los sedimentos cenozoicos, transformándolas en fallas in-

versas de alto ángulo con plano buzante al Este, con importantes escarpas enfrentadas al oeste (Sagripanti 2006). Entre las fallas presentes algunas muestran evidencias de actividad neotectónica, como la falla Las Lagunas (Fig. 1) que posee una importante expresión superficial y actividad cuaternaria manifiesta. Es inversa de plano buzante al SE, rumbo NE y la longitud de su traza alcanza al menos 24 km (Sagripanti 2006). La expresión morfológica superficial de esta estructura es una escarpa rectilínea, desarrollada en sedimentos loésicos (Formación Laguna Oscura) orientada enfrentando al noroeste, cuya altura alcanza 8 m

**Figura 2:** a) Mapa con la ubicación de la zona de estudio (presentada en la Fig. 1), de las principales fallas de la región centro-sur de Córdoba y centro-norte de San Luis y de la distribución de sismos corticales, históricos, con epicentros en la región (datos sísmológicos históricos, instrumentales de los catálogos del INPRES y de parámetros macrosísmicos del departamento Río Cuarto de Sagripanti (2006)). Los tonos de grises usados dentro de los círculos indican la profundidad hipocentral y el número adyacente al epicentro indica el año de ocurrencia; b) perfil oeste-este a la latitud 33°15' S.



**Figura 3:** a) Sección de foto aérea escala 1:60.000; b) sketch correspondiente, con la ubicación de la traza de las fallas Las Lagunas, Sampacho y San Guillermo-El Tata y de las trincheras excavadas en la presente investigación, denominadas T1, T2, T3, T4, T5 y T6.

en algunas de sus secciones. Asociadas a ésta se reconocen escarpas pequeñas, de hasta 30 cm de altura, que se preservan a pesar de la erosión y de la importante intervención antrópica a la que están sometidas. Esta estructura ejerce un importante control al escurrimiento superficial y al flujo del agua subterránea en el sector, favoreciendo el emplazamiento de lagunas alineadas (Fig. 3) como las denominadas Suco, Seca, Durnbull, Goyo y Chachaué (Sagripanti 2006).

El área de las Sierras de Córdoba y San Luis se encuentra en una región en la cual los intervalos de recurrencia de sismos fuertes superan los registros de la sismicidad histórica. En esta área no se ha constatado, a excepción del Gran Terremoto de Sampacho (Córdoba) de M 6,0 (1934), que los eventos de mayor magnitud como el de Deán Funes (Córdoba) de M 6,5 (1908), San Francisco del Monte de Oro (San Luis) de M 6,0 (1936), Villa Giardino (Córdoba) de M 5,6 (1947) y Cruz del Eje (Córdoba) de M 6,7 (1955), hayan generado rupturas cosísmicas superficiales.

La sismicidad en la zona de estudio es moderada-leve y superficial, concentrada entre las localidades de Achiras y Sampacho (Fig. 2). Un inventario de testimonios, parámetros macrosísmicos y registros sísmicos indica que entre los años 1826 y 2009 son más de 150 los sismos y microsismos ocurridos. Si bien la magnitud de la mayoría de los microsismos es  $M \leq 3,0$  se han registrado al menos seis sismos de  $M \geq 4,0$ .

Esta región fue epicentro de una crisis sísmica registrada en la intraplaca de Argentina, en el mes de Junio de 1934, con la ocurrencia del “Gran Terremoto de Sampacho” considerado de los más fuertes registrados dentro de la Zona 1, de Peligrosidad Reducida de Argentina. La zonificación fue definida por el Instituto Nacional de Prevención Sísmica, INPRES (Castano 1977). Esta crisis comprendió una serie de sismos premonitores los días previos y dos terremotos destructores superficiales de M 5,5 el primero y M 6,0 el principal, espaciados por un intervalo de tres horas y más de cien replicas en las 24 horas siguientes (Sagripanti *et al.* 2001). Como resultado de la acción de éstos, la localidad de Sampacho quedó destruida en un 90%, por lo tanto se estima que la intensidad fue entre VIII y IX grados en la escala Mercalli Modificada (MM). Estos eventos fueron percibidos en localidades distantes ubicadas en las provincias de Córdoba, La Pampa, Santa Fe y San Luis (Olsacher 1935).

## ANÁLISIS PALEOSISMOLÓGICO

Los resultados obtenidos en un análisis neotectónico preliminar realizado en el área de estudio indican claramente que, entre las estructuras reconocidas con posible actividad cuaternaria, la falla Las Lagunas es la que ofrece condiciones morfológicas, litológicas y estructurales sobresalientes para ser abordada por un estudio, más detallado, tendiente a caracte-

rizar y reconstruir la sismicidad prehistórica del área.

La metodología aplicada para la selección de sitios donde se desarrollaron los estudios paleosismológicos comprendió criterios sismológicos, estratigráficos, geomorfológicos y geológicos como los propuestos por Philip y Meghraoui (1983), Mc Calpin (1996), Pantosti (1997) y Costa (2004). Los más importantes se resumen a continuación:

- Identificación y caracterización de la fuente sismogénica, sobre la base de estudios neotectónicos, sismológicos, geomorfológicos y geológicos.
- Búsqueda de zonas potenciales para la apertura de trincheras: interpretación de cartas geológicas, imágenes satelitales, fotos aéreas verticales y oblicuas (estas últimas tomadas a baja altura y con bajo ángulo de incidencia solar) y búsqueda en proximidades de fallas con evidencias morfológicas superficiales recientes como escarpas y escarpas pequeñas.
- Elección de sitios para la apertura de trincheras donde el registro sedimentario se encuentre lo más completo posible, preservación en techo y piso de la falla del mismo horizonte estratigráfico, existencia de horizontes guías y materiales aptos para dataciones, y que el sitio no haya tenido intervención antrópica.
- Los sitios elegidos deben ser abordados con un estudio geológico-geomorfológico de detalle y con estudios geofísicos del subsuelo.
- *Logging* de trincheras: relevamiento detallado de los distintos niveles estratigrá-

ficos presentes y de las estructuras de deformación identificadas y determinación de su origen tectónico o sedimentario, cuantificación de los desplazamientos relevados, identificación de horizontes de eventos y fechado de los materiales afectados por la deformación o ruptura.

- Interpretación de la información relevada: establecer si las estructuras son cosísmicas, identificación de cuñas coluviales, reconstrucción de la cronología de eventos, realización de un inventario de sismitas y de evidencias de licuefacción.

- Caracterización y estimación de parámetros físicos de la fuente sobre la base de las deformaciones y desplazamientos relevados.

Los resultados obtenidos permitieron seleccionar seis sitios potenciales para la apertura de trincheras (Fig. 3). Estos ofrecen las mejores posibilidades debido a la expresión morfológica de la falla Las Lagunas y a la presencia de sedimentos de origen eólico, fluvial y lagunar, especialmente estos últimos ofrecen buenas posibilidades para fechar eventos y son propensos a desarrollar estructuras deformacionales generadas por la agitación sísmica. El relevamiento de las paredes de las trincheras se llevó a cabo instalando una grilla formada por celdas de 1,0 x 0,5 m, luego se realizó el foto-logging de cada celda sobre el cual se dibujó el *sketch* de las estructuras y los contactos entre unidades litológicas.

### Trinchera 1 (T1)

La trinchera T1 se ubica en la Estancia Laguna Seca y fue excavada, en un perfil natural, aproximadamente transversal a la escarpa principal. Tiene una orientación azimutal de 160°-170° N (Fig. 3) y su longitud es de 40 m por aproximadamente 2,5 m de profundidad y un ancho variable de alrededor de 1,5 m (Fig. 4).

*Descripción del perfil litológico:* La descripción del perfil, de base a techo, de la secuencia de sedimentos expuesta en la trinchera denominada T1 está compuesta por: Unidad UA: Sedimentos loessoides, compuestos por arenas muy finas limosas, color pardo claro, de origen eólico, equiva-

lentes a la Formación Laguna Oscura (6.000 - 4.000 a AP).

Unidad UA1: Arenas muy finas limosas, color pardo rojizo claro, de origen eólico, más compactadas y cementadas, por carbonatos, que la UA.

Unidad UB: Depósito de sedimentos mal seleccionados debido al flujo denso, principalmente gravitatorio. Se caracteriza por presentar matriz sostén (arenas finas y limos) e intraclastos de UA y UA1 con bordes angulosos, deslizados y rotados. Se considera a este depósito una cuña aluvial-coluvial.

Unidad UC: Arcillas de origen lagunar con arenas finas y materia orgánica.

Unidad UD: Arenas finas, color pardo oscuro, de origen fluvial.

Unidad UE: Limo arenoso fino, color gris claro y origen eólico.

Unidad UF: Limo arenoso muy fino, corresponde al relleno moderno.

*Estructuras deformacionales de escala mesoscópica:* El predominio de sedimentos finos no consolidados ha dificultado la identificación de evidencias de deformaciones, como así también la interpretación de su origen, suponiéndose que el sector entre el m 3-8 podría ser la zona de mayor deformación.

En el sector comprendido entre el m 0-7, se determinó que la cota del techo de la unidad UA es 1 m mayor que en el resto del perfil (Fig. 4). Además, los niveles lagunares en algunos sectores a lo largo del perfil se encuentran curvados o flexurados.

*Interpretación:* En la base del perfil se reconoció un nivel de material limo arenoso fino (unidad UA) sobre el cual, entre el m 8-12, se desarrolló un ambiente palustre-lagunar (unidad UC) y una cuña aluvial-coluvial (unidad UB).

La zona de mayor deformación se interpreta que está entre el m 3-8, asociada a la probable propagación de un plano secundario de falla, de difícil identificación en este tipo de sedimentos no consolidados. Esto se plantea sobre la base de la diferencia de cota identificada en el techo de la unidad UA, como así también debido a la presencia de una cuña aluvial-co-

luvial (UB) entre el m 9-12.

Asumiendo que la edad de la unidad UA es entre 6.000 y 4.000 a AP y que la del primer nivel lagunar, UC (correlacionando con dataciones hechas, en sedimentos similares, en la trinchera T6), podría ser de 3.770 a AP, se supone la ocurrencia de un movimiento en el rango 4.000-3.770 a AP. Este habría dislocado el material eólico de la unidad UA, produciendo el endicamiento y la formación de lagunas que generaron los depósitos de la unidad UC.

### Trinchera 2 (T2)

La trinchera T2 se ubica en la Estancia Don Pedro y fue excavada transversal a la escarpa principal desarrollada en sedimentos loessoides. Presenta en su base dos escarpas pequeñas paralelas a la morfología principal cuyas alturas son entre 0,10-0,15 m y son de aproximadamente 60-70 m de longitud. La orientación azimutal de la excavación es entre 115°-120° N (Fig. 3) y sus dimensiones son 3 m de largo, 1 m de ancho y 1,5 m de profundidad (Fig. 5).

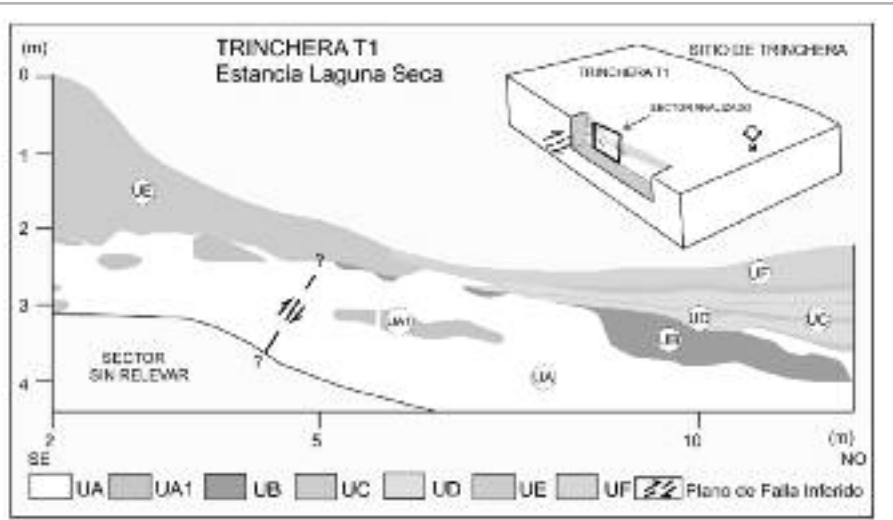
El sitio elegido para la apertura de esta trinchera, de exploración, corresponde al sector donde Mingorance (1991) indicó la presencia de supuestas deformaciones cosísmicas generadas durante la crisis sísmica del año 1934. Para este autor, “el evento generó desplazamientos superficiales en el área epicentral, evidenciados por una nueva escarpa que posee una altura de 0,25 m, con la cara libre enfrentado el oeste de forma discontinua y alineada con la escarpa principal”.

*Descripción del perfil litológico:* La descripción del perfil, de base a techo, de la secuencia de sedimentos expuesta en la trinchera T2 está compuesta por:

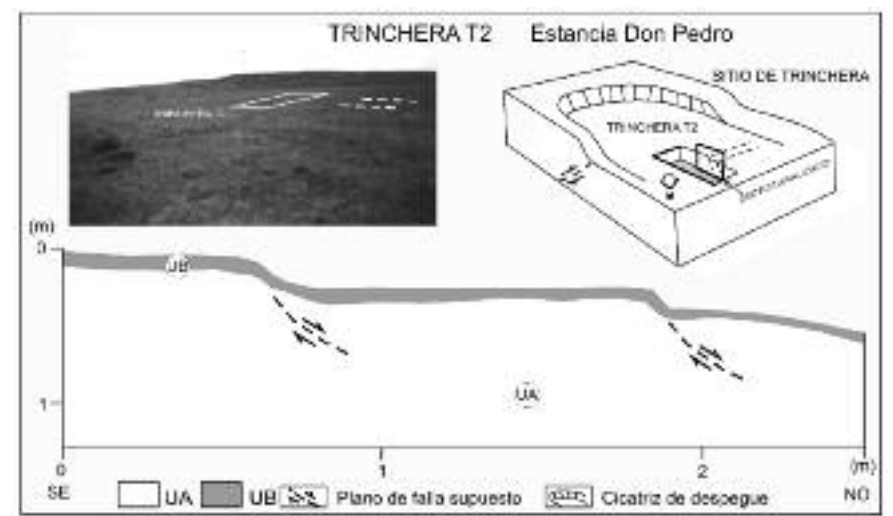
Unidad UA: Arenas muy finas limosas, loessoides, color pardo claro de origen eólico, equivalentes a la Formación Laguna Oscura (6.000-4.000 a AP).

Unidad UB: Limo arenoso muy fino, corresponde al relleno moderno.

*Estructuras deformacionales de escala mesoscópica:* Los sedimentos no consolidados (*loessoides*) presentes en la excavación, dificultan el reconocimiento de estructu-



**Figura 4:** Perfil litológico de la trinchera 1, estancia Laguna Seca y block diagrama indicando el sector analizado con mayor detalle para interpretar paleoeventos.



**Figura 5:** Perfil litológico de la trinchera 2 estancia Don Pedro, block diagrama indicando el sector analizado con mayor detalle y foto tomada de oeste a este del sector de la escarpa principal afectado por el deslizamiento de ladera donde se realizó la trinchera de exploración. Las líneas de trazo indican las morfologías superficiales.

ras deformacionales. Los únicos rasgos reconocidos son morfologías superficiales como la escarpa de la falla principal inversa (block diagrama Fig. 5) y escarpas pequeñas (Fig. 5).

*Interpretación:* El sector donde se ubica la trinchera T2 presenta una escarpa cuya altura aproximada es de 4 m y posee una importante pendiente. Está formada por materiales sedimentarios sueltos y es generada por la falla principal.

Las escarpas pequeñas identificadas en la base de la escarpa principal poseen características morfológicas similares a las

identificadas en otras secciones de la falla, como expresión rectilínea en superficie paralela a la falla principal, altura y ángulo del talud. La presencia de estas morfologías y su posición en el perfil hacen suponer que podrían ser evidencias secundarias que corresponderían a fracturamientos generados por algún evento sísmico histórico fuerte y no a la propagación de planos secundarios de la falla principal.

Este supuesto es sobre la base de que a unos 70 m hacia arriba de la escarpa principal se identificó una cicatriz de despe-

gue (Fig. 5) de un deslizamiento de ladera local. En este sitio el agua subterránea aflora de manera permanente por lo tanto en estas condiciones el medio puede haber sido afectado por agitaciones sísmicas. Esta acción, probablemente haya sido el disparador de un deslizamiento de ladera que generó las fallas de escala mesoscópica, supuestas de movimiento normal, sintéticas al plano de despegue (Fig. 5). Estas estructuras generaron los desniveles topográficos relevados en el perfil de la trinchera, que no superan los 0,15 m de altura.

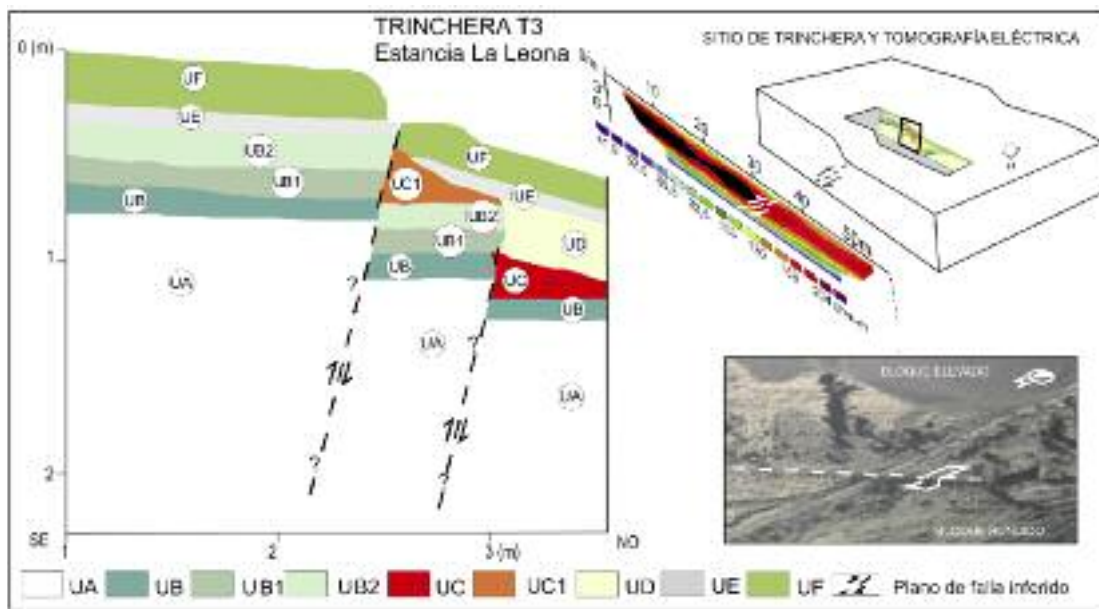
Por lo tanto, si bien estas morfologías superficiales relevadas podrían haber sido producidas por una agitación del terreno durante los eventos sísmicos del año 1934, con epicentro en la falla Las Lagunas, se interpreta que éstas no corresponderían a rupturas generadas por la propagación del plano de falla principal tal como lo sugerido por Mingorance (1991), sino producidas por un deslizamiento de ladera local.

### Trinchera 3 (T3)

La trinchera T3 se ubica en la Estancia La Leona y fue excavada transversal a la escarpa principal de la falla Las Lagunas, que contiene en esta sección una escarpa pequeña bien preservada, desarrollada en materiales loésicos. Esta morfología superficial es paralela al rumbo de la estructura principal generando un desnivel de 0,3 m de altura a lo largo de más de 300 m de longitud. La orientación de la excavación es  $130^{\circ}\text{N}$  (Fig. 3) y sus dimensiones de 10 m de largo, 1,5 m de ancho y 2,5 m de profundidad (Fig. 6). En el análisis del perfil de la trinchera solo se consideró el sector entre el m 1-3 por ser el más representativo.

*Descripción del perfil litológico:* La descripción del perfil, de base a techo, de la secuencia de sedimentos expuesta en la trinchera denominada T3 está compuesta por:

Unidad UA: Arenas muy finas limosas, loessoide, color pardo claro, de origen eólico. Equivalentes a la Formación Laguna Oscura (6.000 - 4.000 a AP).



**Figura 6:** Perfil litológico de la trinchera 3, estancia La Leona y block diagrama indicando la ubicación de la tomografía eléctrica y el sector analizado con mayor detalle para interpretar paleoeventos. Foto aérea oblicua tomada con bajo ángulo de incidencia solar, donde se indica una pequeña escarpa de la falla y la ubicación del sitio donde se excavó la trinchera.

Unidad UB: Limo arenoso muy fino con arcillas, color pardo oscuro, de origen lagunar que presenta laminación convoluta.

Unidad UB1: Limo arenoso muy fino de color pardo claro, de origen palustre-lagunar.

Unidad UB2: Limos y arcillas de origen palustre-lagunar, de color pardo claro, con laminación convoluta.

Unidad UC: Depósito coluvial de sedimentos mal seleccionados, principalmente gravitatorio, generado por flujo denso (no unidireccional). Presenta una matriz sostén (arenas finas) e intraclastos angulosos de la UA, deslizados y rotados con sus ejes longitudinales subverticales.

Unidad UC1: Depósito coluvial de sedimentos mal seleccionados, generado por flujo denso (no unidireccional) principalmente gravitatorio. Presenta una matriz sostén (arenas finas) e intraclastos con bordes angulosos de las UB1 y UB2, deslizados y rotados con sus ejes longitudinales subverticales.

Unidad UD: Depósito aluvial-coluvial de sedimentos mal seleccionados, generado por flujo denso (no unidireccional), formado por arenas finas y muy finas, limosas, e intraclastos.

Unidad UE: Arena fina y limo arenoso fino con laminaciones finas de materiales arcillosos, de origen aluvial-fluvial.

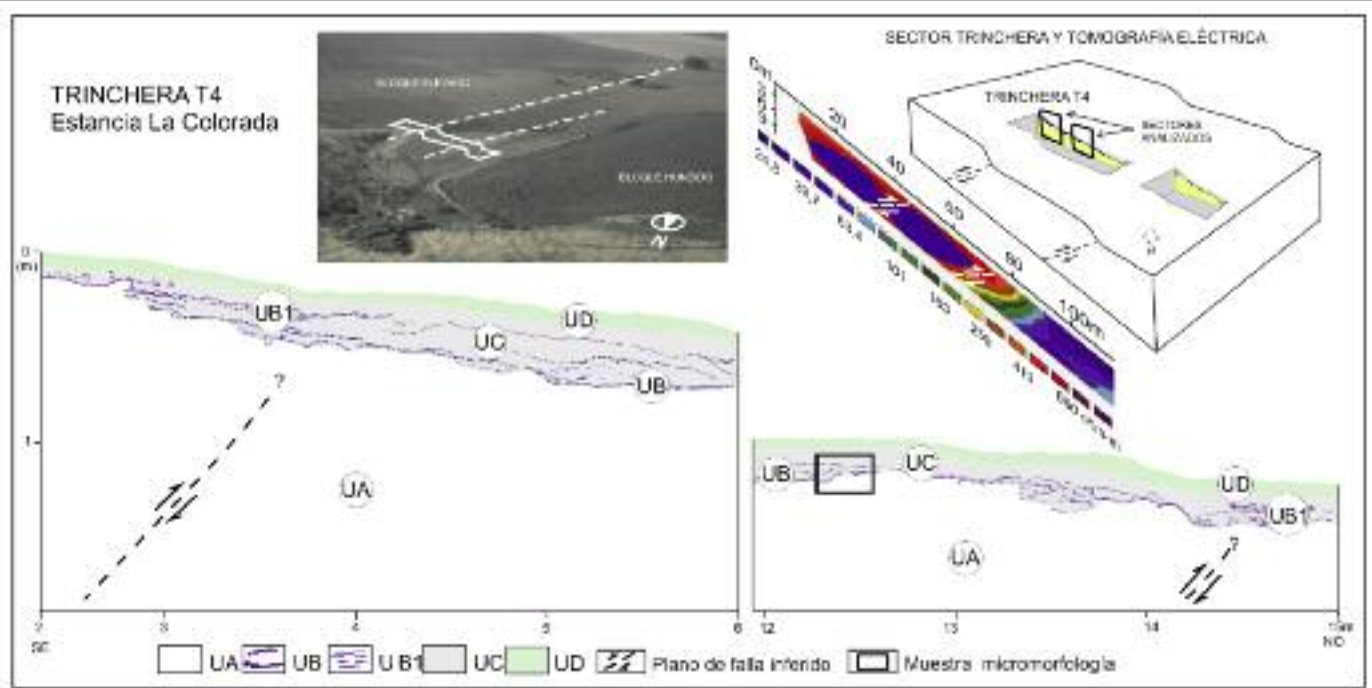
Unidad UF: Limo arenoso muy fino, arcilloso, corresponde al relleno moderno.

*Estructuras deformacionales de escala mesoscópica:* En el perfil, m 2-3, se identificaron dos planos de falla secundarios de alto ángulo, paralelos a la traza de la falla principal que inclinan hacia el bloque levantado y generan una discontinuidad en las distintas unidades sedimentarias. Uno de estos planos de falla forma una escarpa pequeña que podría ser una ruptura superficial cosísmica histórica cuyo desplazamiento vertical podría haber sido al menos de 0,15 m de altura, expresado en la morfología generada por el desnivel del relleno moderno (unidad UF). Asociado a estas discontinuidades se reconocen dos depósitos coluviales, las unidades UC y UC1 (Fig. 6). A partir de la interpretación de la información geofísica, aportada por tomografías eléctricas del subsuelo, se detectó la presencia de un tercer plano que está ubicado en el bloque elevado a unos 60 m de la trinchera. En la unidad UB, entre el m 1-2, se identificó laminación convoluta intercalada en un material arenoso fino de color pardo claro. Estas estructuras de deformación post-deposicionales ponen en evidencia la licuefacción de los materiales que debieron estar saturados y sometidos a una agitación o carga externa

*Interpretación:* La interpretación de la in-

formación obtenida en la descripción del perfil de la trinchera ha permitido estimar que pueden haber tenido ocurrencia varios eventos sísmicos hipotéticos. El primer evento probablemente afectó los materiales de la Formación Laguna Oscura, generando una proto-escarpa ubicada a unos 60 m al SE de la trinchera T3. Este desnivel habría generado una barrera al escurrimiento superficial, favoreciendo el endicamiento y emplazamiento de una laguna cuyos sedimentos forman la unidad UB. Esta unidad podría considerarse como un horizonte de evento (he1). Sobre la base de la edad de los sedimentos afectados se estima que este evento habría tenido ocurrencia alrededor de 4.000 a AP. El segundo evento interpretado generó un plano de falla secundario en el m 3 que desplazó verticalmente a la unidad UB aproximadamente entre 0,15 y 0,20 m. Correlacionando las columnas estratigráficas de los perfiles relevados en las trincheras T3 y T6, considerando su proximidad tiempo-espacial y suponiendo que los materiales lagunares deformados (unidad UB) se corresponden con los de la unidad UF, identificada y fechada en la T6 (2.820 a AP, C14), se puede proponer que el segundo evento debe haber tenido ocurrencia con posterioridad a los 2.820 a AP. Posteriormente, sobreviene un período de erosión-depositación en el que la peque-





**Figura 7:** Perfil litológico de la trinchera 4, estancia La Colorada y block diagrama indicando la ubicación de la tomografía eléctrica y los sectores analizados con mayor detalle para interpretar paleoeventos. Foto aérea oblicua tomada con bajo ángulo de incidencia solar, donde se indican con líneas de trazo pequeñas escarpas de la falla y la ubicación del sitio donde se excavó la trinchera.

ña escarpa generada se erosiona, formando un depósito coluvial (unidad UC) y el desnivel topográfico favorece el emplazamiento de una laguna cuyos sedimentos forman las unidades UB1 y UB2. Se podría considerar a la unidad UB1 como un nuevo horizonte de evento (he2).

El tercer evento hipotético interpretado afectó a los niveles lagunares, principalmente en el m 2, donde se puede reconstruir un desplazamiento vertical de al menos 0,15 m. Durante un período de erosión-depositación posterior se erosionó el desnivel topográfico formado, generando un depósito coluvial (unidad UC1) y la depositación de la unidad UD. Se considera a esta última como un horizonte de evento (he3).

Analizando, por la proximidad tempo-espacial, el perfil estratigráfico de la trinchera T3 con la T6 se considera que las unidades UB1 y UB2 se corresponderían con la unidad UF1, identificada y fechada en la T6 (1.780 a AP, C14). Por lo tanto, el tercer evento podría haber ocurrido con posterioridad a los 1.780 a AP. Posteriormente se desarrolla un suelo incipiente. Finalmente, se interpreta otro evento que

probablemente reactivó el plano de ruptura secundario reconocido en el m 2 y desplazó verticalmente el nivel edafizado unos 0,15m. De acuerdo a la morfología de la escarpa pequeña se supone que esta ruptura en superficie podría ser histórica, probablemente asociada al “Gran Terremoto de Sampacho” del año 1934.

#### Trinchera 4 (T4)

La trinchera T4 se ubica en la Estancia La Colorada. Se escogió este sector de la falla por los rasgos morfológicos sobresalientes y los resultados obtenidos por medio de las exploraciones geofísicas (tomografías eléctricas). El desnivel topográfico entre el bloque elevado y el hundido alcanza una altura de aproximadamente 8 m y contiene dos escarpas pequeñas bien preservadas, formadas en materiales loesoides. Estas morfologías tienen una altura de aproximadamente 0,5 m, son rectilíneas y paralelas a la estructura principal. La excavación de 32 m de largo, 4 m de ancho y 3 m de profundidad (Fig. 7) se realizó con una orientación azimutal de 120° N (Fig. 3), transversal a la escarpa principal y a las escarpas pequeñas. En el

análisis del perfil de la trinchera solamente se han considerado los sectores entre el m 2-6 y m 12-15 por ser los más representativos.

*Descripción del perfil litológico:* La descripción del perfil, de base a techo, de la secuencia de sedimentos expuesta en la trinchera denominada T4 está compuesta por: Unidad UA: Sedimentos loesoides compuestos por arenas muy finas, limosas, color pardo claro, de origen eólico. Equivalentes a la Formación Laguna Oscura (6.000-4.000 a AP).

Unidad UB: Arcillas que forman un nivel cuya potencia varía entre 0,01-0,02 m con límites netos y continuidad lateral. Su arquitectura corresponde a láminas subhorizontales que se consideran lamelas texturales, originadas por lixiviación de materiales muy finos y re-depositadas en la base del nivel superior edafizado.

Una “lamela” (lámina-laminilla) es en condiciones normales de formación un nivel de actitud horizontal-subhorizontal ondulado de hasta 0,075 m de espesor. Contiene una acumulación orientada de arcillas sobre o alrededor de sedimentos más gruesos como arena o limo (Soil Survey

Staff 2006).

Unidad UB1: Arcillas que forman láminas cuya potencia varía entre 0,005-0,01 m, con límites netos y continuidad lateral. Su arquitectura corresponde a láminas subhorizontales que se consideran lamelas texturales.

Unidad UC: Arenas finas limosas con pequeños intraclastos de la UB, sin transporte aparente y afectadas por licuefacción.

Unidad UD: Limo arenoso fino que corresponde a la cubierta moderna.

*Estructuras deformacionales de escala mesoscópica:* Si bien este sector ofreció condiciones morfológicas inmejorables e importantes variaciones de resistividad de los materiales del subsuelo, los materiales excavados principalmente *loessoides* (Formación Laguna Oscura) debido a sus características no presentaron muchas evidencias de deformaciones, sólo desplazamientos verticales. Por ello, la búsqueda e identificación de deformaciones se orientó principalmente en las modificaciones de la superficie topográfica y en las lamelas texturales, a escala mesoscópica y microscópica.

Las lamelas texturales que forman la unidad UB poseen una posición bastante irregular dentro del perfil a lo largo de toda la trinchera. En algunos sectores, como entre el m 12-15, se las identificó flexuradas y microplegadas (Fig. 7), en otros, poseen una actitud subvertical que no es propia de su formación.

Debido a la posición de la unidad UB dentro del perfil, sobre un material potencialmente licuable, se considera que las deformaciones que presentan las lamelas (pliegues y micropliegues) son laminaciones en convoluta. Este tipo de estructura generalmente es de origen cosísmico. Asimismo, las lamelas de mayor potencia si bien se encuentran deformadas, no presentan discontinuidad física.

Se realizó un análisis micromorfológico de un corte delgado de lamelas obtenido a partir de una muestra, orientada, extraída aproximadamente en el m 12 de la trinchera (Fig. 7). En el análisis microscópico se destacó el predominio de las micro-

estructuras de granos compactos y vacíos, como cámaras, canales y cavidades, y lamelas deformadas. Las estructuras reconocidas se representan con una línea de trazos en un *sketch* (Fig. 8).

A partir del análisis en la actitud de la unidad UB, se encontró que hay sectores donde la posición subhorizontal de las lamelas se modifica adoptando una inclinación hacia el bloque hundido. Por ejemplo, entre el m 13-14 las lamelas en una posición subhorizontal adquieren una inclinación entre 10° y 12°, presentando una diferencia de cota de 0,30 m (Fig. 7).

*Interpretación:* Las evidencias morfológicas rectilíneas paralelas como escarpas pequeñas, que afectan a los sedimentos finos no consolidados, en su mayoría loessoides, están bien preservadas aún en sectores con importante intervención antrópica. Esto hace suponer que la tasa de desplazamiento podría superar a la de erosión.

Considerando que las lamelas que se encuentran flexuradas y plegadas (a escala mesoscópica y microscópica) no han sido incididas o afectadas de forma importante por la actividad de microorganismos o raíces, debido a que no presentan discontinuidad física, se interpretó que las mismas han sido sometidas a deformaciones con posterioridad a su formación, posiblemente de origen cosísmico.

La información que aportaron las investigaciones geofísicas por medio de tomografías eléctricas y las evidencias recolectadas de las lamelas (diferencias de cota, flexuras y pliegues) coincidentes con las modificaciones en la topografía, han permitido delimitar sectores de mayor deformación en el perfil que podrían haber sido generados por la eventual propagación de planos secundarios de falla a la superficie (Fig. 7), probablemente asociados a la ocurrencia de varios eventos sísmicos.

Un primer evento hipotético afectó a los sedimentos de la Formación Laguna Oscura (unidad UA) con un desplazamiento vertical aproximado de 0,3 m. Esto se verifica entre el m 2-6 (Fig. 7), donde se supone la presencia de un plano de falla se-

cundario con inclinación hacia el bloque elevado. La edad estimada para este paleoevento es de aproximadamente 4.000 a AP.

Posteriormente, sobreviene un período de erosión que degrada la escarpa, generada en materiales loessoides, la depositación de las unidades UC y UD y la formación de las unidades UB y UB1.

Un segundo evento afectó tanto a la unidad UA como a las UB, UC y UD. Probablemente este evento sísmico se resolvió con una reactivación del plano de falla inferido entre el m 2-6 y la generación de un plano de falla secundario entre el m 12-15, acompañado con un desplazamiento vertical aproximado de 0,30 m en ambos sitios.

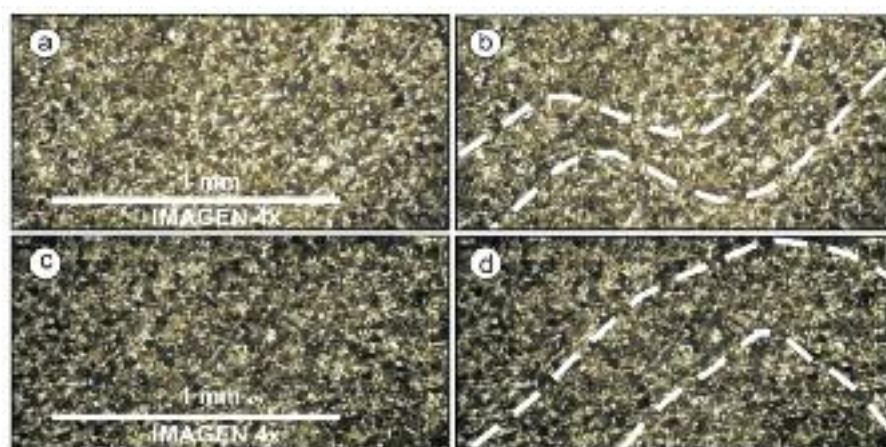
El *shaking* del evento quedó registrado en las deformaciones que presentan las lamelas texturales, pliegues y micropliegues que presentan vergencia hacia el bloque hundido, la licuación de la unidad UC y ruptura en superficie de la unidad UD. Esto permite suponer que la ocurrencia del segundo evento es probablemente histórica.

### Trincheras 5 y 6 (T5-T6)

Las trincheras T5 y T6 fueron excavadas en la Estancia Vieja (Fig. 3). Se denominan Vado Arroyo del Gato (T5) cuyas dimensiones son 9 m de largo, 2 m de ancho y 4 m de profundidad y Estancia Vieja (T6) de 38 m de largo, 3 m de ancho y 1,5 m de profundidad (Fig. 9). Estas se ubican transversales a la traza de la falla Las Lagunas con una orientación aproximada de 120° N.

La proximidad espacial entre ambas y el hecho que la unidad litológica cuspidal de la T5 es la misma que la unidad basal de la T6 permitieron realizar la superposición de los perfiles de las dos trincheras, aumentando así la superficie analizada. La interpretación se realizó en forma conjunta con el fin de favorecer el análisis retrospectivo de los eventos de fallamiento que se identificaron en cada trinchera, análisis por retrodeformación.

En el presente análisis sólo se consideraron 12 m (m 18-30) de la longitud total



**Figura 8:** Imágenes fotográficas de las lamelas texturales microplegadas obtenidas a partir del análisis micromorfológico de un corte delgado realizado en una muestra orientada, extraída entre el m 12-13 de la trinchera. Las imágenes A y C son las fotos originales y las B y D corresponden al sketch respectivo donde se ha resaltado a las lamelas plegadas.

de la T6, correspondientes al perfil de la pared norte, debido a que es el sector correlacionable con el perfil de la pared norte de la T5 y donde hay mayor concentración de evidencias de estructuras deformacionales (Fig. 9). La T6 está ubicada a una cota superior de la T5 de aproximadamente 2,15 m y a unos 60 m al noreste de la misma, considerados a lo largo de la traza de la falla.

En las dos trincheras se ha constatado la presencia del basamento cristalino (unidad UA) en forma directa e indirecta. En la T5, en el sector que corresponde al bloque elevado (m 1-6) se destapó el techo del basamento cristalino, mientras que, en el sector del bloque hundido, a partir de sondeos mecánicos y geofísicos, se estima que la profundidad de la roca es mayor a 4,0 m. En la trinchera T6 se constató por medio de sondeos mecánicos y exploración geofísica, mediante la ejecución de sondeos eléctricos verticales (SEV) y tomografías eléctricas, la posición del basamento en el bloque elevado a la profundidad de 4,40 m entre el m 0-12. En el sector que corresponde al bloque hundido (m 12-38) se determinó que la profundidad del techo del basamento es superior a 20 m.

*Descripción del perfil litológico de las trincheras T5 y T6:* La descripción del perfil, de base a techo, de la secuencia de sedimentos expuesta en las trincheras denominadas

T5 y T6 está compuesta por:

Unidad UA: Basamento ígneo-metamórfico, que en algunos sectores presenta evidencias de cizallamiento (litoclastos angulosos y harina *gouge* de falla).

Unidad UB: Arenas finas de color pardo con una potencia que supera los 3,0 m. Equivalentes a la Formación Alpa Corral (Plioceno-Pleistoceno inferior).

Unidad UC: Limos arenosos muy finos de color pardo claro con carbonatos, calcretos. Equivalentes a la Formación Pampeano (Pleistoceno medio) de origen fluvial y 0,8 m de potencia.

Unidad UC1: Limos arenosos muy finos de color pardo rojizo. Equivalentes a la Formación Pampeano (Pleistoceno superior) de origen eólico y 0,65 m de potencia.

Unidad UD: Arena fina limosa, con pequeños litoclastos (tamaño arena media), de origen fluvial. Es equivalente a la Formación Chocancharava (Pleistoceno superior).

Unidad UD1: Arena muy fina limosa con intraclastos de calcretos (tosca) y litoclastos con sus ejes mayores subverticales, formando cuñas verticales de relleno. Se considera a esta unidad como una fábrica de cizalla.

Unidad UE: Arenas muy finas limosas de color pardo claro (*loessoides*) equivalentes a la Formación Laguna Oscura (6.000 - 4.000 a AP), de origen eólico y con más

de 4 m de potencia.

Unidad UF: Arcillas de origen lagunar con laminación plano paralela y potencia de 0,7 m. La edad radiocarbónica convencional de su base es  $3.770 \pm 90$  a AP y de su techo de  $2.820 \pm 60$  a AP.

Unidad UF1: Arcillas de origen palustre-lagunar no laminadas con potencia de 0,15 m. La edad radiocarbónica convencional de su base es de  $1.780 \pm 50$  a AP. Unidad UG: Limo arenoso fino intercalado con el nivel lagunar de la UF.

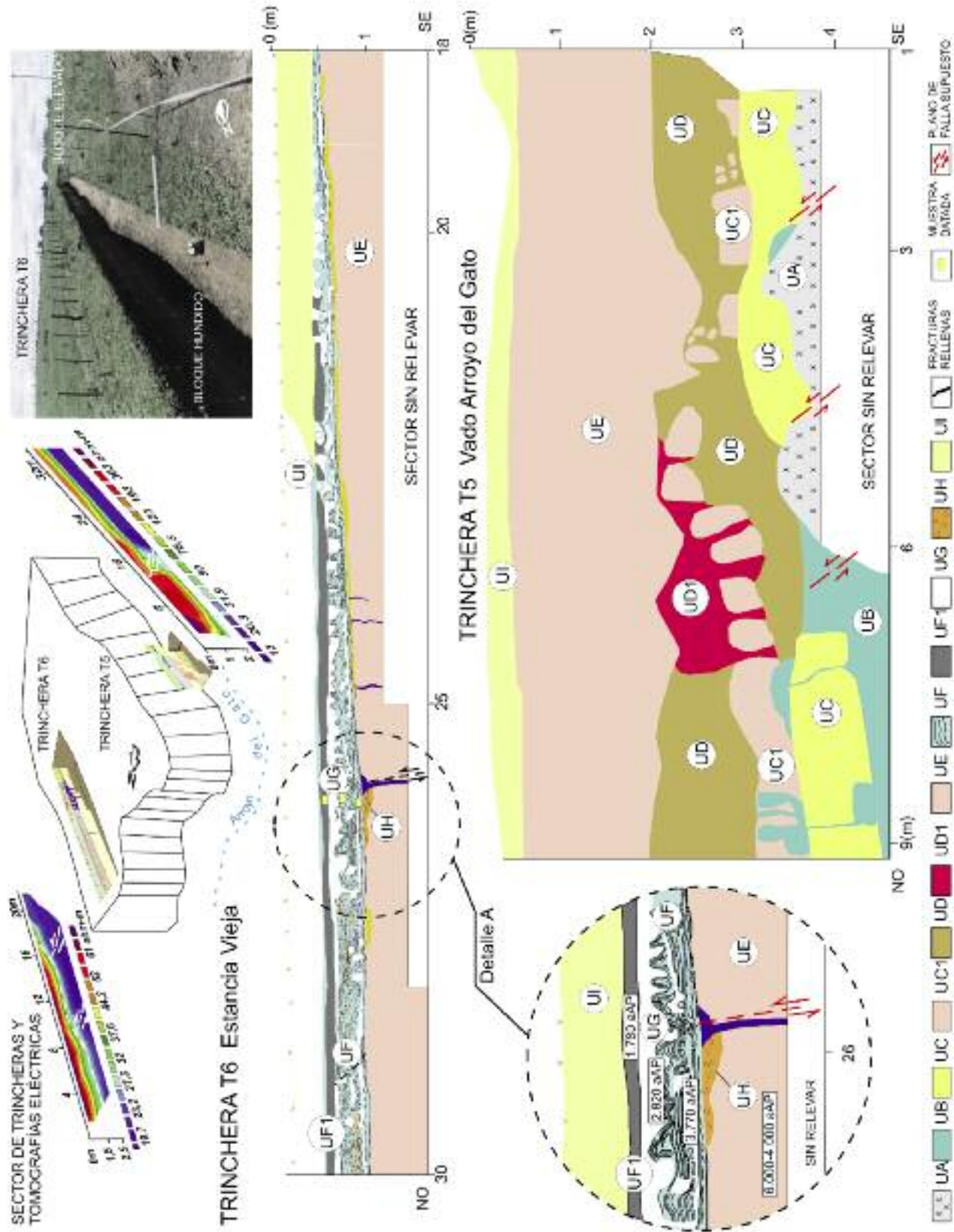
Unidad UH: Depósito con geometría triangular en forma de cuña, producto de un flujo denso (no unidireccional) gravitacional. Está compuesto por sedimentos poco seleccionados generados por la evolución de laderas, que presentan una matriz sostén (arenas finas, limos) e intraclastos de la UE. Los intraclastos se identifican claramente dentro de la matriz, presentan sus bordes rectos y angulosos indicando escaso transporte. Se considera a este depósito una cuña coluvial.

Unidad UI: Limos finos edafizados que en el bloque elevado poseen materia orgánica y bioturbaciones, mientras en el bloque hundido son más arcillosos. El aporte de arcillas es de origen palustre o lagunar somero.

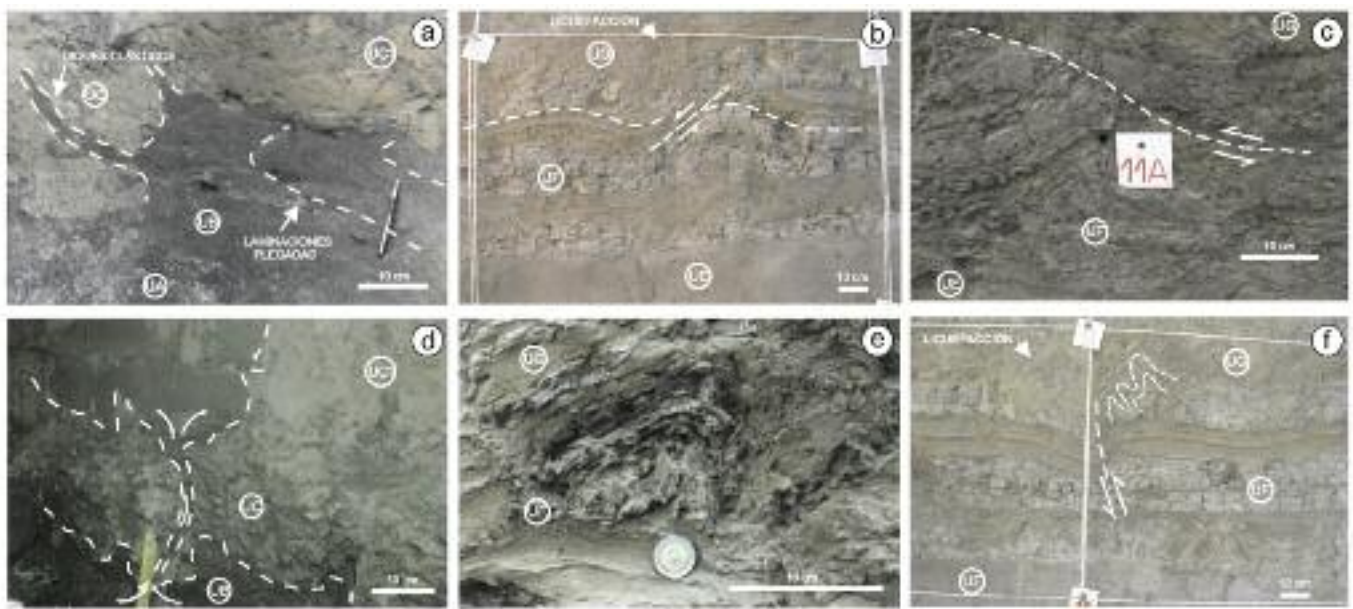
*Estructuras deformacionales de escala mesoscópica:* En el relevamiento de las paredes de las trincheras se identificaron estructuras deformacionales (dúctiles y frágiles) y otras generadas por paleolicuefacción de sedimentos no consolidados. Entre las estructuras relevadas se identificaron inyecciones de arena (diques clásticos, volcanes y cráteres), pliegues, grietas de tensión y fallas. Debido a que el origen de la mayoría de estas estructuras se interpreta como cosísmico, se las considera "sismitas".

*Estructuras generadas por licuefacción de arenas finas:* En la unidad UB (T5) se identificaron laminaciones limo arcillosas plano paralelas plegadas, generadas por paleolicuefacción. Se descarta que sean de origen sedimentario por la actitud de sus planos axiales (subhorizontal) y el grado de licuación que poseen (Fig. 10a).

En la trinchera T5 se identificaron diques clásticos que están atravesando a la uni-



**Figura 9:** Perfil litológico de la pared norte de las trincheras T5 (Estancia Vieja) y T6 (vado arroyo del Gato) y detalle del sector donde se concentran las estructuras deformacionales de mayor expresión. Block diagrama indicando la ubicación de las tomografías eléctricas y foto de la excavación de la trinchera T6.



**Figura 10:** Estructuras cosísmicas, sismitas, de paleolicuefacción y deformacionales relevadas en la zona de ground shaking de la falla Las Lagunas: a) Diques clásticos y laminaciones plegadas (T5); b) nivel lagunar plegado y dislocado por un plano de falla con movimiento normal y evidencias de sedimentos afectados por licuefacción (T6); c) falla de escala mesoscópica con movimiento inverso afectando a niveles lagunares (T6); d) cráter de arena generado por el fenómeno de licuefacción (T5); e) pliegues en sedimentos lagunares con vergencia hacia el bloque hundido (T6); f) pliegues y falla de escala mesoscópica con movimiento inverso afectando a las unidades UF y UG (T6).

dad UC, calcreto (tosca), considerada impermeable. El más importante de éstos tiene dimensiones aproximadas de 0,25 m de largo por 0,02 m de espesor y está formado por arena fina con pequeños intraclastos que ha incorporado de la unidad UC. Estas estructuras se consideran importantes evidencias de paleolicuefacción cosísmica (Fig. 10a).

La unidad UC (T5), entre el m 4-7, tiene una importante discontinuidad lateral coincidente con un escalón del zócalo. Se reconocen en esta unidad zonas de debilidad generadas por fracturas de tensión subverticales que han sido utilizadas como canales de conducción por las arenas finas licuadas de la unidad UB. Posiblemente, estos materiales saturados han sido movilizados e inyectados hacia arriba por el desplazamiento del agua a presión formando estructuras de paleolicuefacción cosísmicas como cráteres y volcanes de arena (Fig. 10d), que han incorporado en su movimiento intraclastos de las unidades UC y UC1.

#### *Estructuras deformacionales frágiles y dúctiles:*

En la T6, entre el m 23-26, se reconocieron fracturas de tensión y un plano de falla secundario, éstos se encuentran relle-

nos y sellados con sedimentos lagunares. El plano de falla está ubicado en el m 26 y su rumbo es sub-paralelo al de la falla principal tiene una orientación 034° N e inclina 80° hacia el bloque elevado (SE). Esta falla, con desplazamiento inverso, tiene asociada una cuña coluvial y un desnivel en la unidad UE, correspondiendo esta paleoruptura a la propagación de un plano secundario (Fig. 9).

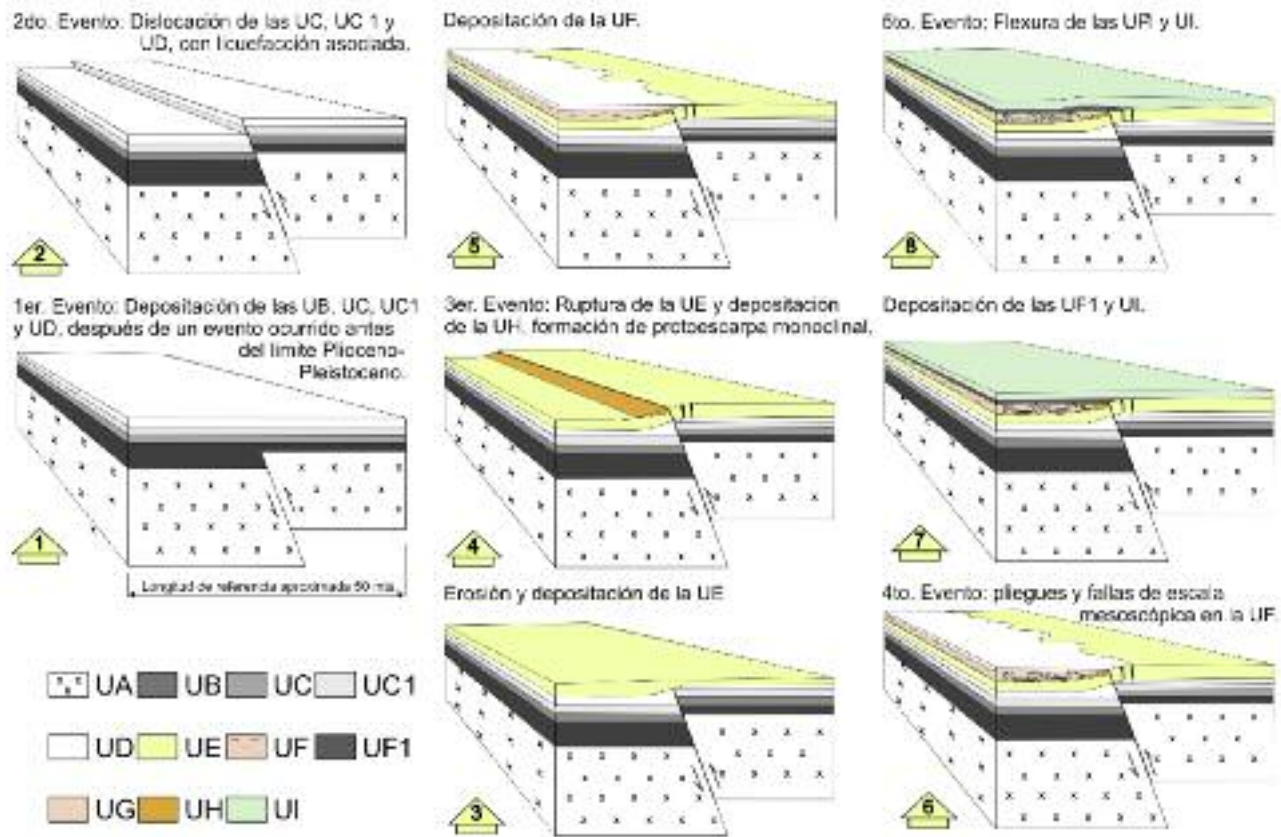
Se identificaron en ambas paredes de la trinchera T6 los niveles lagunares (UF) plegados, concentrados entre el m 22-30 (Fig. 10e). Las estructuras de deformación post-depósito son en su mayoría anticlinales inclinados (hacia el bloque hundido) y, en algunos casos volcados con despegues favorecidos por fallas de bajo ángulo con movimiento inverso (*décollement*). Asociadas a estas deformaciones presentes en sedimentos subacueos se reconocieron fallas con movimientos normales e inversos (Fig. 10b, c, f), cuyos planos en algunos casos están subhorizontales poniendo en evidencia desplazamientos horizontales.

*Interpretación:* La concentración de las deformaciones dúctiles y frágiles, tanto en los niveles lagunares como loésicos, per-

mite hacer una estimación sobre la probable ubicación del sector de *ground shaking* y de la propagación del plano de falla. Se supone que el disparador que generó estas deformaciones ha sido el *shock* producido por paleoterremotos. La interpretación de estas deformaciones ha permitido realizar el análisis retrospectivo de los eventos de fallamiento (Fig. 11).

Se interpretó que el zócalo cristalino fue dislocado por al menos un evento hipotético ocurrido con anterioridad al límite Plioceno-Pleistoceno, se estima que este evento generó un importante rechazo vertical en la falla. Posteriormente se depositan los sedimentos pertenecientes a la unidad UB (Formación Alpa Corral) considerándose a la base de esta unidad como horizonte de evento (he1).

Continúa el período de sedimentación con la depositación de las unidades UC y UC1 (Formación Pampeano) y UD (Formación Chocancharava). Estas unidades son dislocadas por un segundo evento hipotético que se supone ocurrió con anterioridad a la depositación de la unidad UE (Formación Laguna Oscura). Probablemente el sacudimiento (*shaking*) haya producido altas presiones en el agua conteni-



**Figura 11:** Esquema del modelo de reconstrucción de eventos de fallamiento de las trincheras T5 y T6, basado en las unidades litológicas descritas y estructuras deformacionales y de licuefacción relevadas, correspondientes a la falla Las Lagunas. La proximidad espacial y temporal entre ambas permitió realizar la superposición de los perfiles de las dos trincheras, aumentando así la superficie analizada.

da en los poros de los sedimentos, generando estructuras de paleolicuefacción asociadas como volcanes y cráteres de arena, diques clásticos y laminaciones plegadas. Asociada a estas estructuras ubicadas en la zona de ground shaking de la falla, se reconoce una fábrica de cizalla (unidad UD1). Posteriormente se erosiona el techo de la UD considerándose a esta superficie como un horizonte de evento (he2).

Luego comienza la depositación de la unidad UE (Formación Laguna Oscura). Esta unidad fue afectada por un tercer evento, aproximadamente a los 4.000 a AP, que generó la propagación a la superficie de un plano de falla subvertical con movimiento inverso que podría corresponder a un plano secundario de la falla principal. La formación de una protoescarpa monoclinial y de fisuras de tensión subverticales, ubicadas en la superficie del bloque elevado, constituyen fenómenos

asociados. La componente vertical de este evento es un desplazamiento de 0,30 m (rechazo medido en el *log*).

Posteriormente se erosiona la superficie expuesta del bloque elevado, depositándose el material erosionado en el bloque hundido formando una cuña coluvial (unidad UF). La potencia determinada para la misma permitió corroborar la magnitud del desplazamiento vertical del evento. La escarpa correspondiente a este evento ha favorecido el emplazamiento de una laguna y la depositación de arcillas laminadas de la unidad UF (3.770-2.820 a AP). La base de este nivel de sedimentos lagunares se considera como un horizonte de evento (he3). Probablemente, cuando los niveles lagunares (unidad UF) alcanzaron una potencia de 0,40 m fueron afectados por un cuarto evento sísmogénico que se ubicaría entre 2.820-1.780 a AP. Este evento habría sido el disparador que afectó de manera importante toda la secuencia la-

gunar, generando pliegues mesoscópicos inclinados con vergencia hacia el bloque hundido y volcados con despegues y fallamiento con movimiento normal e inverso de escala mesoscópica, como así también el fenómeno de licuefacción que afectó a la unidad UG. Es oportuno comentar que las deformaciones reconocidas en las unidades UF y UG podrían considerarse como producidas por un *slumping* de escala mesoscópica. Con posterioridad comienza un período de erosión y aplanamiento del techo de la unidad UF y la depositación de la unidad UF1 ( $1.780 \pm 50$  a AP) horizonte de evento (he4).

Una importante deformación ubicada en la zona de *ground shaking* de la falla probablemente sea la respuesta a un quinto evento sísmogénico. Este evento habría reactivado la falla principal que no llegó a romper en superficie, al menos en esta sección de la falla, generando una flexura

en la unidad UF1 entre el m 26-30 de la trinchera T6.

## ANÁLISIS POR RETRODEFORMACIÓN, DISTRIBUCIÓN TEMPORAL Y ESPACIAL DE PALEOEVENTOS Y RECONSTRUCCIÓN DE LA SISMICIDAD PREHISTÓRICA

### Análisis por retrodeformación

El análisis retrospectivo de los eventos de fallamiento, retrodeformación, se realizó con la información paleosísmica obtenida de la interpretación de las unidades litológicas y estructuras deformacionales y de licuefacción relevadas en las T5 y T6 (Fig. 11). Se adoptó este criterio debido a que se considera que los perfiles de estas excavaciones son los que ofrecen inmejorables evidencias de estructuras, como así también porque en el análisis de las dos trincheras en forma conjunta se han interpretado la mayoría de los paleoeventos definidos.

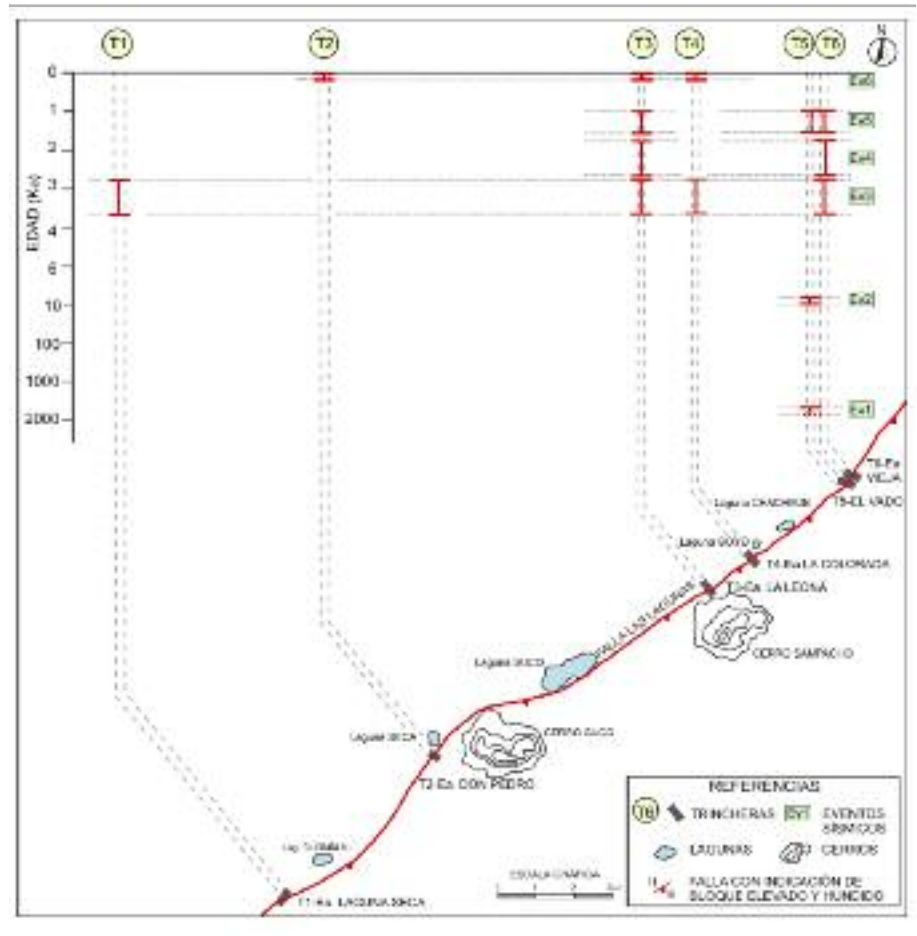
### Distribución espacial y temporal de paleoeventos

La longitud de ruptura cosísmica correspondiente a un evento permite, aplicando formulas empíricas, hacer una estimación de la magnitud máxima del evento sísmico (Bonilla 1988, Wells y Copper-smith 1994, Mc Calpin 1996).

Con el objetivo de obtener una representación gráfica que permita estimar la longitud de ruptura de cada uno de los eventos interpretados en las distintas trincheras, se elaboró la cartografía a escala que contiene la traza de la falla Las Lagunas, la ubicación de las trincheras y la distribución espacial y temporal de los paleoeventos interpretados (Fig. 12).

### Reconstrucción de la sismicidad prehistórica

La reconstrucción de la sismicidad prehistórica de la falla se realizó sobre la base de las evidencias paleosísmicas y de los paleoeventos interpretados en cada trinchera. En la mayoría de los paleoeventos no se pudo establecer, con total precisión,



**Figura 12:** Mapa de la traza de la falla Las Lagunas, ubicación de las trincheras y la distribución temporal de los paleoterremotos interpretados, que presenta la longitud de ruptura estimada, correspondiente a cada paleoevento (línea de puntos).

su edad de ocurrencia debido a la dificultad de fechar algunos sedimentos. Sin embargo, se considera importante haber logrado definir períodos de tiempo dentro de los cuales podrían haber ocurrido los mismos.

Los paleoeventos interpretados en cada trinchera, han sido correlacionados con el fin de facilitar su análisis y comparación, resultando un total de seis eventos que se denominan Ev1, Ev2, Ev3, Ev4, Ev5 y Ev6 (Figs. 12 y 13).

## ESTIMACIÓN DEL POTENCIAL SISMOGÉNICO

### Estimación de la tasa de desplazamiento (*slip rate*)

La estimación de la tasa de desplazamiento vertical se realizó considerando los desplazamientos acumulados en el plano

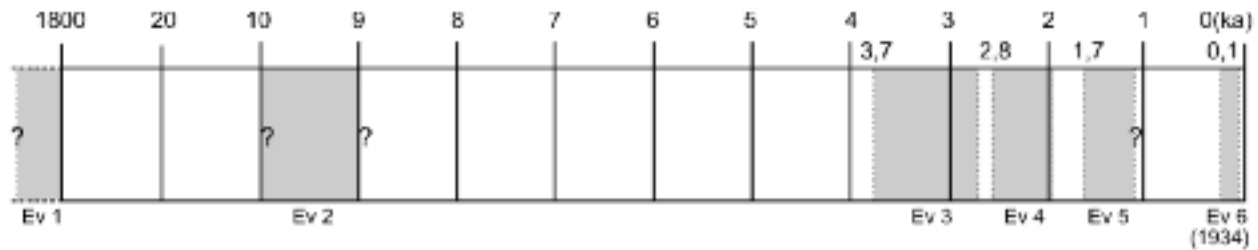
de falla (0,6-0,9 m), correspondientes a los últimos cuatro eventos interpretados en las trincheras T3, T4 y T6 que han afectado sedimentos cuya edad es 4.000 a AP. No se consideraron los desplazamientos de rumbo debido a que se desconocen.

Con el objetivo de obtener una primera aproximación respecto al orden de magnitud de la velocidad de la falla Las Lagunas, se siguió el criterio de Mc Calpin (1996) donde:

$$SR = \text{Desplazamiento Total (mm)} / \text{Edad de Sedimentos (años)}, \text{ del que resulta una tasa de desplazamiento vertical de: } SR = 600-900 \text{ mm} / 4000 \text{ a AP} = 0,15-0,22 \text{ mm/a.}$$

### Determinación del intervalo de recurrencia o retorno

El intervalo de recurrencia de fuertes paleoterremotos es uno de los parámetros



**Figura 13:** Esquema de síntesis que presenta la distribución temporal de los fuertes terremotos prehistóricos (denominados Ev), interpretados a partir de la información obtenida en las trincheras excavadas en las distintas secciones de la falla Las Lagunas.

fundamentales que describe la paleosismicidad de una falla (Mc Calpin 1996). La recurrencia de paleoeventos en este sector de la intraplaca, principalmente para la última parte del Holoceno (desde 4.000 a AP), se estimó considerando el promedio de los múltiples terremotos (4) interpretados. El valor obtenido es aproximadamente de 1,2 Ka.

El intervalo de recurrencia se estimó también aplicando la fórmula (Mc Calpin 1996):

$$RI = D / (S-C),$$

donde RI = intervalo de recurrencia medio, D = desplazamiento durante un único evento de fallamiento, S = tasa de desplazamiento cosísmico, C = *creep* (se asume cero para la mayoría de las fallas cuya historia de *creep* no ha sido documentada). Considerando que el desplazamiento por evento definido, sobre la base de evidencias recolectadas en varias trincheras, es de 300 mm y que la S es entre de 0,15-0,22 mm/a, por lo tanto el intervalo de recurrencia estimado resulta:  $RI = 300 \text{ mm} / 0,15\text{-}0,22 \text{ mm/a} = 1,3 - 2,0 \text{ Ka}$ .

#### Estimación de la longitud de ruptura

Las evidencias primarias como longitud, superficie de ruptura y desplazamiento de falla (máximo y promedio) normalmente son usadas en la determinación de paleomagnitudes (Bonilla 1988, Wells y Coppersmith 1994, Mc Calpin 1996). La estimación de la longitud de ruptura de cada evento interpretado se abordó en forma gráfica y analítica.

El análisis de la cartografía elaborada a escala (Fig. 12) permitió estimar que para el evento denominado Ev3 la longitud de ruptura podría haber alcanzado los 18,5

km, ya que sus evidencias han sido relevadas en las trincheras T1, T3, T4 y T6, y que los eventos Ev4 y Ev5 probablemente generaron rupturas cuyas longitudes habrían alcanzado al menos los 3,7 km. En el caso del Ev6 se considera que la longitud de ruptura podría haber sido mayor a 9,7 km.

La estimación de la longitud de ruptura en forma analítica se realizó por medio de la fórmula empírica propuesta por Bonilla (1988):

$$\text{Log } L = 1,03 \pm 0,13 + (0,37 \pm 0,11) \text{Log } D,$$

donde L es la longitud de ruptura en km y D el desplazamiento máximo en metros. Se consideró en este análisis al Ev3, cuyo desplazamiento vertical es de 0,30 m, dado que fue interpretado en la mayoría de las trincheras. Resultando que la longitud de ruptura cosísmica correspondiente a este evento podría haber superado los 9 km.

#### Estimación de la paleomagnitud considerando el desplazamiento máximo

Entre los parámetros necesarios para determinar el potencial sismogénico de una falla la magnitud de un paleoterremoto, es uno de los más importantes (Reiter 1988). Por lo tanto examinar el desplazamiento máximo o promedio de eventuales paleosismos, que usualmente se manifiestan como superficies de rupturas o deformaciones asociadas, permite escalar el tamaño del terremoto y determinar la magnitud del momento sísmico ( $M_w$ ) por medio de fórmulas empíricas (Bonilla *et al.* 1984, Wells y Coppersmith 1994).

Si bien se han interpretado varios eventos, se decidió realizar la estimación de la paleomagnitud correspondiente al deno-

minado Ev3, dado que es el analizado con mayor certidumbre. Para éste se calculó la magnitud ( $M_s$ ) y la magnitud del momento sísmico ( $M_w$ ) en forma analítica utilizando como dato una evidencia cosísmica primaria, que es el desplazamiento de 0,30 m a lo largo del plano de falla correspondiente a este evento.

La componente vertical del desplazamiento, rechazo o salto medido en el log, fue de aproximadamente de 0,30 m en la mayoría de los casos. Esto se corroboró considerando la potencia de una cuña coluvial emplazada en la base de la protoescarpa. Siguiendo el criterio de Mc Calpin (1996), se asumió que la altura inicial de la escarpa es igual a 2 veces el máximo espesor de la cuña coluvial.

La estimación de  $M_s$  se realizó aplicando la fórmula empírica de Bonilla *et al.* (1984) que plantea:  $M_s = 7,0 + 0,78 \cdot (\text{Log } D_{\text{máx}})$ , donde D es el desplazamiento máximo en metros (0,30m), resultando una paleomagnitud  $M_s$  6,6. La estimación de  $M_w$  se realizó aplicando la fórmula empírica de Wells y Coppersmith (1994):  $M_w = 6,93 + 0,82 \cdot \text{Log } (\Delta D)$ , donde D es el desplazamiento en metros (0,30 m) resultando una magnitud del momento sísmico  $M_w$  6,6.

#### Estimación del terremoto máximo probable

El terremoto máximo probable se considera como el terremoto más grande que pueda ocurrir en un determinado intervalo de tiempo en una sección de la falla (De Polo y Slemmons 1990). Una forma de valorarlo es por medio de la magnitud del momento sísmico ( $M_w$ ), parámetro que geológicamente se considera como una



descripción de la extensión de la deformación de la fuente que origina el evento, que se basa en la determinación del momento sísmico (Hanks y Kanamori 1979, Wells y Coppersmith 1994).

A los fines de realizar una estimación de la magnitud del terremoto máximo probable para la falla en estudio, se consideraron en el cálculo las longitudes de ruptura de 18,5 km y el largo total de la falla (aflorante) de 24 km. Se aplicaron las fórmulas empíricas de Slemmons (1982):  $M_s = 2,021 + 1,142 \cdot \text{Log } L$ , donde  $L$  es la longitud de ruptura en metros y de Bonilla *et al.* (1984):  $M_s = 6,04 + 0,704 \cdot \text{Log } L$ , donde  $L$  es la longitud de ruptura en km para eventos entre  $5,5 < M < 8,0$ .

La magnitud del terremoto máximo probable obtenida, considerando una ruptura de 18,5 km, podría ser  $M_s \geq 6,9$  y para una ruptura de 24 km sería  $M_s \geq 7,0$ .

Por otra parte se estimó la magnitud  $M_w$ , determinando el momento sísmico ( $M_0$ ) por medio de las fórmulas de Aki (1966):  $M_w = 2/3 \text{Log } M_0 - 10,73$  y  $M_0 = \mu \cdot A \cdot D$ , donde  $D$  es el desplazamiento promedio entre dos bloques adyacentes a través de la superficie de la falla,  $A$  es el área de ruptura de la falla (longitud por profundidad) y  $\mu$  es el módulo de rigidez de las rocas de la corteza cuyo valor se asume que varía entre 3 y  $3,5 \times 10^{11}$  dyn/cm<sup>2</sup>.

Los datos de entrada utilizados son las longitudes de ruptura interpretadas de 18,5 y 24 km, el desplazamiento vertical máximo de 0,30 m y la profundidad hipocentral de 30 km, determinada por la Estación Pasadena para el Gran Terremoto de Sampacho del año 1934, resultando una  $M_w \geq 7,0$ .

## CONCLUSIONES

Los rasgos morfológicos superficiales, como escarpas principales y escarpas pequeñas formadas por sedimentos cuaternarios, asociados a la falla Las Lagunas que persisten aún frente a la importante actividad antrópica, erosión eólica y fluvial, indican un control activo de la falla sobre la escarpa.

Las evidencias paleosismológicas releva-

das, como estructuras de deformación pos-depósito, de paleolicuefacción y rasgos morfológicos superficiales, confirman la continuación de las deformaciones pliocenas-pleistocenas en el Holoceno.

Las evidencias recolectadas han permitido interpretar la ocurrencia de fuertes paleoterremotos en este sector de la intraplaca, para la última parte del Holoceno, que confirman la actividad cuaternaria de la falla Las Lagunas.

Los valores de paleomagnitud determinados de  $M_s \geq 6,6$  y  $M_w \geq 6,6$ , junto a la ausencia de evidencias de estructuras deformacionales y licuefacción, cosísmicas, asociadas a los terremotos del año 1934, permite expresar que, las evidencias paleosismológicas relevadas han sido generadas por paleoeventos de mayor energía que los registrados en el período histórico.

El terremoto máximo probable correspondiente a la falla Las Lagunas, podría alcanzar la magnitud máxima de  $M_s$  6,9 - 7,0 y  $M_w \geq 7,0$ . Estos valores exceden ampliamente, en términos de energía, a los esperados en la región ubicada dentro de la zona 1 de peligrosidad reducida. Zona correspondiente a la zonificación sísmica de Argentina definida por Castano (1977).

Los eventos ocurridos en los últimos 4.000 años, que fueron interpretados con mayor certidumbre, indican que podría ser un patrón de agrupamiento (*clustering*) temporal de terremotos, coincidente con un período de mayor actividad de la falla.

El período de retorno determinado para fuertes terremotos, en la última parte del Holoceno, es de aproximadamente entre 1,2 y 2,0 Ka.

Probablemente el valor correspondiente a la tasa de desplazamiento vertical de 0,15 a 0,22 mm/a, sensiblemente alta para una estructura de intraplaca, podría estar influenciado por un período de mayor actividad de la falla.

Si se considera que la subducción horizontal ha controlado el levantamiento y las deformaciones en el basamento del antepaís pampeano, entre los 28° y 33° S durante el Mioceno, Plioceno y Cuater-

nario, las deformaciones y morfologías relevadas en la falla Las Lagunas hacen predecir que estas manifestaciones son consistentes con la deformación del antepaís en el *flat-slab*.

La información obtenida en esta investigación es una contribución a la determinación de los valores umbrales de magnitud de los terremotos morfogénicos para las Sierras Pampeanas de San Luis y Córdoba.

En un régimen tectónico compresivo, actuante desde el Neógeno, se supone que las deformaciones y la intensidad de los movimientos se atenúan a medida que la distancia al frente activo de deformación es mayor, sin embargo los rasgos morfológicos y parámetros sismogénicos determinados para la falla Las Lagunas se consideran relevantes para esta región de la intraplaca.

La expresión morfológica y linealidad de las escarpas desarrolladas en sedimentos sueltos se destacan aún a pesar de la actividad antrópica e intemperismo, sin embargo, no se ha logrado observar con claridad la superficie de la falla principal en el registro estratigráfico. Se especula que algunas de las causas que no favorecen a la identificación del plano de falla son la posibilidad de que el desplazamiento original correspondiente al *shock* inicial (primario) se distribuya en varios planos de falla, secundarios, disminuyendo o atenuando la expresión de las deformaciones y rasgos geomórficos, y la licuefacción de los sedimentos sueltos.

## AGRADECIMIENTOS

Al Dr. Carlos Costa (UNSL) por su orientación, transferencia de conocimientos y experiencia para el desarrollo de las investigaciones paleosismológicas que se realizan en esta región central de Argentina. Al Dr. Frank Audemard (FUNVISIS) por su invaluable lectura crítica del manuscrito y las opiniones vertidas que han permitido mejorar y enriquecer el mismo. A los árbitros por su predisposición, lectura crítica del manuscrito y sugerencias que han permitido mejorar sig-

nificativamente este trabajo.

## TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

- Aguilera, H.D., Jiménez, M., Sagripanti, G.L., Daga, R.B., Grosso, M. V. y Villalba, D. 2002. Métodos gravimétricos aplicados en el estudio de la falla Las Lagunas, Sampacho, Córdoba. Argentina. 4º Congreso de Geofísica de la Sociedad Cubana de Geología, Actas CD: 6 p., La Habana.
- Aki, K. 1966. Generation and propagation of G waves from the Niigata Earthquake of June 16, 1964: Part 2. Estimation of earthquake moment, released energy, and stress-strain drop from the G waves spectrum. *Bulletin of the Earthquake Research Institute* 44: 73-88.
- Audemard, F., Pantosti, D., Machette, M.N., Costa, C.H., Okumura, K., Cowan, H., Diederix, H. y Ferrer, C. 1999. Trench investigation along the Mérida section of the Boconó fault (central Venezuelan Andes), Venezuela. *Tectonophysics* 308: 1-21.
- Bucknam, R.C. y Anderson, R.E. 1979. Estimation of fault-scarp ages from a scarp-height-slope-angle relationship. *Geology* 7: 11-14.
- 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: 50p.
- Cantú, M.P. 1992. El Holoceno en la provincia de Córdoba. *Holoceno de la República Argentina*. *Cadina* 1: 1-16.
- Cantú, M., Schiavo H., Becker A., Zhou L. y Grumelli, M. 2006. Pleistoceno superior tardío-Holoceno de la cuenca media del arroyo Santa Catalina, prov. de Córdoba, Argentina. 3º Congreso Argentino de Cuaternario y Geomorfología, Actas 2: 777-786.
- Castano, J.C. 1977. Zonificación sísmica de la República Argentina. Instituto Nacional de Prevención Sísmica. *Publicación Técnica* 5, 42 p., San Juan.
- Costa, C. 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. *Asociación Geológica Argentina, Serie D, Publicación Especial* 7: 9-19, Buenos Aires.
- Costa, C. H. y Vita Finzi, C. 1996. Late Holocene faulting in the Southeast Sierras Pampeanas of Argentina. *Geology* 24(12): 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.
- Crone, A.J., Machette, M.N. y Bowman, J.R. 1992. Geologic investigations of the 1988 Tennant Creek, Australia, earthquakes implications for paleoseismicity in stable continental regions. *U.S. Geological Survey Bulletin* 2032-(A), 51p.
- Crone, A.J., Machette, M.N. y Bowman, J.R. 1997. Episodic nature of earthquake activity in stable continental regions revealed by paleoseismicity studies of Australian and North American Quaternary faults. *Australian Journal of Earth Sciences* 44: 203-214.
- Crone, A.J., De Martini, P., Machette, M.N., Okumura, K. y Prescott, J. 2003. Paleoseismicity of two historically quiescent faults in Australia: implications for fault behavior in stable continental regions. *Bulletin of Seismology Society of America* 93 (5): 1913-1934.
- De Polo, C.M. y Slemmons, D.B. 1990. Estimation of earthquake size for seismic hazards. *Geological Society of America, Reviews in Engineering geology* 8: 1-28.
- Hanks, T. y Kanamori, H. 1979. A moment magnitude scale. *Journal of Geophysical Research* 84: 2348-2350.
- Hünicken, M., Azcuy, C. y Pensa, M. 1981. Sedimentitas Paleozoicas. En Yrigoyen, M.R. (ed.) *Geología y Recursos Naturales de la Provincia de San Luis*, 8º Congreso Geológico Argentino, *Relatorio* 8: 74-75, San Luis.
- 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, Depto. de Calamuchita, Provincia de Córdoba. 5º Reunión de Microtectónica, *Actas* 1: 107-114.
- Machette, M.N. 1989. Dating methods applicable to Quaternary geologic studies in the western United States. *Utah Geological and Mineral Survey, Miscellanea publication* 89, 7 p.
- Machette, M.N., Crone, A.J. y Bownan, J.R. 1993. Geologic investigations of the 1986 Mayrrat Creek, Australia, earthquakes-implications for paleoseismicity in stable continental regions. *Geological Survey Bulletin* 2032 (B): 1-29.
- Massabié, A.C. 1996. Fallamiento neotectónico en las Sierras Pampeanas Orientales. Implicancias aplicadas a diferentes escalas. *Asociación de Geología Argentina Aplicada a la Ingeniería*, *Actas* 10: 187-198.
- Massabié, A.C. y Szlafsztein, C.F. 1991. Condiciones geomecánicas y edad del fallamiento neotectónico en las Sierras Pampeanas Orientales, Córdoba, Argentina. *Asociación de Geología Argentina Aplicada a la Ingeniería*, *Actas* 6: 154-168.
- Mc Calpin, J.P. 1996. *Paleoseismology*, Academic Press Inc., 587 p., California.
- Meghraoui, M. y Doumaz, F. 1996. Earthquake-induced flooding and paleoseismicity of the El Asnam, Algeria, fault-related fold. *Journal of Geophysical Research* 101(B7): 17.617-17.644.
- Mingorance, F.A. 1987. Operativo sísmológico móvil con motivo del sismo ocurrido el 24 de Marzo de 1987 en Sampacho, Córdoba. Instituto Nacional de Prevención Sísmica, *Informe Técnico*, 14 p., San Juan.
- 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.
- Olsacher, J. 1935. El terremoto de Sampacho, Provincia de Córdoba. *Revista del Museo de Ciencias Naturales* 1: 1-19.

- Pantosti, D. 1997. Modern approach in paleoseismology. Historical and prehistorical earthquakes in the Caucasus. NATO ASI Series, 21p.
- Pantosti, D. y Yeats, R. S. 1993. Paleoseismology of great earthquakes of the late Holocene. *Annali di Geofisica* 36: 237-257.
- Philip, H., Avagyan, A., Karakhanian, A., Ritz, J.F. y Rebai, S. 2001. Estimating slip rates and recurrence intervals for strong earthquakes along an Intracontinental Fault: Example of the Pambak-Sevan-Sunik Fault (Armenia). *Tectonophysics* 343: 205-232.
- Philip, H. y Meghraoui, M. 1983. Structural analysis and interpretation of the surface deformations of the El Asnam earthquake of October 10, 1980. *Tectonics* 2(1): 17-49.
- Ramos, V.A. 1999. Rasgos estructurales del territorio argentino. *Geología Argentina*, Instituto de Geología y Recursos Minerales, *Anales* 29(24): 715-784.
- Reiter, L. 1988. Earthquake hazard analysis. Columbia University Press, 241p., New York.
- 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. 2006. Estructuras deformacionales en sedimentos no consolidados asociadas a terremotos prehistóricos. Falla Las Lagunas, Sampacho. Córdoba. 3º Congreso Nacional de Cuaternario y Geomorfología, Actas 1: 377-386. Córdoba.
- Sagripanti, G.L., Origlia, H. D. y Campanella, R.O. 1998a. Historic and present seismology of the Sampacho area, Córdoba province, Argentina. *Environmental & Engineering Geosciences*, 4 (2): 270-275.
- Sagripanti, G.L., Origlia, H.D. y Campanella R.O. 1998b. Sismicidad de una región de intraplaca, departamento de Río Cuarto, Provincia de Córdoba. Argentina. Conferencia Internacional "Sistemas modernos de preparación y respuesta ante riesgos sísmicos, volcánicos y tsunamis", Actas 1: 281-293, Santiago.
- 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. 4º Congreso de Geología y Minería de la sociedad Cubana de Geología, Actas CD: 12p., La Habana.
- Sagripanti, G.L., Schiavo, H.F., Costa, C.H., Villalba, D., Daga R.B. y Rodríguez, M.C. 2005. Paleoterremoto en el sector sudeste de las sierras Pampeanas Orientales, revelado por deformaciones de depósitos lagunares Holocenos. 16º Congreso Geológico Argentino, Actas 4: 457-462, La Plata.
- Sagripanti, G.L., Villalba D., Bettiol A.G. y Seitz C. 2009. Sismicidad y paleosismicidad en la región sur de la provincia de Córdoba. Análisis del peligro y riesgo sísmico asociado. *Revista Asociación de Geología Argentina Aplicada a la Ingeniería* 23: 45-53.
- Schlagintweit, O. 1954. Una interesante dislocación en Potrero de Garay (valle de Calamuchita) y observaciones sobre la Sierras Chica y Grande de Córdoba. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 9(3): 135-154.
- Slemmons, D.B. 1982. Determination of design earthquake magnitudes for microzonation. 3º International Earthquake Microzonation Conference, proceeding 1: 119-130, Seattle.
- 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.
- Soil Survey Staff 2006. Keys to soil taxonomy, 10th ed. USDA-Natural resources conservation service, Washington.
- Wallace, R.E. 1977. Profiles and ages of young fault scarps, north-central Nevada. *Geological Society of America Bulletin* 88: 1267-1281.
- Wells, D.L. y Coopersmith, 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.
- Yeats, R.S., Sieh, K. y Allen, C.R. 1997. The geology of earthquakes. Oxford university press, 568 p., New York.

Recibido: 8 de febrero, 2010.

Aceptado: 20 de diciembre, 2010