

# PALEOSISMICIDAD Y ESTIMACIÓN DEL INTERVALO DE RECURRENCIA DE FUERTES TERREMOTOS ASOCIADOS A FALLAS DE INTRAPLACA A LA LATITUD 33°S, FALLA LAS LAGUNAS, SAMPACHO, CÓRDOBA

Guillermo Luis SAGRIPANTI<sup>1</sup> y Diego VILLALBA<sup>1</sup>

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

## RESUMEN

Las morfologías y deformaciones de sedimentos cuaternarios sumadas a la sismicidad superficial manifiesta en un sector de intraplaca de Argentina a la latitud 33°S, región sur de la provincia de Córdoba, ponen en evidencia que la actividad tectónica del Mioceno-Pleistoceno tiene continuidad en el Holoceno. Seguramente esta actividad ha tenido asociada la ocurrencia de fuertes terremotos, desconociéndose de estos últimos su número, magnitud e intervalo de recurrencia. El objetivo del presente trabajo es, por medio de investigaciones paleosismológicas y mediante la apertura de trincheras, relevar evidencias de deformaciones cosísmicas para hacer una contribución a la reconstrucción del registro de la sismicidad prehistórica y estimar el intervalo de recurrencia de fuertes terremotos, para la región. Con la información obtenida de la descripción e interpretación de los perfiles litológicos y estructuras mesoscópicas de dos trincheras se elaboró un modelo de retrodeformación del fallamiento para la falla Las Lagunas, determinando la ocurrencia de múltiples paleoterremotos en los últimos 3.700 años y estimando una recurrencia para este sector de intraplaca entre 900 y 1.200 años.

Palabras clave: *Falla, Intraplaca, Trincheras, Paleoterremotos, Intervalo de recurrencia.*

**ABSTRACT:** *Paleoseismicity and estimation of the recurrence interval during strong earthquakes associated with intraplate faults at the 33°S latitude, Las Lagunas fault, Sampacho, Córdoba.* Morphologies and deformations of Quaternary sediments, added to the occurrence of shallow seismicity in a sector of the Argentine intraplate at latitude 33°S, in the southern region of Córdoba province, evidence that the Miocene-Pleistocene tectonic activity continued into the Holocene. This activity has been certainly associated with strong earthquake occurrences, whose number, magnitude and recurrence interval remained unknown. The objective of the present work is to reconstruct the prehistoric seismicity and to estimate the recurrence interval of strong earthquakes for the region through paleoseismic investigations based on the study of coseismic deformations in trenches. Data obtained from the description and interpretation of lithologic profiles and mesoscopic structures from two trenches allowed us to propose a model of faulting retrodeformation for Las Lagunas fault; the occurrence of many paleoearthquakes in the last 3,700 years was recognized, with a recurrence interval between 900 and 1,200 years for this sector of intraplate setting.

Keywords: *Fault, Intraplate, Trench, Paleearthquake, Recurrence intervals.*

## INTRODUCCIÓN

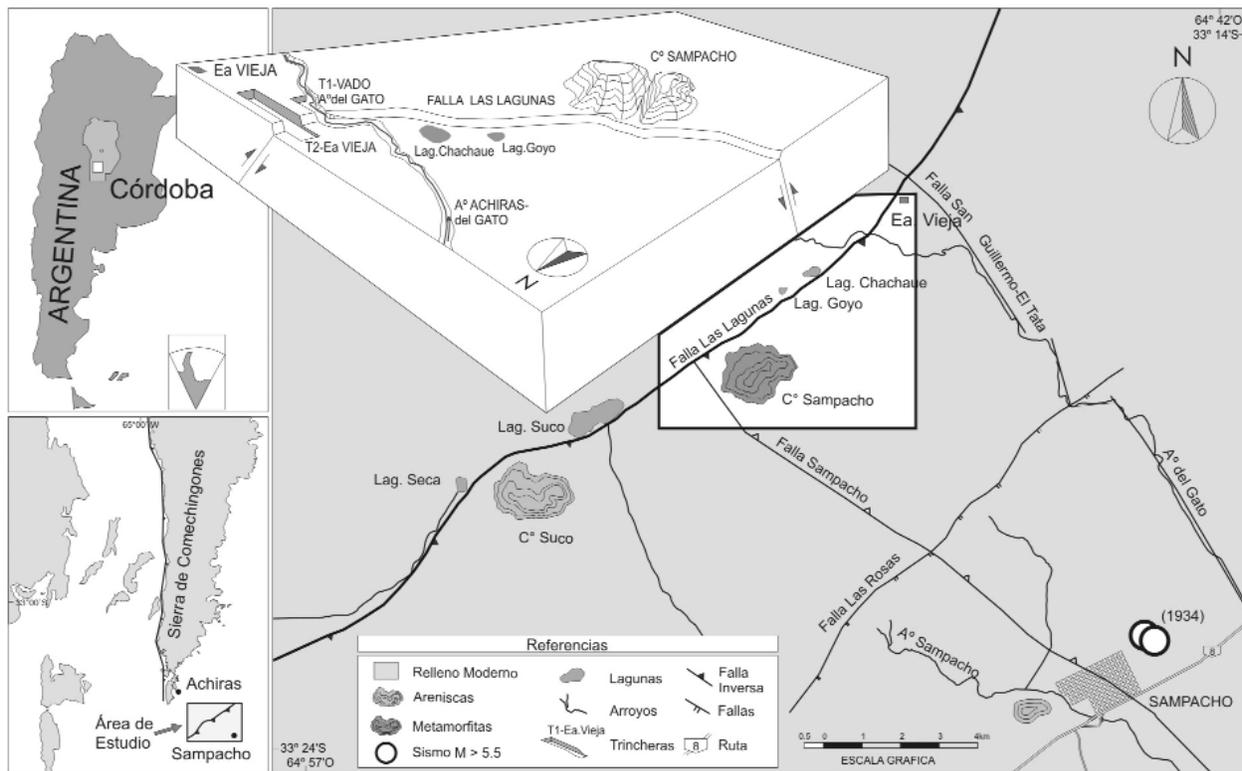
Los esfuerzos que han originado los estilos compresionales del frente orogénico andino y del antepaís de las Sierras Pampeanas han actuado durante el Mioceno tardío, Plioceno y Cuaternario. El levantamiento del basamento de las Sierras Pampeanas entre los 28°-33° de latitud sur sugiere que la deformación está condicionada por la subducción subhorizontal de la placa de Nazca (Jordan *et al.* 1983, Jordan y Almendinger 1986). Las manifestaciones de intraplaca asociadas a la horizontalización de la placa de Nazca, son la sismicidad

superficial moderada a fuerte, con una importante concentración en torno a 33° de latitud sur entre la Precordillera y las Sierras Pampeanas (Costa y Vita Finzi 1996, Ramos 1999). Así también son importantes las morfologías superficiales, las deformaciones cosísmicas, la licuefacción de sedimentos cuaternarios, la frecuente actividad sísmica superficial y la ocurrencia de fuertes terremotos, expresiones reconocidas a la latitud 33 S entre 64°-65° de longitud oeste (Sagripanti 2001).

El área de estudio se encuentra aproximadamente a unos 800 km al este de la trinchera oceánica desarrollada entre las

placas de Nazca y Sudamericana, en donde se concentran las mayores deformaciones y actividad sísmica vinculadas al frente orogénico activo. Sin embargo, en el sector de estudio se reconocen evidencias morfológicas superficiales y estructuras deformacionales de escala mesoscópica con un importante desarrollo en sedimentos sueltos. Esto hace suponer que la actividad tectónica neógena ha sido intensa y que el potencial sismogénico de las fallas de la región, conocido parcialmente, podría ser superior al estimado (Sagripanti *et al.* 2001).

El registro sísmico histórico e instrumen-



**Figura 1:** Mapa de ubicación del área de estudio, de la traza de la falla Las Lagunas, del epicentro del gran terremoto de Sampacho del año 1934 y localización de las trincheras realizadas en el presente estudio (véase figura 4).

tal que se ha logrado reconstruir, parcialmente para la región sur de la provincia de Córdoba, comprende desde el año 1826 hasta la actualidad, desconociéndose la sismicidad prehistórica como así también el intervalo de recurrencia de fuertes terremotos en esta zona.

El objetivo de esta contribución es presentar resultados preliminares de investigaciones paleosismológicas, tendientes a la reconstrucción de la sismicidad prehistórica, la estimación del intervalo de recurrencia y la paleomagnitud de fuertes terremotos ocurridos en este sector de intraplaca.

El área de estudio se ubica a la latitud de 33°S, en el extremo suroriental de las Sierras Pampeanas de Córdoba, entre las últimas estribaciones de la sierra de Comechingones y la localidad de Sampacho, donde se encuentra la falla Las Lagunas. Esta estructura ofrece características casi únicas para realizar estudios tendientes a lograr una mejor comprensión de la sismicidad y paleosismicidad de intraplaca dentro de un contexto tectónico de subducción subhorizontal. Esta falla se pre-

sume que es la responsable del terremoto destructor de magnitud M 6,0 (1934), con epicentro en la localidad de Sampacho, a la que destruyó en un 90% (Fig. 1).

## ANTECEDENTES

Los antecedentes de investigaciones neotectónicas en fallas de intraplaca no son numerosos aún a nivel global. Sin embargo, las contribuciones de Crone *et al.* (1992), Machette *et al.* (1992), Montecat *et al.* (1993), Mc Calpin (1996), Bucknam y Anderson (1997) y Wallace (1997) se consideran de interés, ya que, proveen información valiosa para el conocimiento y evaluación del peligro sísmico en regiones sísmicamente activas.

En ambientes de intraplaca, 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 ampliamente este período de registro. La información que proveen las evidencias reconocidas

en un perfil estratigráfico permite extender hacia atrás, en el tiempo, el límite de observación e interpretación, y por lo tanto posibilita reconstruir la sismicidad prehistórica de una región. Asimismo, los datos obtenidos por medio de investigaciones paleosismológicas pueden aportar información sobre el número de paleoterremotos, paleomagnitudes, tasa de desplazamiento e intervalos de recurrencia, en regiones donde se dispone de escasa información sísmológica y las fallas no presentan evidencias claras de deformaciones recientes en superficie (Bonilla 1988, Mc Calpin 1996).

Los estudios de paleosismicidad se basan en la búsqueda de evidencias de fuertes terremotos en el registro geológico. Estos se realizan por medio de la excavación y la descripción de las exposiciones de trincheras que permiten analizar deformaciones y trazas fósiles generadas por fuertes paleoterremotos. La magnitud de estas deformaciones depende de la energía liberada, la profundidad hipocentral, la duración de la sacudida, el *ground*

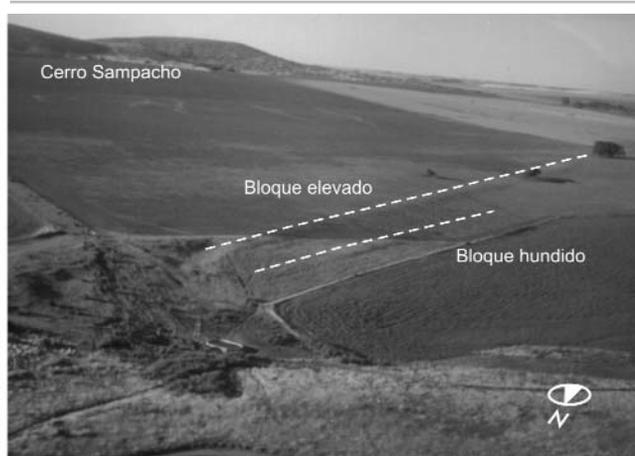
*shaking*, el carácter de la falla y los materiales afectados (Machette 1989, de Polo y Slemmons 1990, Pantosti y Yeats 1993, Mc Calpin 1996, Meghraoui y Doumaz 1996, Crone *et al.* 1997, Audemard *et al.* 1999 y Philip *et al.* 2001).

El mayor desarrollo de estudios y técnicas paleosismológicas hasta el presente se concentra en zonas de borde de placa, donde la actividad sísmica es más frecuente y de mayor magnitud con relación a las zonas de intraplaca. En estas últimas, si bien los terremotos son de menor energía, no dejan de ser una importante amenaza para las poblaciones asentadas en las mismas, en algunos casos potenciada por el desconocimiento y subestimación del peligro sísmico (Crone *et al.* 1997). La creciente necesidad de aumentar el conocimiento sobre el potencial sismogénico asociado a fallas con actividad cuaternaria y el riesgo sísmico a la que están expuestas algunas poblaciones en la actualidad depende, en su gran mayoría, de las investigaciones paleosismológicas que se puedan realizar. Dentro de las etapas que comprenden estas investigaciones, la elección de uno o más sitios potenciales para la apertura de trincheras es una tarea fundamental (Mc Calpin 1996, Costa 2004).

Las investigaciones desarrolladas en las Sierras Pampeanas de Córdoba y San Luis (Schlagintweit 1954, Kraemer *et al.* 1988, Massabí 1987, 1991, Massabí y Szlafsztein 1996, Costa 1996, Costa y Vita Finzi 1996, Costa *et al.* 2001) han contribuido de forma valiosa al conocimiento de la neotectónica. Los antecedentes de estudios sismológicos y neotectónicos realizados en el sector oriental de las sierras de Comechingones no son numerosos, aunque se cuenta con importantes contribuciones (Olsacher 1935, Mingorance 1987, 1991, Aguilera *et al.* 2002, Sagripanti *et al.* 1998a, 1998b, 2001, 2003, 2005, Sagripanti 2006, Sagripanti y Villalba 2006).

## MARCO GEOLÓGICO Y SISMICIDAD

Las principales unidades estratigráficas aflorantes en el área de estudio son el ba-



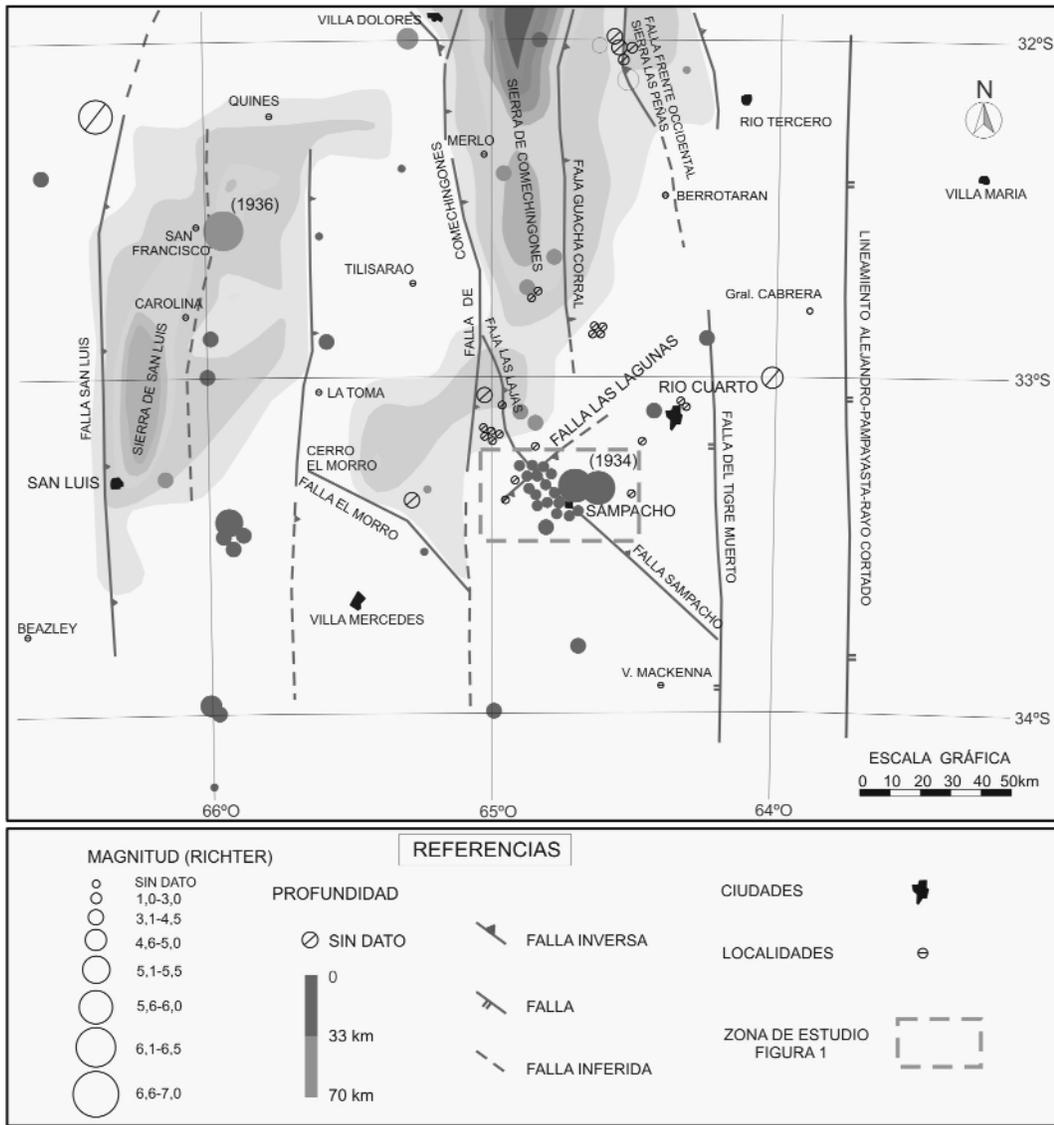
**Figura 2:** Vista oblicua de la falla Las Lagunas, las líneas de trazo indican los rasgos morfológicos superficiales como la escarpa y escarpas pequeñas.

samento cristalino precámbrico-paleozoico inferior-medio, compuesto por metamorfitas intruidas por cuerpos graníticos; sedimentitas pérmicas formadas por areniscas cuarcíticas de grano fino a medio, y arenas, limos y arcillas cenozoicas de origen fluvial, eólico y lagunar. En esta área que comprende el borde suroccidental de la sierra de Comechingones se reconocen fallas inversas y normales cuya orientación azimutal en promedio es 030°-050° N y 120° N. Algunas de ellas presentan evidencias morfológicas superficiales de actividad neotectónica y en algunos sectores ejercen un importante control al escurrimiento superficial y al flujo subterráneo, favoreciendo el emplazamiento de lagunas en rosario como las de Suco, Seca, Durnbull, Goyo y Chachaué (Fig. 1). Entre estas estructuras, la falla Las Lagunas se considera la más importante por su expresión y actividad cuaternaria manifiesta; es inversa de plano buzante al SE con rumbo NE y su traza alcanza los 24 km de longitud. Esta falla presenta morfologías superficiales de importante desarrollo que comprenden una escarpa rectilínea, formada por sedimentos loésicos, que enfrenta al noroeste alcanzando los ocho metros de altura en algunas secciones. Otras morfologías son escarpas pequeñas que poseen el mismo rumbo de la traza de la falla y que superan los 30 cm de altura. Estas expresiones se preservan claramente a pesar de la erosión y de la importante intervención antrópica a la que están sometidas (Fig. 2). Además de la expresión morfológica su-

perficial se reconocen deformaciones de escala mesoscópica en los sedimentos no consolidados. Esto hace suponer que la actividad neógena tiene continuidad hasta el presente en este sector de intraplaca, y que afecta tanto al basamento como a los sedimentos cuaternarios (Sagripanti 2006).

El área de las Sierras de Córdoba y San Luis se encuentra en una región en la cual los intervalos de recurrencia normalmente superan los registros de la sismicidad histórica y donde no se ha constatado, a excepción del "gran terremoto de Sampacho" de magnitud M 6,0 (1934), que los eventos de mayor energía ocurridos hayan generado rupturas cosísmicas, como los terremotos de Deán Funes de M 6,5 (1908), San Francisco del Monte de Oro de M 6,0 (1936), Villa Giardino de M 5,6 (1947) y Cruz del Eje de M 6,7 (1955).

La sismicidad en la zona de estudio normalmente es moderada-leve y superficial, concentrada principalmente entre las localidades de Achiras y Sampacho en donde la cantidad de sismos registrados entre los años 1826 y 2005 supera los 130. Si bien la mayoría de los sismos son de magnitud  $M \leq 3,0$ , se han registrado al menos seis que han sido mayores a M 4,0 (Fig. 3). Esta región fue epicentro en el mes de junio de 1934 de una de las crisis sísmicas de intraplaca más importantes acontecidas en Argentina, con la ocurrencia de dos terremotos destructores considerados de los más fuertes registrados dentro de la zona de peligrosidad reducida de Argen-



**Figura 3:** Mapa de las principales fallas y de distribución de sismos corticales, históricos, con epicentros en la región centro-sur de Córdoba y centro-norte de San Luis, y ubicación de la zona de estudio presentada en la figura 1. Los tonos de grises usados dentro de los círculos indican la profundidad hipocentral y el número adyacente al epicentro indica el año de ocurrencia.

tina, definida por el Instituto Nacional de Prevención Sísmica (Sagripanti *et al.* 2001).

La crisis del año 1934 comprendió dos terremotos destructores superficiales espaciados por un intervalo de tres horas y más de cien réplicas en las 24 horas siguientes, que destruyeron el 90% de la localidad de Sampacho. La magnitud del sismo inicial fue M 5,5 y del principal M 6,0, cuya intensidad alcanzó VIII-IX grados en la escala Mercalli Modificada (MM). Estos terremotos fueron percibidos en localidades distantes ubicadas en las provincias de Córdoba, La Pampa, Santa Fe y San Luis (Olsacher 1935, Castano 1977).

### 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, es la falla Las Lagunas la que ofrece condiciones morfológicas, litológicas y estructurales, sobresalientes para ser abordada por un estudio más detallado, tendiente a caracterizar y reconstruir su pasado sísmico.

**Metodología aplicada en la selección de sitios para la apertura de trincheras**  
La metodología aplicada para la selección

de sitios donde se desarrollaron los estudios paleosismológicos comprendió los criterios sismológicos, estratigráficos, geomorfológicos y geológicos propuestos por Philip y Meghraoui (1983), Mc Calpin (1996), Pantosti (1997) y Costa (2004), algunos de los cuales se resumen a continuación.

La metodología aplicada incluyó varias etapas: a) análisis e interpretación de fotos aéreas (escala 1: 60.000) y de cartas topográficas (escala 1:50.000); b) relevamiento de la escarpa de falla por medio de la toma de fotos oblicuas a baja altura con incidencia solar de bajo ángulo; c) prospección del subsuelo aplicando métodos geofísicos (SEV, tomografías eléc-

tricas y perfiles gravimétricos de detalle), complementando estos estudios con sondeos mecánicos (SPV); d) relevamiento detallado (*logging*) del perfil de las trincheras; e) interpretación de la información relevada; f) caracterización y estimación de parámetros sobre la base de las deformaciones y desplazamientos relevados.

Los resultados obtenidos permitieron seleccionar dos sitios en la Estancia Vieja para la apertura de trincheras ubicadas sobre la traza de la falla Las Lagunas. Estos sitios ofrecen las mejores posibilidades debido a la expresión morfológica de la falla, a la presencia de sedimentos susceptibles a preservar evidencias de deformaciones y a las diferencias en los valores de resistividad de los materiales del subsuelo. Las trincheras denominadas Vado Arroyo del Gato (T1) de 9 m de largo, 2 m de ancho y 4 m de profundidad, y Estancia Vieja (T2) de 38 m de largo, 3 m de ancho y 1,5 m de profundidad, se abrieron transversales a la traza de la falla, con una orientación aproximada de 120° N. Una vista general de la trinchera T2 se presenta en la figura 4.

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 *log* fotográfico de cada celda con una cámara convencional. Con las fotos obtenidas, en soporte papel, se organizó un fotomosaico sobre el cual se dibujó el *sketch* de las estructuras y contactos entre unidades, que posteriormente fueron digitalizados.

Se realizó la superposición de los perfiles de las dos trincheras, aumentando así la superficie analizada, aprovechando la proximidad espacial entre las trincheras y también que la unidad litológica cuspidal de la T1 es la misma que la unidad basal de la T2. Por lo tanto, 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 (retrodeformación). Si bien la trinchera T2 tiene una longitud de 38 metros en este análisis solo se consideró el perfil de la pared N entre los m11-30, debido a que es el sector corre-



**Figura 4:** Vista general de la trinchera T2, Estancia Vieja, excavada en sedimentos cuaternarios perpendicular a la escarpa de la falla Las Lagunas.

lacionable con la trinchera T1 y donde se concentran la mayor cantidad de evidencias de deformaciones (Fig. 5). Por lo tanto el m0 de la T1 coincide con el m11 de la T2 y la diferencia de altura entre el origen de las escalas verticales (0 m) de ambas trincheras es de 2,55 metros. En el plano horizontal la T2 se ubica aproximadamente a 60 metros al noreste de la T1, considerados a lo largo de la traza de la falla.

#### Descripción del perfil litológico de las trincheras T1 y T2

*Unidad UA:* Basamento ígneo-metamórfico. En algunos sectores se reconocieron evidencias de cizallamiento como litoclastos angulosos y harina de falla, principalmente en la roca metamórfica.

*Unidad UB:* Arenas finas de color pardo con abundantes micas, su potencia supera los 3,0 m. Esta unidad es equivalente a la Formación Alpa Corral, de edad pliocena-pleistocena (Cantú 1992).

*Unidad UC:* Limos arenosos muy finos de color pardo claro a pardo amarillento con carbonatos, entoscados. Corresponden a la Formación Pampeano del Pleistoceno medio-superior (Cantú 1992), de origen fluvial y palustre y 0,8 m de potencia.

*Unidad UC1:* Limos arenosos muy finos de color pardo rojizo. Corresponden a la Formación Pampeano del Pleistoceno medio-superior (Cantú 1992), de origen eólico y 0,65 m de potencia.

*Unidad UD:* Arena fina limosa, con pequeños litoclastos (tamaño arena media), de origen fluvial y de 0,6 m de potencia. Es

equivalente a la Formación Chocancharava del Pleistoceno superior (Cantú 1992).

*Unidad UD1:* Arena muy fina limosa con intraclastos entoscados y litoclastos con sus ejes mayores subverticales, conformando cuñas verticales de relleno. Se considera a esta unidad como una fábrica de cizalla.

*Unidad UE:* Arenas muy finas limosas de color pardo claro, que corresponden a la Formación Laguna Oscura de edad 3.700 a AP, datación TL (Cantú 1992), de origen eólico y más de 4 m de potencia.

*Unidad UF:* Arcillas de origen lagunar con laminación plano paralela, alcanza dentro de la trinchera una potencia de 0,7 m. La edad radiocarbónica convencional de su base es de  $2.820 \pm 60$  a AP (muestra LP-1468).

*Unidad UF1:* Arcillas de origen lagunar no laminadas, su potencia es de 0,15 m. La edad radiocarbónica convencional de su base es de  $1.780 \pm 50$  a AP (muestra LP-1499).

*Unidad UG:* Limo arenoso fino, se encuentra intercalada con los niveles lagunares de las UF y UF1.

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

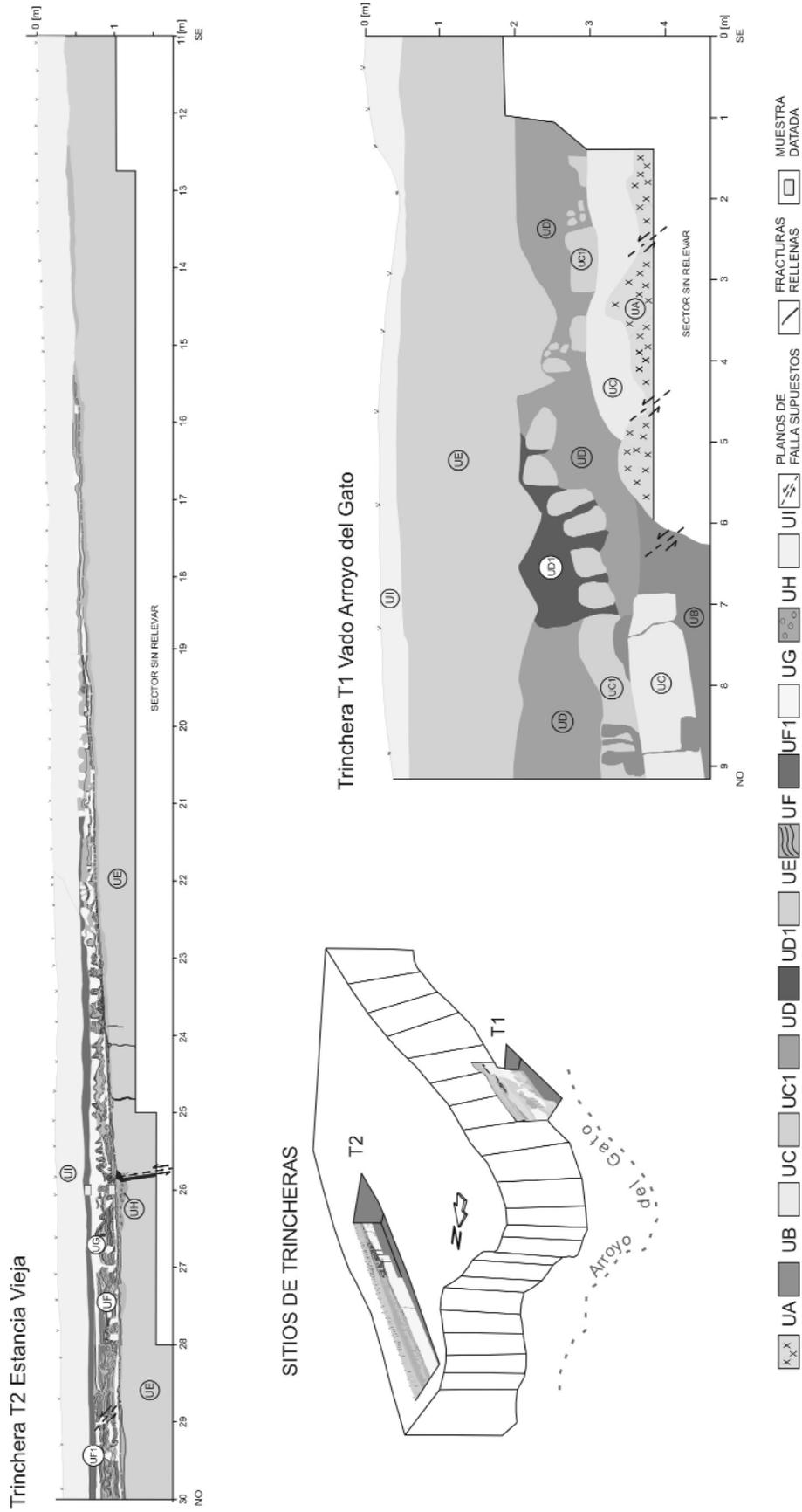
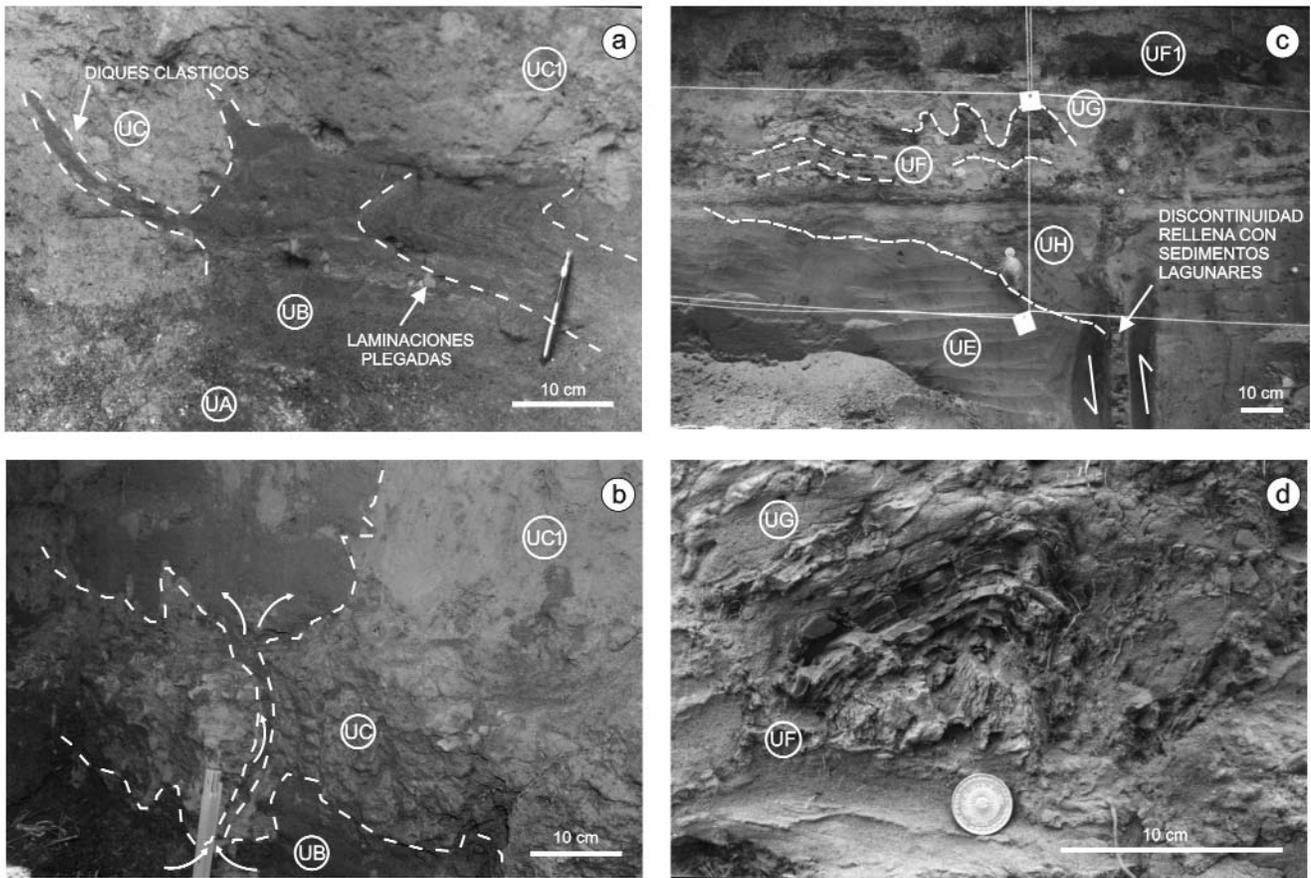


Figura 5: Sitio de ubicación de las trincheras T1 - T2 y log de la pared norte de las mismas.



**Figura 6:** 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 (T1); b) Cráter de arena (T1); c) Propagación de plano de falla secundario en el loess, cuña coluvial y pliegues en sedimentos lagunares (T2) y d) Pliegues en sedimentos lagunares con vergencia hacia el bloque hundido (T2).

centimétrica.

**Unidad UI:** Relleno moderno conformado por limos finos edafizados, que en el bloque elevado posee materia orgánica y bioturbaciones, mientras que en el bloque hundido es más arcilloso. El aporte de arcillas es de origen palustre o lagunar somero.

### Estructuras relevadas 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 considera que son "sismitas".

#### *Estructuras generadas por licuefacción de arenas finas*

**Pliegues:** En la unidad UB, trinchera T1, 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 licuefacción que poseen (Fig. 6a).

**Diques clásticos:** En la trinchera T1 se identificaron diques clásticos que están atravesando a la UC, entoscada y 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 y pequeños intraclastos que ha incorporado de la UC. Estas estructuras se consideran impor-

tantes evidencias de paleolicuefacción cosísmica (Fig. 6a).

**Cráteres y volcanes de arena:** La unidad UC presente en la trinchera T1 es considerada impermeable por el grado de cementación que posee y, entre los m4-7, tiene una importante discontinuidad lateral coincidente con un escalón del zócalo al que sobreyace. 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 UB. Posiblemente estos materiales saturados han sido movilizados e inyectados hacia arriba por el desplazamiento del agua a presión, incorporando en su movimiento intraclastos de las unidades UC y UC1, formando estas estructuras de paleolicuefacción cosísmicas (Fig. 6b).

### Estructuras deformacionales

**Planos de ruptura y fallas:** En la trinchera T2, entre m 23-27, se reconocieron varias fracturas de tensión y planos de ruptura paralelos, rellenos y sellados con sedimentos lagunares. Entre estos planos el de mayor expresión está ubicado en el m26, tiene continuidad a lo largo de su rumbo ya que atraviesa la trinchera de pared a pared y, es subparalelo al de la falla (034° N), e inclina 80° hacia el bloque elevado. Asociada a esta ruptura se reconoció una cuña coluvial cuya potencia permitió estimar el desplazamiento vertical del evento que la generó e interpretar, en la UE, un desplazamiento inverso. Se supone que esta ruptura correspondería a la propagación de un plano de falla, secundario, inverso (Fig. 6c).

**Pliegues de arcillas lagunares:** Se identificaron en ambas paredes de la trinchera T2 niveles lagunares (UF) plegados, concentrados entre los m20-30 (Fig. 6d). Las estructuras de deformación postdeposicional son, en su mayoría, anticlinales inclinados (hacia el bloque hundido) y, en algunos casos, volcados con despegues (*décollement*). Asociadas a estas deformaciones presentes en sedimentos subacuáticos, se reconocieron fallas normales e inversas de escala mesoscópica y planos de cizalla subhorizontales, *décollement*, que ponen en evidencia desplazamientos horizontales.

La concentración de estas deformaciones dúctiles y frágiles, tanto en las unidades lagunares como en la unidad loessoide, indican el sector de *ground shaking* de la falla, donde también se reconoce la propagación de un plano secundario de la misma. Se supone que el disparador que generó estas deformaciones ha sido el *shock* producido por la ocurrencia de un fuerte paleoterremoto.

### Paleosismicidad, retrodeformación e intervalo de recurrencia

#### Interpretación de eventos

- Se interpretó que el zócalo cristalino fue dislocado por al menos un evento hipotético, denominado Ev1, ocurrido con anterioridad al límite plioceno-pleistoceno, que se estima, generó un importante

rechazo vertical en la falla.

- Posteriormente se depositaron los sedimentos pertenecientes a la unidad UB (Formación Alpa Corral), considerándose la base de esta unidad como horizonte de evento, denominado He1.

- Continúa el período de sedimentación con la depositación de las unidades UC-UC1 (Formación Pampeano) y UD (Formación Chocancharava). Estas unidades son dislocadas por un segundo evento hipotético (Ev2), 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 contenida en los poros de los sedimentos, generando estructuras de paleolicuefacción asociadas, como volcanes y cráteres de arena, diques clásticos y laminaciones plegadas. Además, asociada a estas estructuras ubicadas en la zona de *ground shaking* de la falla se reconoce una fábrica de cizalla (UD1). Posteriormente se erosiona el techo de las unidades UD y UD1. Esta superficie se considera un horizonte de evento (He2).

- Luego comienza la depositación de la unidad UE (Formación Laguna Oscura), que posteriormente fue afectada por un tercer evento (Ev3) entre los 3.700 y 2.820 a AP, que generó la propagación a la superficie de un plano de falla inverso subvertical, que podría corresponder a un plano secundario de la falla principal. La formación de una protoescarpa monoclinal 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 la UH, se considera a esta unidad una cuña coluvial. 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 UF, cuya edad radio-carbónica es  $2.820 \pm 60$  a AP. Se considera a la base de este nivel de sedimentos lagunares como un horizonte de evento (He3).

- Probablemente, cuando los niveles lagunares alcanzaron una potencia de aproximadamente 0,40 m, fueron afectados por un cuarto evento sismogénico (Ev4), alrededor de 2.000-1.780 a AP. Este evento habría sido el disparador que afectó de manera importante toda la secuencia lagunar, generando pliegues inclinados y volcados con despegues, y fallamiento normal e inverso, todas estas estructuras de escala mesoscópica.

- Con posterioridad comienza un período de erosión y aplanamiento del techo de la UF y la depositación de la UF1 ( $1.780 \pm 50$  a AP). La base de esta unidad se considera un 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 sismogénico (Ev5) ocurrido entre 1.780-1.000 a AP. Este evento habría reactivado la estructura que no llegó a romper en superficie, al menos en esta sección de la falla. Esta deformación (flexura) se relevó en la trinchera T2 entre los m27-30, y se manifiesta con un cambio de pendiente en la unidad UF1, de 3° hacia el bloque hundido y con una diferencia de cota mayor de 0,10 metros.

- Finalmente, tiene ocurrencia otro evento destructor (Ev6) asociado a la falla Las Lagunas, en 1934 (histórico). Si bien no se pudo identificar con claridad deformaciones en los sedimentos no consolidados presentes en los perfiles de las trincheras estudiadas, se logró obtener evidencias que podrían corresponder a este evento en trincheras de exploración abiertas, a escasos kilómetros, en otra sección de la misma falla.

La distribución temporal de los terremotos prehistóricos interpretados se presenta en forma sintetizada en una gráfica (Fig. 7).

#### Retrodeformación

La información obtenida tanto de la in-

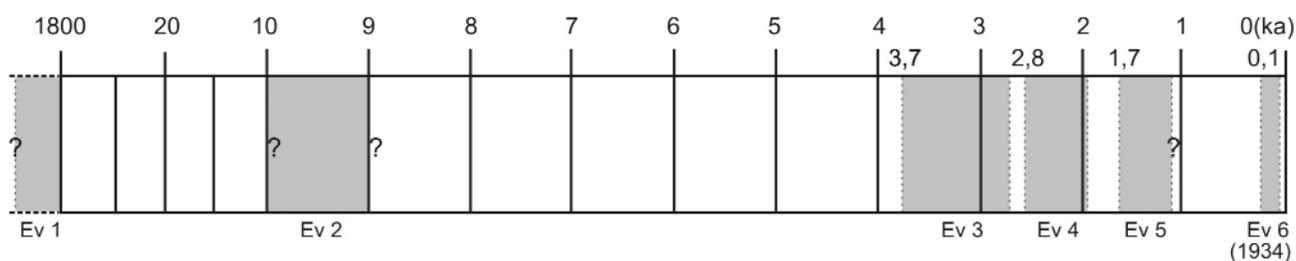


Figura 7: Esquema de la distribución temporal de terremotos prehistóricos interpretados.

interpretación de las unidades litológicas y estructuras, como del número de eventos definidos a partir del estudio de las dos trincheras en forma conjunta, permitieron realizar el análisis hipotético retrospectivo de eventos de fallamiento, retrodeformación (Fig. 8).

#### Determinación del intervalo de recurrencia

El intervalo de recurrencia de fuertes paleoterremotos es uno de los parámetros fundamentales que describe la paleosismicidad de una falla y es un componente crítico de la evaluación del peligro sísmico (Mc Calpin 1996).

Si bien los intervalos de recurrencia de fuertes terremotos en ambientes de intraplaca son prolongados, del orden de cientos y miles de años o más, se pone de manifiesto en algunos casos que la ocurrencia de estos 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).

El intervalo de recurrencia para fuertes paleoterremotos que han tenido ocurrencia en este sector de intraplaca, principalmente para la última parte del Holoceno (desde 4.000 - 3.700 a AP), se estimó considerando el promedio de los terremotos (3-4) interpretados. El valor obtenido es de aproximadamente entre 0,9 y 1,2 Ka.

#### Estimación de paleomagnitudes

Se considera que la magnitud de un paleoterremoto es uno de los más importantes, entre los parámetros necesarios para determinar el potencial sísmogénico de una falla. La escala de magnitud  $M_s$  es ampliamente usada y considerada para grandes terremotos destructores (Reiter 1988).

El desplazamiento cosísmico de la falla es uno de los parámetros que puede ser usado en la estimación del tamaño de un terremoto. Examinar el desplazamiento máximo o el promedio de eventuales paleosismos que usualmente se manifiestan como superficies de rupturas o deformaciones asociadas, permite escalar el tamaño del terremoto por medio de fórmulas empíricas (Bonilla *et al.* 1984).

Otro método para estimar el tamaño de terremotos es el propuesto por Wells y Coppersmith (1994), que determinan la magnitud del momento sísmico ( $M_w$ ) considerando el desplazamiento promedio.

A partir de la información relevada de las trincheras, que permitieron interpretar el número de eventos, se decidió realizar la estimación de la paleomagnitud correspondiente al evento Ev3, dado que es el interpretado con mayor certidumbre. Para éste se calculó la  $M_s$  y  $M_w$  por medio de fórmulas empíricas utilizando una evidencia cosísmica primaria, el desplazamiento vertical del evento.

Se determinó que la componente vertical del desplazamiento fue de 0,30 m (rechazo medido en el *log*). Esta coincidió con la calculada a partir de la potencia de la 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.

El cálculo de las magnitudes  $M_s$  y  $M_w$  por medio de fórmulas empíricas es el siguiente:  $M_s = 7,0 + 0,78 \times (\text{Log } D_{\text{máx}})$ , donde D es el desplazamiento máximo en metros (Bonilla *et al.* 1984), y  $M_w = 6,93 + 0,82 \times \text{Log } (D)$ , donde D es el desplazamiento en metros (Wells y Coppersmith 1994). La magni-

tud obtenida es  $M_s$  6,6 y la magnitud del momento sísmico  $M_w$  6,6.

## CONCLUSIONES

Las evidencias cosísmicas relevadas en las trincheras como estructuras de deformación posdeposicionales en sedimentos no consolidados, estructuras de paleoliquefacción, desplazamientos y rasgos morfológicos superficiales, revelan la ocurrencia de fuertes paleoterremotos en este sector de intraplaca para la última parte del Holoceno.

Las estructuras de escala mesoscópica reconocidas en los sedimentos cuaternarios confirman la continuidad de las deformaciones pliocenas-pleistocenas en el Holoceno, en este sector de intraplaca, poniendo en evidencia la actividad cuaternaria tardía de la falla Las Lagunas.

La información obtenida sobre la paleosismicidad de la región permite extender la continuidad temporal del registro sísmico de la falla Las Lagunas y posibilita avanzar en la caracterización de su potencial sísmogénico.

Los eventos ocurridos en los últimos 3.700 años, que fueron interpretados con mayor certidumbre, indican que es un período de mayor actividad de la falla, considerándose que esta tendencia podría responder a un patrón de agrupamiento (*clustering*) temporal de terremotos.

El intervalo de recurrencia de fuertes terremotos estimado para la falla Las Lagunas para los últimos 3.700 años es de aproximadamente entre 0,9 y 1,2 Ka.

La importante desconexión de la paleored de escurrimiento superficial, el emplazamiento de lagunas alineadas y la aparición de depósitos de sedimentos lagu-

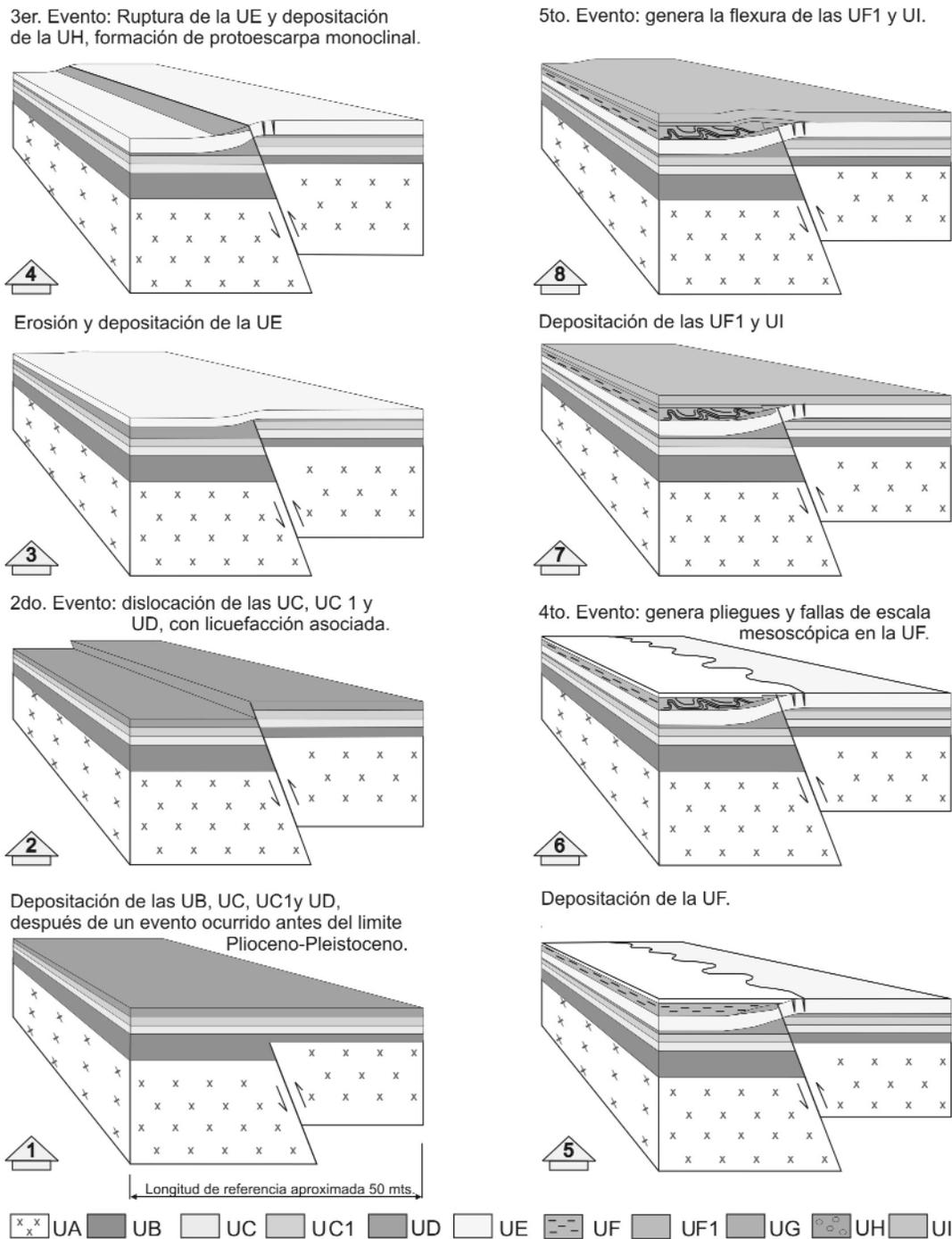


Figura 8: Esquema del modelo de reconstrucción de eventos de fallamiento, retrodeformación, de la trinchera T1 y T2, basado en las unidades descriptas correspondientes a la falla Las Lagunas.

nares de importante potencia permiten inferir que corresponderían a la primera imposición importante de la protoescarpa de la falla Las Lagunas en el relieve, entre los 3.700 y 2.800 a AP. Las características de las deformaciones

cosísmicas relevadas en este ambiente compresivo, asociadas a la actividad cuaternaria de la falla Las Lagunas permiten plantear que, para este sector de intraplaca la magnitud de los paleoterremotos ha sido  $M=6,6$ .

Asumiendo que el levantamiento y las deformaciones en el basamento del antepaís pampeano durante el Mioceno, Plioceno y Cuaternario, entre los 28° y 33°S, son controlados por la subducción horizontal; las distintas características de la

falla Las Lagunas (las morfologías superficiales, el intervalo de recurrencia, la sismicidad superficial y las deformaciones neógenas con continuidad en el Holoceno) se suponen consistentes con la deformación del basamento del antepaís. Sobre la base de lo planteado por Costa (2004) en relación a las perspectivas de los estudios paleosismológicos en Argentina, se considera oportuno comentar que la información obtenida en este trabajo hace una contribución a la caracterización de los valores umbrales de los terremotos morfogénicos para las Sierras Pampeanas de San Luis y Córdoba. Como así también que los valores de magnitud determinados para la actividad cuaternaria de la falla Las Lagunas ( $M=6,6$ ), confirman el supuesto de que la magnitud de los terremotos prehistóricos de intraplaca a los 33°S es superior a los valores históricos registrados.

#### AGRADECIMIENTOS

Al Dr. Carlos Costa por su orientación, transferencia de conocimientos y experiencia para el emprendimiento de las investigaciones paleosismológicas desarrolladas en esta región de intraplaca.

#### TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

- Aguilera, 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. 4° Congreso de Geofísica de la Sociedad Cubana de Geología. Actas CD: 6p., La Habana.
- 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.
- 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.
- Bucknam, R.C. y Anderson, R.E. 1979. Estimation of fault-scarp ages from a scarp-height-slope-angle relationship. *Geology* 7: 11-14.
- Cantú, M.P. 1992. El Holoceno en la provincia de Córdoba. *Holoceno de la República Argentina*. Cadinqua, 1: 1-16, Paraná.
- Castano, J.C. 1977. Zonificación sísmica de la República Argentina. Instituto Nacional de Prevención Sísmica. Publicación Técnica 5, 42 p., San Juan.
- Costa, C.H. 1996. Análisis neotectónico en las Sierras de San Luis y Comechingones: Problemas y métodos. 13° Congreso Geológico Argentino y 3° Congreso de Exploración de Hidrocarburos, Actas 2: 285-300.
- Costa, C.H. 2004. ¿Microtectónica en el Cuaternario?: Métodos y aplicaciones de la paleosismología. 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(12): 1127-1130.
- 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.
- 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: 1-22.
- 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., Isacks, B., Ramos, V.A. y Allmendinger, R.W. 1983. Mountain building model: The Central Andes. *Episodes* 1983(3): 20-26.
- 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. 5° 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: B1-B29.
- Massabié, A.C. 1987. Neotectónica y sismicidad en la región de Sierras Pampeanas Orientales, Sierras de Córdoba, Argentina. 10° Congreso Geológico Argentino, Simposio de Neotectónica, Actas 1: 271-274, Tucumán.
- 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 Szlafsztejn, 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. INPRES. 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, México.
- Montenat, C., D'Estevou, P., Barrier, P. y Paturel, D. 1993. Les séismites, essai de typologie génétique. *Geochronique* 46: 15-17.
- Olsacher, J. 1935. El terremoto de Sampacho, Pcia. de Córdoba. *Revista del Museo de Ciencias Naturales*, Año 1(1), 19 p., Córdoba.

- Pantosti, D. 1997. Modern approach in paleoseismology. Historical and prehistorical earthquakes in the Caucasus. NATO ASI Series, 21 p.
- Pantosti, D. y Yeats, R.S. 1993. Paleoseismology of great earthquakes of the late Holocene. *Annali di Geofisica* 36: 237-257.
- 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.
- 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.
- 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. 3° 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 Geoscience* (Summer 1998) 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. 4° Congreso de Geología y Minería de la sociedad Cubana de Geología, GEOMIN 2001, 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. 16° Congreso Geológico Argentino, 4: 457-462, La Plata.
- 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.
- 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.
- 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.

Recibido: 18 de noviembre, 2008

Aceptado: 22 de septiembre, 2009