



Avances en la valoración del peligro sísmico en fallas con actividad cuaternaria. Sierras Pampeanas de Córdoba

Advances in seismic hazard assessment in faults with quaternary activity. Sierras Pampeanas of Cordoba

Sagripanti, Guillermo¹ ✉ - Villalba, Diego¹ - Villegas, Mónica¹ - Castaldi, Gimena¹ - Benito, Eugenia¹ - Muratore, Noelia¹

Recibido: 22 de agosto de 2013 • Aceptado: 02 de abril de 2014

Resumen

En la región de intraplaca donde se ubican las provincias de Córdoba y San Luis, se encuentran fallas con probada actividad cuaternaria (Sierra Chica, El Molino y Las Lagunas), de las que, hasta el presente, sólo se conoce parcialmente el potencial sismogénico asociado, por lo tanto esta situación no permite hacer una valoración realista del riesgo sísmico.

Esta contribución tiene por objetivo presentar el estado de avance sobre el conocimiento de la actividad cuaternaria con énfasis en el peligro sísmico asociado a fallas sismogénicas ubicadas en la región central de Argentina.

Los avances logrados hasta el presente en investigaciones neotectónicas y paleosismológicas en fallas sismogénicas y cuyos resultados han sido integrados y analizados en este trabajo, permitieron interpretar que las mismas han tenido una importante actividad paleosísmica durante tiempos pleistocenos y holocenos, y valorar el peligro sísmico asociado.

Una aproximación determinística a la evaluación del peligro sísmico de estas fallas, ha permitido estimar la paleomagnitud y la magnitud máxima posible, cuyos valores son del orden de M 6,5 y M_w 7,5, siendo estos superiores a los del registro histórico de la región, como también coincidentes con el umbral de magnitud ($M \geq 6,5$) propuesto para las Sierras Pampeanas.

Estos valores están indicando que el potencial sismogénico de estas estructuras es muy importante y que está siendo subestimado, por lo que las aceleraciones al pico del suelo esperadas pueden ser ampliamente excedidas durante un fuerte terremoto futuro.

Palabras Claves: Terremoto, falla, intraplaca, paleomagnitud, región central de Argentina.

Abstract

In the intraplate region where is located the provinces of Cordoba and San Luis, faults found with proven quaternary activity (Sierra Chica, El Molino and Las Lagunas), up to that this is only partly known the seismogenic potential associated, therefore this situation does not allow for a realistic assessment of the seismic risk.

1. Universidad Nacional de Río Cuarto. Ruta Nacional Nº 36, km 601. CP 5800. Córdoba.

✉ gsagripanti@exa.unrc.edu.ar

This contribution goal to present the status of progress in the knowledge of the Quaternary activity with emphasis on seismic hazards associated with active faults located in the central region of Argentina.

The progress made so far in research neotectonic and paleoseismological in active faults, whose results have been integrated and analyzed in this work, made it possible to interpret that the same have been an important activity paleoseismic during Pleistocene and Holocene times, and assess the seismic risk associated.

A deterministic approximation in the evaluation of the seismic hazard of these faults, has made it possible to estimate the paleomagnitude and the maximum magnitude possible, whose values are of the order of $M 6.5$ and $M_w 7.5$, these being higher than the historical record of the region, as also are coincident with the magnitude limit ($M \geq 6.5$), proposed for the Sierras Pampeanas.

These values are indicating that the seismogenic potential of these structures is very important and that is being underestimated. The accelerations to the peak of the soil can be widely expected exceeded during a strong earthquake future.

Keywords: Earthquake, fault, intraplate, paleomagnitudes, central region of Argentina.

INTRODUCCIÓN

El aumento de la población mundial que se traduce en el incremento de las superficies urbanizadas, como así también la ocupación de territorios hasta el momento deshabitados, trae consigo la mayor probabilidad que, ante la ocurrencia de un fenómeno natural como un terremoto, se generen catástrofes debido a la falta de planificación y del conocimiento de base para efectuar adecuadamente la misma.

Las zonas sísmicamente activas están concentradas en los bordes de placas tectónicas donde la ocurrencia de terremotos fuertes es más frecuente y por lo tanto son las más estudiadas, mientras que, en las zonas de intraplaca donde este tipo de manifestación es menor y de inferior magnitud, hasta hace unos años, se les ha prestado menor atención.

En zonas de intraplaca el "ciclo sísmico" de las fallas sísmogeneradoras, durante el cual la estructura acumula energía elástica que posteriormente se libera en forma repentina produciendo terremotos es muy prolongado. Esto genera una ventana temporal muy amplia sin registros de sismicidad. En estas zonas los períodos de recurrencia de fuertes terremotos son extendidos y los registros sísmicos, históricos e instrumentales, no proveen la información suficiente para conocer el comportamiento que tendrá una estructura en el futuro. Esta situación no permite realizar una valoración realista del peligro sísmico.

En algunas de estas zonas la microsismicidad es frecuente y genera en las personas y autoridades una actitud de despreocupación que lleva a un estado de negación sísmica que se traduce en un aumento de la vulnerabilidad y, con éste, del riesgo asociado.

Desde hace algunos años se viene prestando mucha atención al comportamiento de las fallas de intraplaca debido a la ocurrencia de fuertes terremotos con epicentro en zonas sin actividad sísmica previa. Esto prueba la importante capacidad sísmogénica en estas estructuras, en las que la sismicidad no permite hacer una valoración o estimación del peligro sísmico asociado (Costa, 2004). Esta manifestación, en apariencia asísmica, adquiere mayor peligrosidad y trascendencia, en términos de riesgo sísmico, si la vulnerabilidad de los centros urbanos emplazados en la zona epicentral es alta debido a que la construcción edilicia puede ser poco resistente o débil, a la falta de

concientización de la población y la escasa capacidad de respuesta de los equipos de socorro (Sagripani et al. 2009; Sagripani et al. 2011).

Es oportuno pronunciar un pensamiento del profesor Robert Yeats, especialista en geología de terremotos, que, 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", en las investigaciones neotectónicas y principalmente las paleosismológicas, se considera que "el pasado es la llave del futuro".

Es por ello que las investigaciones neotectónicas y paleosismológicas junto a la geología de terremotos se han convertido en disciplinas fundamentales para interpretar la ocurrencia de fuertes paleoterremotos y estimar su magnitud, longitud de ruptura, desplazamiento cosísmico, etc. En la actualidad se considera que esta información es de base para hacer una aproximación sobre el peligro sísmico asociado a fallas sísmogeneradoras y permite pronosticar el comportamiento futuro de las mismas.

Se considera que durante el Mioceno-Plioceno y Cuaternario el levantamiento y la deformación del basamento de las Sierras Pampeanas entre los $27^{\circ} 30' - 33^{\circ} 30'$ de LS, están condicionados por la subducción subhorizontal de la placa de Nazca (Jordan et al. 1983; Jordan y Almendinger, 1986; Costa y Vita Finzi, 1996; Ramos, 1999; Smalley et al. 1993; Ramos et al. 2000; Ramos et al. 2002). Algunas manifestaciones del comportamiento de la placa entre estas latitudes son la actividad sísmica superficial, moderada a fuerte; la ausencia de actividad volcánica, la distribución de los focos de los terremotos (Pilger, 1981; Ramos et al. 2002; Alvarado et al. 2005; Richardson et al. 2012); la paleosismicidad y la presencia de numerosas evidencias de deformaciones neógenas asociadas a fallas con probada actividad cuaternaria (Sagripani et al. 2011; Sagripani et al. 2012).

Los resultados obtenidos en investigaciones neotectónicas y paleosismológicas desarrolladas en fallas con actividad cuaternaria en las Sierras Pampeanas de Córdoba están indicando que las mismas han tenido actividad desde tiempos Plio-pleistocenos hasta el Holoceno inclusive donde, en algunos casos, se ha interpretado un patrón de agrupamiento de paleoterremotos (clustering) durante el Holoceno tardío. Esta actividad ha sido acompañada por la ocurrencia de fuertes terremotos

superficiales que habrían alcanzado la magnitud (Richter) $M \geq 6,5$. Sin embargo, el potencial sismogénico asociado a estas estructuras es parcialmente conocido en el presente (*Sagripanti et al. 2011*).

La información que aportan las deformaciones cuaternarias, a través de las investigaciones paleosismológicas, ya sea por medio del logging de perfiles de trincheras como a través del relevamiento de las morfologías superficiales (escarpas, pequeñas escarpas, basculamiento de niveles sedimentarios y de paleosuperficies de erosión, etc.) asociadas a fallas sismogénicas, se considera la llave para entender el comportamiento de estas estructuras y pronosticar fuertes terremotos.

En la actualidad se considera, sobre la base de los reportes históricos de terremotos morfogénicos, que si bien en Argentina aun no se han precisado los valores umbrales para las distintas regiones sísmicas, de acuerdo a antecedentes históricos el valor umbral probable para las Sierras Pampeanas es de $M \geq 6,5$ (*Costa, 2004*).

Si bien existen numerosos antecedentes de investigaciones neotectónicas y paleosismológicas que han aportado información para la parametrización sismogénica de algunas fallas utilizando datos y aproximaciones empíricas (paleomagnitud, longitud de ruptura, recurrencia, etc.), en la actualidad los resultados de estos trabajos no han sido analizados en forma integral, de manera que permitan conocer el potencial sismogénico de una fuente de forma más precisa.

El objetivo de esta contribución es presentar el estado de avance sobre el conocimiento de la actividad cuaternaria, a través de un análisis integral, con énfasis en el peligro sísmico asociado a fallas sismogénicas ubicadas en la región central de Argentina y que sirvan de base para futuros planes de ordenamiento o planificación territorial.

Las fallas consideradas objeto de análisis en la presente contribución son: tres secciones de la falla Sierra Chica ubicadas en el borde occidental de la sierra homónima; la falla El Molino cuya traza se encuentra en el pedemonte del faldeo occidental de la sierra de Comechingones y la falla Las Lagunas ubicada entre la localidad de Sampacho y el extremo austral de la sierra de Comechingones (Figura 1).

ANTECEDENTES

En las regiones de intraplaca, donde la recurrencia de sismos puede ser de varios miles de años, la estructura que registra movimientos más recientes no suele ser la más peligrosa en términos de mayor probabilidad de ocurrencia de un evento sísmico (*Costa, 2004*). En estas regiones, donde se dispone de escasa información sismológica y las fallas presentan evidencias poco claras de deformaciones recientes en superficie, los datos obtenidos por medio de estudios paleosismológicos posibilitan la reconstrucción de la sismicidad prehistórica de las mismas (*Bonilla, 1988; Mc Calpin, 1996*). En estas áreas es prioritario, en la actualidad, el conocimiento del potencial sismogénico de fallas con actividad cuaternaria y del riesgo sísmico de poblaciones y obras de infraestructura ubicadas en las mismas, lo cual depende de los avances que se logren con las investigaciones paleosismológicas.

El sector centro sur de las Sierras Pampeanas de Córdoba se encuentra intensamente fracturado y está principalmente controlado por dos estructuras regionales que limitan los bordes occidentales de la sierra de Comechingones y el de la Sierra Chica. Aquí, las evidencias de deformaciones cuaternarias son

aisladas, de escasa extensión superficial y expresan el estilo de la tectónica andina regional, que consiste en fallas inversas lítricas generalmente buzantes al E, ubicadas marginalmente a bloques levantados y basculados del basamento cristalino (*Costa, 1999*).

Con relación a la geometría de estas estructuras en profundidad existen numerosas contribuciones. Una de las interpretaciones realizadas a partir de estudios gravimétricos es que estas fallas tienen su superficie de despegue alrededor de 33 km de profundidad (*Introcaso et al. 1987*). Estudios recientes basados en la sismicidad actual (*Richardson et al. 2012; Perarnau et al. 2012*), que posibilitan determinar estructuras activas y su geometría en profundidad, han permitido interpretar el modelo estructural para las Sierras Pampeanas de Córdoba. De acuerdo a los desplazamientos intracorticales inferidos, estos autores sugieren que son estructuras con movimiento inverso, expuestas en superficie, que corresponden a fallas principales preexistentes de la corteza. Asociada a éstas se ha reconocido una zona de sismicidad horizontal entre los 15 y 27 km de profundidad lo cual indica la posición de la superficie de despegue y permite interpretar que estas fallas poseen una geometría lítrica.

Según *Alvarado et al. (2005)* la diferencia que existe en la distribución y características de la sismicidad actual dentro de las Sierras Pampeanas puede atribuirse a que la misma está fuertemente controlada por la litología, ya que los Terrenos que conforman el basamento poseen diferentes orígenes.

Se han relevado deformaciones, que son manifestaciones del acortamiento cuaternario, no solo asociadas a los frentes de levantamiento serrano sino también se las reconoce en la llanura, como una expresión de la continuidad de la traza de las estructuras en esta zona, o bien vinculadas a fallas que están ubicadas alejadas de estos frentes de levantamiento (*Sagripanti et al. 2012*). Se considera que la arquitectura de las morfoestructuras correspondientes al cordón de la Sierra Chica de Córdoba, Sierras Pampeanas Orientales, es el resultado de la actividad cenozoica de estructuras que poseen una orientación preferencial meridiana y presentan asociados fallamientos secundarios oblicuos a los anteriores (*Costa y Vita Finzi, 1996*).

Los estudios neotectónicos desarrollados en la falla del frente occidental de la Sierra Chica son numerosos, principalmente en el valle de Calamuchita, donde se reconocen estructuras con movimiento inverso de alto ángulo ($> 50^\circ$ E) que afectan el basamento ígneo-metamórfico de edad Precámbrico-Paleozoico inferior y de bajo ángulo (20° - 30° E) cuyo bloque elevado corresponde al labio bajo de la falla principal de la sierra, que cabalga o sobrecorre a depósitos sedimentarios de edad cenozoica (*Schlagintweit, 1954; Massabie, 1976, 1987; Kraemer et al. 1988; Wagner-Manslau, 1988; Massabie et al. 1991, 2006; Massabie et al. 1999; Costa et al. 2001*).

Otras investigaciones paleosismológicas han sido realizadas en las secciones más australes de la falla de la Sierra Chica y las morfoestructuras relevadas en este sector han permitido inferir que la actividad tectónica neógena ha sido importante y también corroborar la continuidad de su traza hacia el S en la llanura (*Gallo, 2011; Bettioli, 2012; Sagripanti et al. 2012; Santinelli, 2013*).

En el faldeo occidental de la sierra de Comechingones, en el límite de las provincias de Córdoba y San Luis, la actividad tectónica reciente se observa a lo largo de una falla secundaria, de rumbo aproximado NO-SE, denominada El Molino,

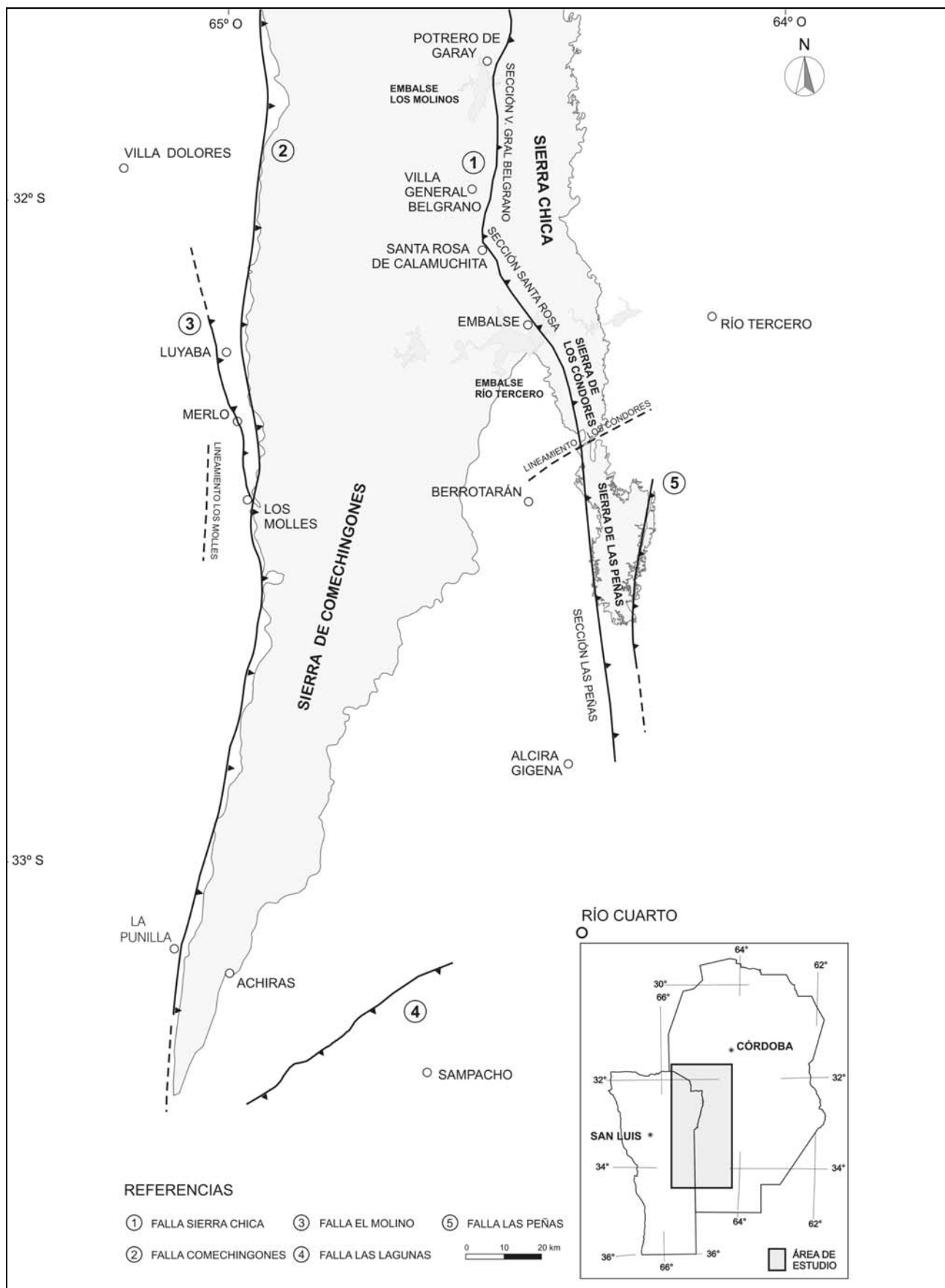


Figura 1. Mapa de ubicación de las fallas con actividad cuaternaria analizadas.

que está ubicada en el pedemonte al oeste del frente de levantamiento serrano que es controlado por la falla Comechingones (Murillo, 1996; Costa y Vita Finzi, 1996; Costa et al. 1999; Costa et al. 2001; Castaldi, 2013).

Los estudios neotectónicos y paleosismológicos desarrollados en el sector ubicado entre el borde suroriental de las sierras de Comechingones y la localidad de Sampacho, falla Las Lagunas, hacen una importante contribución al conocimiento del comportamiento de esta estructura sísmogénica, entre éstos se pueden citar los realizados por Mingorance (1987, 1991), Sagripanti et al. (2001, 2003, 2005, 2009, 2011), Sagripanti (2006), Sagripanti y Villalba (2009, 2011), Seitz (2009), Villalba (2011) y Villalba y Sagripanti (2014).

La evaluación del peligro sísmico asociado a una falla sísmogeneradora, puede ser a través de dos aproximaciones, una determinística y otra probabilística. En la primera se intenta determinar los valores concretos sobre la parametrización sísmogénica de una falla en particular (magnitud de un sismo probable, recurrencia, tasa de movimiento de la falla, etc.), este enfoque normalmente es conservador y útil en regiones donde no se cuenta con una robusta base de datos. En tanto que, el análisis probabilístico trata de integrar a los parámetros asociados a un evento sísmico (aceleraciones, desplazamiento cosísmico, etc.) una probabilidad anual de excedencia en determinados intervalos cronológicos. Este enfoque requiere de una base de datos completa e integrada (Costa, 2004).

La zonificación vigente, de la peligrosidad sísmica de la República Argentina ha sido elaborada solamente sobre la base de la combinación de antecedentes y datos sísmológicos históricos e instrumentales y de la cual resulta un mapa de zonificación que está dividido en cinco zonas, denominadas 0, 1, 2, 3 y 4 que corresponden a peligrosidad muy reducida, reducida, moderada, elevada y muy elevada, respectivamente (Castano, 1977; INPRES-CIRSOC-103, 1983). El área de estudio de la presente contribución abarca parte de las provincias de Córdoba y San Luis, y se ubica dentro de las Zonas de Peligrosidad 1 y 2.

METODOLOGÍA

Si bien, en esta contribución se hace una presentación de los avances de estudios realizados en fallas sísmogeneradoras, se considera necesario mencionar en forma generalizada las distintas metodologías seguidas para sustentar los datos e interpretaciones que se muestran más adelante.

En todos los casos, los estudios, se iniciaron con una etapa de inventario donde se recopilaron y seleccionaron antecedentes geológicos, estructurales, neotectónicos, paleosismológicos, sísmológicos, fotografías aéreas, imágenes satelitarias, mapas, etc.

Se realizaron tres vuelos con toma de fotografías a baja altura y con bajo ángulo de incidencia solar para detectar las deformaciones superficiales y los rasgos más sutiles asociados al fallamiento cuaternario.

Se utilizaron también técnicas geofísicas como sondeos eléctricos verticales, tomografías eléctricas y gravimetría para la ubicación de sitios a excavar.

Sobre la base de la información obtenida por los métodos anteriores se definieron los sitios donde realizar las trincheras principales y de exploración. Estas excavaciones posteriormente se realizaron a pala de mano o mecánica y también se aprovecharon los perfiles de origen antrópico y naturales generados por la disección vertical de la red de drenaje. Complementando esta actividad se realizó el fotologging

correspondiente y la descripción detallada de los niveles estratigráficos y de las deformaciones dúctiles y frágiles reconocidas. En algunos casos se logró obtener muestras para su datación.

Con los datos obtenidos se han realizado determinaciones de algunos parámetros sísmogénicos y aproximaciones determinísticas sobre el peligro sísmico de las distintas estructuras consideradas.

FALLAS SISMOGENERADORAS

Las fallas analizadas en el presente trabajo, de acuerdo a sus particularidades, se pueden dividir en dos grupos: fallas ubicadas próximas a los frentes de levantamientos serranos y al O de los mismos, caracterizadas como corrimientos en el labio bajo, de basamento (precámbrico) intensamente fracturado, sobre depósitos de sedimentos terciarios o cuaternarios y fallas ubicadas en la llanura que afectan principalmente a sedimentos cuaternarios.

Entre las del primer grupo, se abordaron tres Secciones de la falla de la Sierra Chica, denominadas Villa General Belgrano, Santa Rosa y Las Peñas, que están comprendidas entre la localidad de Potrero de Garay al norte y el arroyo Tegua al sur (a la latitud de la localidad de Alcira Gigena); y el brazo de la falla Comechingones denominado falla El Molino ubicada entre las localidades de Luyaba al norte y Los Molles al sur.

En el ámbito de llanura, debido a la importancia que revisten las morfologías superficiales y deformaciones reconocidas en sedimentos cuaternarios se escogió la falla Las Lagunas que se ubica entre la localidad de Sampacho y el extremo austral de la sierra de Comechingones.

Falla de la Sierra Chica

Las estructuras cuaternarias reconocidas en las Sierras Pampeanas de Córdoba, se consideran que son reactivaciones de fracturas preexistentes y en la mayoría de los casos están controladas por anisotropías de la estructura interna del basamento. Las deformaciones se encuentran asociadas a las zonas pedemontanas y se manifiestan como corrimientos del basamento cristalino que afecta a los sedimentos cuaternarios (Massabie y Szlafsztein, 1991; Massabie, 1996; Costa, 1999, 2001; Massabie et al. 2006; Sagripanti et al. 2012).

La falla de la Sierra Chica es una de las más importantes de las Sierras de Córdoba. Su escarpa, que enfrenta al oeste, se extiende por más de 200 km desde la localidad de Capilla del Monte, al norte, hasta el lineamiento Los Cóndores, a la latitud de la localidad de Berrotarán. Posee un rumbo general N-S y buzamiento al E y NE, presentando dos inflexiones, una al sur de la localidad de Villa Carlos Paz y la otra al sur del dique Los Molinos, donde se la reconoce como falla Santa Rosa (Bonalumi et al. 2005; Sagripanti et al. 2012).

Un análisis neotectónico de este fallamiento, entre las localidades de Charbonier y Santa Rosa de Calamuchita, ha permitido interpretar dos eventos tectónicos cenozoicos, uno en el límite Mioceno-Plioceno, caracterizado por fallas inversas de alto ángulo (> 50° E) que afectó al basamento ígneo-metamórfico y el otro interpretado como de edad Pleistoceno medio-superior caracterizado por fallas inversas de bajo ángulo (20° y 30° E), que es considerado como un corrimiento emergente del basamento cristalino, intensamente fracturado, sobre depósitos sedimentarios cuaternarios (Massabie, 1976; Kraemer et al. 1988; Wagner-Manslau, 1988; Massabie y Szlafsztein, 1991; Massabie, 1996; Costa et al. 2001; Bonalumi et al. 2005; Massabie et al. 2006).

Los resultados obtenidos de estudios neotectónicos y paleosismológicos realizados en las tres secciones de la falla (Figura 2) permitieron extender la traza de la falla de la Sierra Chica 37 km hacia el sur en la llanura, desde el lineamiento Los Cóndores hasta el arroyo Tegua. Esta sección de la falla tiene movimiento inverso con posible componente de rumbo sinestral (Sagripanti *et al.* 2012). Las deformaciones reconocidas ponen en evidencia que también este sector de la intraplaca ha estado sometido a episodios de movimientos (Figuras 2a, 2b y 2c) que

han incidido en la evolución del paisaje local. Estas permiten corroborar que el régimen tectónico compresivo actuante en el Cenozoico tiene continuidad en el Holoceno (Sagripanti *et al.* 2012), ya que las estructuras deformacionales relevadas en sedimentos finos cuaternarios (Figura 2d) se han interpretado asociadas a dos paleoterremotos ocurridos en el Pleistoceno superior y Holoceno superior en la sección Las Peñas (Gallo, 2011; Bettiol, 2012; Sagripanti *et al.* 2012; Santinelli, 2013).

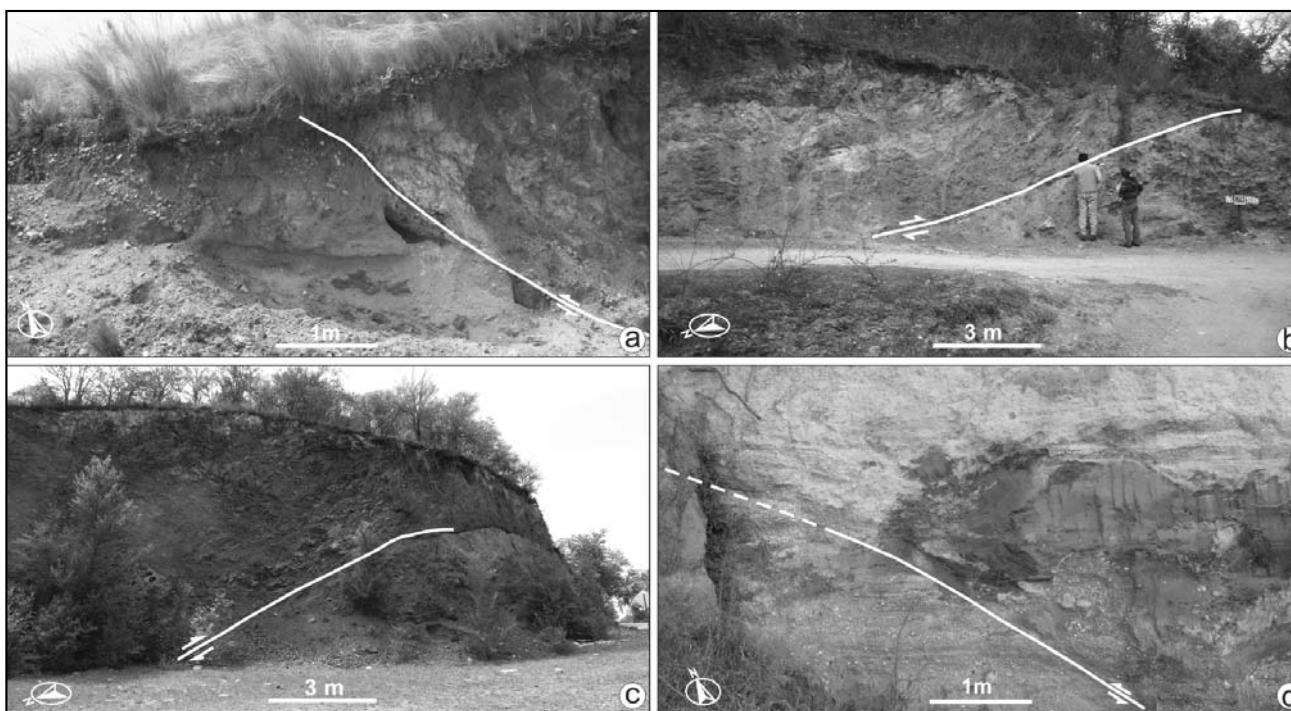


Figura 2. Deformaciones asociadas a la falla de la Sierra Chica: a) perfil Potrero de Garay, b) perfil Villa General Belgrano, c) perfil Santa Rosa, éstos presentan el corrimiento del basamento precámbrico sobre depósitos cuaternarios, y d) perfil arroyo Tegua, falla inversa en sedimentos cuaternarios.

Falla El Molino

Las deformaciones cuaternarias reconocidas en la zona pedemontana de la sierra de Comechingones, al igual que las descritas en la Sierra Chica, están asociadas a fallas inversas que generalmente buzanan al E, que son resultado de la reactivación de fracturas preexistentes y se manifiestan como corrimientos en el labio bajo del basamento cristalino sobre los sedimentos cuaternarios.

Se ha corroborado que la actividad tectónica reciente, en el ámbito de la sierra de Comechingones, no se ubica al pie del frente principal de levantamiento serrano, sino que se reconoce en el pedemonte desplazada hacia sectores occidentales medios y distales del frente serrano y puesta de manifiesto por fallamientos secundarios cuaternarios como la falla El Molino y el lineamiento Los Molles (Castaldi, 2013), coincidente con lo que plantea Costa (1999) sobre la migración de la actividad cuaternaria respecto del frente de levantamiento principal y que es un rasgo que caracteriza a las Sierras Pampeanas de Córdoba.

Las investigaciones neotectónicas y paleosismológicas desarrolladas por Murillo (1996), Costa y Vita Finzi (1996), Costa *et al.* (2001) y Castaldi (2013), han permitido relevar y

caracterizar diversas deformaciones cuaternarias, asociadas a una estructura que presenta las mejores exposiciones y morfologías superficiales, como la falla El Molino.

La falla El Molino, considerada un brazo de la falla de Comechingones, que controla el frente principal de levantamiento serrano, posee un rumbo general NO-SE y buzamiento al E-NE (25° - 50°). Esta estructura es la que presenta las evidencias más claras de deformaciones modernas en el ámbito de este sistema a esta latitud, y están expresadas como un importante corrimiento con vergencia occidental (Murillo, 1996; Costa *et al.* 2001; Castaldi, 2013). Su traza resaltada por morfologías superficiales se puede reconocer desde la localidad de Los Molles, al S, hasta aproximadamente la ciudad de Villa Dolores, alcanzado una longitud de 50 km.

La información paleosismológica obtenida por Murillo (1996) y Costa *et al.* (2001) complementada por estudios recientes mediante la descripción de siete perfiles de trincheras, en los cuales se han relevado evidencias primarias como desplazamientos cosísmicos por evento, desplazamientos de inclinación (Figuras 3a y b) y evidencias secundarias o indirectas como escarpas, disección de abanicos y el basculamiento de

niveles de sedimentos cuaternarios y de paleosuperficies de erosión en el sentido opuesto a la pendiente regional, ha permitido obtener valiosa información sobre la actividad cuaternaria de la falla (*Castaldi, 2013*).

Estos estudios han logrado determinar un desplazamiento cosísmico de 0,41 m y un desplazamiento de inclinación de al menos 3 m, permitiendo interpretar la ocurrencia de numerosos eventos paleosísmicos que, durante el Pleistoceno superior-Holoceno superior, habrían generado una ruptura unitaria superficial de aproximadamente 35 km (*Castaldi, 2013*).

Falla Las Lagunas

En proximidades de la localidad de Sampacho a la latitud $33^{\circ}30'S$, sector sur de la provincia de Córdoba, se ubica la falla Las Lagunas. Esta estructura, con probada actividad cuaternaria, posee importantes antecedentes sísmicos prehistóricos, históricos y actuales. El registro histórico más importante es el de la ocurrencia del Gran Terremoto de Sampacho de magnitud (Richter) M 6,0. La actividad sísmica de la misma es frecuente y se manifiesta mediante sismos de alrededor de M 3,0 (*Sagripanti, 2006; Sagripanti et al. 2009*).

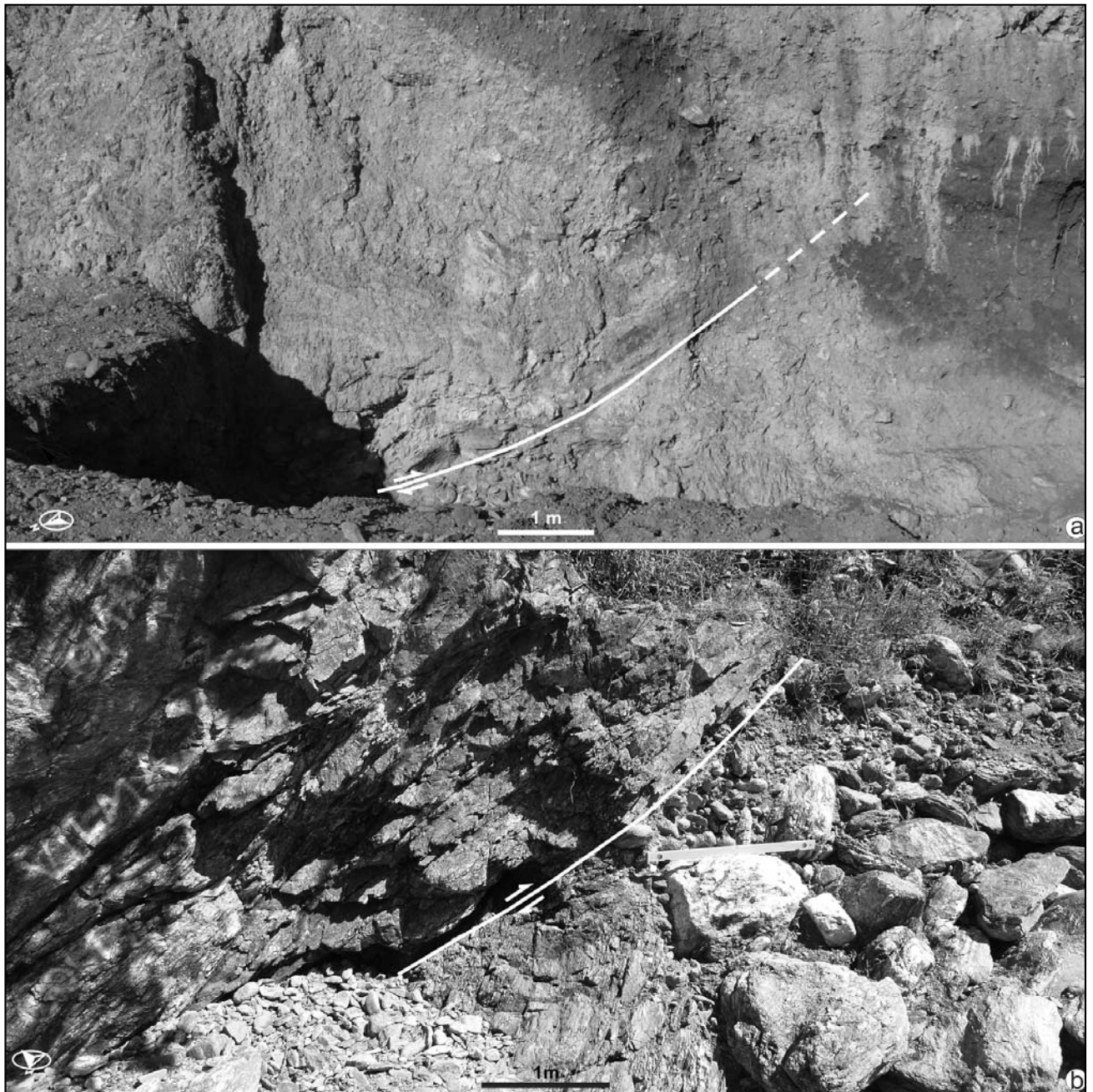


Figura 3. Deformaciones asociadas a la falla El Molino: a) perfil arroyo El Molino y b) perfil Los Molles, éstos presentan el corrimiento del basamento precámbrico sobre depósitos cuaternarios.

La falla Las Lagunas, de movimiento inverso con componente de rumbo dextral, con azimut aproximado 037° - 055° N y plano buzante al SE. Su traza posee una longitud de más de 30 km, aunque se ha estimado, por métodos geofísicos, estratigráficos y paleosismológicos, que la misma hacia el NE podría superar los 60 km (Seitz, 2009; Villalba, 2011; Sagripanti et al. 2011).

La expresión morfológica superficial de esta falla, es una escarpa compuesta o múltiple evento, rectilínea, formada en sedimentos loésicos que alcanza los 8 m de altura en algunas secciones (Figura 4a). Otras expresiones superficiales asociadas a la misma son pequeñas escarpas que poseen el mismo rumbo de la traza principal y que alcanzan los 0,30 m de altura. Estas se preservan claramente a pesar de la erosión y de la importante intervención antrópica a la que están sometidas por lo que se estima que la tasa de movimiento es mayor que la tasa de erosión.

Otras evidencias de actividad cuaternaria, son las estructuras deformacionales cosísmicas presentes, de escala mesoscópica, en sedimentos no consolidados (Sagripanti, 2006; Sagripanti et al. 2009; Sagripanti et al. 2011).

En el logging de las trincheras (Figura 4b) se identificaron estructuras deformacionales en sedimentos lagunares, loésicos y arenas finas. Estas estructuras cosísmicas (inyecciones de arena, diques clásticos, volcanes, cráteres, pliegues, grietas de tensión y fallas), son interpretadas como sismitas (Figuras 4c y d).

La información paleosismológica ha permitido extender el registro temporal de la sismicidad de esta falla e interpretar al menos seis eventos paleosísmicos, definiendo a la última parte del Holoceno como el período de mayor actividad, en el cual se interpreta un patrón de agrupamiento temporal (clustering) de terremotos (Sagripanti, 2006; Sagripanti et al. 2011).

Los parámetros sismogénicos que se han logrado determinar para esta estructura son: desplazamiento cosísmico por evento de 0,30 m, longitud de ruptura unitaria estimada para el Holoceno de aproximadamente 34 km, tasa de movimiento (slip rate) de 0,25 mm/año y período de recurrencia entre 0,92-1,2 ka (Sagripanti, 2006; Sagripanti et al. 2011).

Los resultados obtenidos indican que la falla ejerce un control activo sobre la morfología superficial y que la sismicidad tiene continuidad, al menos, desde el Pleistoceno hasta la actualidad.

ACTIVIDAD TERCIARIA-CUATERNARIA

La información neotectónica y paleosismológica ha permitido interpretar numerosos eventos paleosísmicos cuyas evidencias presentan características distintivas según el ámbito (frente de levantamiento o llanura) en donde han sido generadas. Si bien las estructuras analizadas en todos los casos responden a esfuerzos compresivos, las correspondientes al frente de levantamiento serrano se caracterizan por el sobrecorrimiento (de bajo ángulo y vergencia al O) del basamento metamórfico precámbrico-paleozoico, sobre depósitos sedimentarios cuaternarios generando escarpas que no tienen una expresión importante en el relieve. Las estructuras deformacionales son eminentemente de carácter frágil ya que, dado que los materiales sedimentarios son de granulometría gruesa, las deformaciones dúctiles son difíciles de identificar o están ausentes. En este ámbito, donde los planos de ruptura son evidentes, se han podido identificar desplazamientos totales de 3 a 4 m.

Por el contrario, en las fallas que se ubican en la llanura, que se desarrollan en sedimentos cenozoicos, la identificación del plano de ruptura es más difícil dado el carácter friable de los materiales. En la mayoría de los casos presentan evidencias

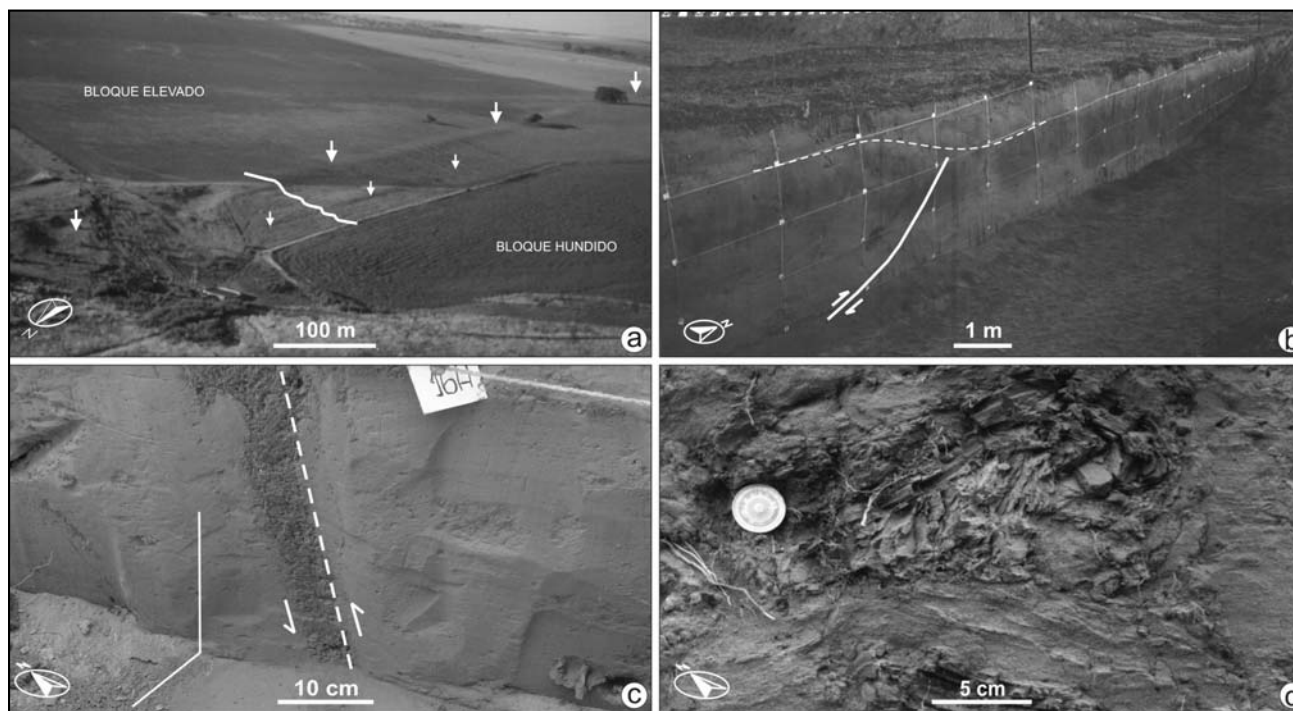


Figura 4. a) vista aérea oblicua de la escarpa de falla principal y pequeñas escarpas, b) vista de una trinchera excavada transversal a la traza de la falla, c) exposición de un plano secundario de la falla relleno con sedimentos lagunares y d) pliegue en sedimentos lagunares (2.820 ± 60 a A P) con vergencia hacia bloque hundido.

como estructuras deformacionales de escala mesoscópica tanto frágiles como dúctiles, en sedimentos finos (eólicos y lagunares). Asociado a esto el desarrollo de morfologías superficiales, como escarpas y pequeñas escarpas rectilíneas permiten, en algunos casos, interpretar múltiples eventos y evidencian el control activo de las estructuras sobre la morfología a pesar de la erosión y la actividad antrópica, poniendo de manifiesto que la actividad holocena de las fallas tiene continuidad en el presente.

Los períodos de actividad de las distintas estructuras están comprendidos desde tiempos miocenos hasta el holoceno inclusive. Con el fin de facilitar la lectura e interpretación de la información obtenida, ésta se presenta en una tabla de síntesis

(Tabla 1) que contiene las épocas, período de actividad de las distintas fallas y autores que han hecho los reportes de esta actividad.

El análisis del cuadro de síntesis (Tabla 1) permite interpretar que si bien algunas de las estructuras estudiadas han tenido actividad terciaria, se destaca que todas presentan actividad desde el límite Pleistoceno-Holoceno hasta la actualidad. Esto le confiere a las mismas, en términos de peligrosidad, una relevante importancia y por esta razón se considera imperativo hacer una aproximación más precisa sobre el potencial sísmogénico asociado.

Tabla 1. Cuadro de síntesis de la actividad terciaria-cuaternaria de las fallas analizadas.

| FALLA | PERÍODO CON ACTIVIDAD | | | | | | | | | | | | AUTORES |
|--------------|-----------------------|---|---|----------|---|---|-------------|---|---|----------|---|---|--|
| | MIOCENO | | | PLIOCENO | | | PLEISTOCENO | | | HOLOCENO | | | |
| | I | M | S | I | M | S | I | M | S | I | M | S | |
| Sierra Chica | | | ■ | | | | | | | | | ■ | Massabie, 1996; Costa et al. 2001; Gallo, 2011; Bettiol, 2012; Sagripanti et al., 2012; Santinelli, 2013 |
| El Molino | | | | | | ■ | | | | | | | Murillo, 1996; Costa et al. 2001; Castaldi, 2013 |
| Las Lagunas | | | | | | | | | | | | ■ | Sagripanti, 2006; Seitz, 2009; Sagripanti et al. 2011; Villalba y Sagripanti, 2014 |

POTENCIAL SISMOGÉNICO

En regiones como los límites convergentes de placas ocurren frecuentemente fuertes terremotos cuya magnitud máxima puede ser obtenida directamente de los registros históricos, en cambio, en sectores de intraplaca, tectónicamente más estables, la ocurrencia de estos fenómenos naturales es menos frecuente y su magnitud debe ser estimada indirectamente (Clark et al. 2010). En este caso, la información que aporta la paleosismología se considera muy importante para la reconstrucción del registro de la sismicidad prehistórica y para la estimación de la magnitud máxima, ya que permite hacer una evaluación sobre el potencial sísmogénico de una falla en particular.

Los resultados obtenidos por medio de investigaciones paleosismológicas mejoran significativamente el conocimiento del peligro sísmico a largo plazo y están basados en la determinación de la magnitud y número de terremotos a partir de la medición de las deformaciones y morfologías resultantes. Estos parámetros sísmogénicos pueden proveer dos estimaciones independientes de la magnitud máxima (Clark et al. 2010; Leonard, 2010).

Los parámetros necesarios para determinar el potencial sísmogénico de una falla son varios, entre éstos, la estimación de la paleomagnitud es uno de los más importantes y ésta se puede calcular utilizando evidencias primarias como la longitud de ruptura junto al desplazamiento de la falla. Estas evidencias asociadas a paleoeventos, que normalmente se manifiestan como superficies de rupturas, permiten escalar el tamaño de un

terremoto por medio de fórmulas empíricas (Bonilla, 1988; Wells y Coppersmith, 1994; Mc Calpin, 1996).

Algunos de los parámetros de las estructuras analizadas como desplazamiento cosísmico, desplazamientos de inclinación acumulado, longitud de ruptura unitaria estimada, tasa de movimiento y período de recurrencia, permitieron realizar una aproximación determinística para la evaluación del peligro sísmico de las tres fallas aplicando las fórmulas empíricas propuestas por Bonilla et al. (1984); Wells y Coppersmith (1994) y Somerville (2006) para cuantificar la magnitud (M) y la magnitud del momento sísmico (M_w), correspondientes a paleoterremotos y terremotos futuros.

En el caso de la falla de la Sierra Chica se consideró a la sección Las Peñas, donde se interpretó la ocurrencia de paleoterremotos. Para el cálculo se utilizaron datos como el desplazamiento cosísmico de 0,35 m relevado en el perfil de una de las trincheras, la profundidad hipocentral de 27 km y una longitud de ruptura unitaria holocena de 20 km. Se obtuvo una paleomagnitud de M 6,9 y M_w 6,9-7,0 y la magnitud estimada para un terremoto máximo posible si la reactivación involucrara las tres secciones analizadas (aproximadamente 100 km) es de M 6,9 y M_w 7,5.

En la valoración del potencial sísmogénico de la falla El Molino, se consideró un desplazamiento cosísmico de 0,40 m y como profundidad hipocentral 27 km, que se considera la profundidad más frecuente para los sismos con epicentro en la región y una longitud de ruptura holocena de 35 km (entre Los Molles y Luyaba) y de aproximadamente 65 km, si se

reactivaran todas las secciones de la falla (Castaldi, 2013). Los valores de paleomagnitud obtenidos fueron de $M 7,0$ y $M_w 7,0$ y la magnitud para un terremoto máximo posible de $M 7,2$ y $M_w 7,3$.

Para el caso de la falla Las Lagunas, Sagripani (2006) utilizó en el cálculo un desplazamiento cosísmico de 0,30 m y una profundidad hipocentral entre 20 km y 33 km, que consideró la más frecuente para los sismos y microsismos con epicentro en la región. Otro parámetro que utilizó para el cálculo fue una longitud de ruptura unitaria holocena de 24 km, que corresponde al rasgo morfológico más significativo, mientras que Seitz (2009) ha prolongado la traza de la estructura 9 km hacia el NE.

Los valores de paleomagnitud obtenidos a partir de los datos mencionados, fueron de $M 6,6$ y $M_w 6,6$ y la magnitud para un terremoto máximo posible de $M 7,0$ y $M_w 7,0$ (Sagripani, 2006; Seitz, 2009; Sagripani et al. 2011).

El análisis de los valores obtenidos para las tres fallas permite sintetizar que las paleomagnitudes determinadas son entre $M 6,6-7,0$ y $M_w 6,6-7,0$ y la magnitud calculada para un terremoto máximo posible varía entre $M 6,9-7,2$ y $M_w 7,0-7,5$.

Otra interpretación que se puede realizar sobre la base de los valores de magnitud obtenidos es que el tamaño de los terremotos prehistóricos y de los terremotos máximos posibles es similar, ya que sus valores mayores y menores están comprendidos en un intervalo de aproximadamente un punto de magnitud, es decir entre $M 6,6-7,5$. Aún así, no se debe perder de vista que una diferencia de un grado de magnitud implicaría una liberación de energía 30 veces superior (Bolt, 1995).

CONCLUSIONES Y CONSIDERACIONES FINALES

Los valores obtenidos para las tres fallas permiten concluir que las paleomagnitudes son consistentes con el umbral de magnitud de $M \geq 6,5$ propuesto por Costa (2004), para las Sierras Pampeanas y que la magnitud calculada para un terremoto máximo posible es superior a los registros históricos e instrumentales de la región.

Sobre la base de los datos disponibles se concluye que el mayor potencial sismogénico correspondería a la falla de la Sierra Chica y, con menor potencial, le siguen las fallas El Molino

y Las Lagunas, en cualquiera de los casos el mismo es importante y actualmente está siendo subestimado.

Un enfoque sobre el peligro sísmico asociado a las fallas analizadas, considerando por una parte la ausencia de registros históricos con evidencias de deformaciones cosísmicas generadas por terremotos fuertes, a excepción del Gran Terremoto de Sampacho y, por otra, la importante actividad que han desarrollado estas estructuras durante el Holoceno, permite plantear que existe la posibilidad cierta, de la ocurrencia de fuertes terremotos con epicentro en la zona, como así también que pueden existir otras fuentes sismogeneradoras en el área que aún no han sido reconocidas, tal vez ignoradas y no valoradas hasta el presente.

Los antecedentes sobre la paleosismicidad están indicando que el potencial sismogénico de la región, no se corresponde con el asignado por el INPRES a la Zona de Peligrosidad 1 y 2, ya que el mismo es mayor, por lo tanto se estima que, de acuerdo a la magnitud máxima calculada, las posibles aceleraciones al pico del suelo excederían de forma muy amplia a las esperadas.

En zonas sísmicamente activas en las que se emplazan importantes centros urbanos, carreteras, centrales hidroeléctricas y nucleares, como en las provincias de Córdoba y San Luis y siendo las aceleraciones un parámetro de diseño de las construcciones, se considera que, sobre la base del potencial sismogénico que poseen estas fallas geológicas con actividad cuaternaria, se deberían redefinir los límites de las zonas de peligrosidad ya que, de mantenerse como hasta el presente, se seguiría subestimando el peligro sísmico de la región.

Al mismo tiempo y como otra manera de disminuir el riesgo sísmico se propone planificar acciones de prevención y concientización, consideradas herramientas importantes y económicas, para disminuir la vulnerabilidad sísmica entre las que pueden mencionarse la definición e implementación de planes de gestión del riesgo y la exigencia y control de la aplicación de normas sismorresistentes para la construcción edilicia.

Finalmente, se considera que se debería avanzar en el conocimiento de los parámetros sismogénicos de las fallas activas reconocidas, y de otras presentes en la intraplaca, para lograr a futuro hacer una estimación más realista del potencial sismogénico y riesgo sísmico asociado a este tipo de estructuras.

TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

ALVARADO, P., CASTRO DE MACHUCA, B. Y S. BECK, 2005.

Comparative seismic and petrographic crustal study between the Western and Eastern Sierras Pampeanas region (31°S). *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 60 (4): 787-796. Buenos Aires.

BETTIOL, A., 2012.

Estudio neotectónico de las fallas con actividad cuaternaria, ubicadas al Sur de las Sierras Las Peñas. *Tesis de licenciatura, Universidad Nacional de Río Cuarto (inédita)*, 115 p., Río Cuarto.

BOLT, B.A., 1995.

Earthquakes. *W.H-Freeman and Co. 331p. New York.*

BONALUMI, A.A., MARTINO, R., SFRAGULLA, J.A., CARIGNANO, C.A. Y A. TAUBER, 2005.

Hoja Geológica Villa María 3363-I. *Programa Nacional de Cartas Geológicas de la República Argentina, 1:250.000, 74 p., Buenos Aires.*

BONILLA, M., 1988.

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

- BONILLA, M., R. MARK Y J. LIENKAEMPER, 1984.
Statistical relations among earthquake magnitude, surface rupture length, and surface fault displacement. *USGS. Open-File Report 84-256. Version 1.1.*
- CASTALDI, G.S., 2013.
Relevamiento y caracterización de las deformaciones neógenas-cuaternarias asociadas a la falla El Molino, Sierra de Comechingones.
Tesis de licenciatura, Universidad Nacional de Río Cuarto (inédita), 112 p., Río Cuarto.
- CASTANO, J.C., 1977.
Zonificación sísmica de la República Argentina. Instituto Nacional de Prevención Sísmica.
Publicación Técnica N° 5, 42 p.
- CLARK, D., MC PHERSON, A. Y C. COLLINS, 2010.
Mmax estimates for the Australian stable continental region (SCR) derived from palaeoseismicity data. *Australian Earthquake Society Conference, Perth, western Australia. 15 p., Perth.*
- COSTA, C. Y C. VITA FINZI, 1996.
Late holocene faulting in the southeast Sierras Pampeanas of Argentina.
Geology, Vol 24 (12): 1127-1130.
- COSTA, C., GONZÁLEZ DÍAZ, E., MURILLO, M., GARDINI, C., GIACCARDI, A., SEQUEIROS, J. Y S. BEA, 1999.
Morfoestructura del frente de levantamiento andino de la sierra de Comrechingones.
14° Congreso Geológico Argentino, Actas 1: 32.
- COSTA, C., MURILLO V., SAGRIPANTI G., Y C. GARDINI, 2001.
Quaternary intraplate deformation in the southeastern Sierras Pampeanas, Argentina.
Journal of Seismology 5: 399-409.
- COSTA, C., 2004.
¿Microtectónica en el Cuaternario?: Métodos y aplicaciones de la paleosismología.
Revista de la Asociación Geológica Argentina, Serie D: Publicación Especial N° 7: 9-19. Buenos Aires.
- GALLO, M. 2011.
Estudio neotectónico de la falla Sierra Chica en la sección Las Peñas-Los Cóndores.
Universidad Nacional de Río Cuarto, Tesis de licenciatura, (inédita), 103 p., Río Cuarto.
- INPRES-CIRSOC-103, 1983.
Normas Argentinas para Construcciones Sismorresistentes.
Construcciones en General. INPRES. Centro de investigación de los reglamentos nacionales de seguridad para las obras civiles. Parte I. 109 p.
- INTROCASO, A., LION, A.L. Y V. RAMOS, 1987.
La estructura profunda de las Sierras de Córdoba.
Revista de la Asociación Geológica Argentina 13 (1-2): 177-187. Buenos Aires.
- JORDAN, T., ISACKS B., ALLMENDINGER R., BREMER J. Y V. RAMOS, 1983.
Andean Tectonics related to geometry of subducted Nazca Plate:
Geological Society of America Bulletin 94: 341-361.
- JORDAN, T. Y R.W. ALLMENDINGER, 1986.
The Sierras Pampeanas of Argentina; a modern analogue of Rocky Mountain foreland deformation.
American Journal of Science 286: 737-764.
- KRAEMER, P., MARTINO, R., GIAMBASTIANI, M. Y J. SFRAGULLA, 1988.
Análisis dinámico cinemático preliminar de la falla Santa Rosa, Departamento de Calamuchita, Provincia de Córdoba.
5° Reunión de Microtectónica, Actas 1: 107-114. Córdoba.
- LEONARD, M., 2010.
Earthquake Fault Scaling: Relating rupture length, width, average displacement, and moment release.
Bulletin of the Seismological Society of America, 100: 1971-1988.
- MASSABIE, A., 1976.
Estructura tectónica cenozoica entre Charbonier y Cosquín, provincia de Córdoba.
6° Congreso Geológico Argentino, Actas 1: 109-123. Buenos Aires.
- MASSABIE, A., 1996.
Fallamiento neotectónico en las Sierras Pampeanas Orientales. Implicancias aplicadas a diferentes escalas.
Actas Asociación Argentina de Geología Aplicada a la Ingeniería 10: 187-198.
- MASSABIE, A.C. Y C.F. SZLAFSZTEIN, 1991.
Condiciones geomecánicas y edad del fallamiento neotectónico en las Sierras Pampeanas Orientales, Córdoba, Argentina.
Actas Asociación Argentina de Geología Aplicada a la Ingeniería 6: 154-168.

- MASSABIE, A., MUTTI, D., NESTIERO, O. y A. SANGUINETTI, 1999.
Control múltiple del fallamiento neotectónico en las Sierras Pampeanas Orientales, Provincias de Córdoba, San Luis y Santiago del Estero.
Revista de la Asociación Argentina de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente, 13: 117-123.
- MASSABIE, A., CEGARRA, M. y A. SANGUINETTI, 2006.
Estructura y edad de fallamiento cuaternario a la latitud de Bialet Massé, Sierra Chica de Córdoba.
12º Reunión sobre Microtectónica y Geología Estructural. Asociación Geológica Argentina, publicación especial 9: 107-112. Salta.
- MC CALPIN, J., 1996.
Paleoseismology, Acad Press. 587 p.
- MINGORANCE, F., 1987.
Operativo sismológico móvil con motivo del sismo ocurrido el 24 de Marzo de 1987 en Sampacho, Córdoba.
INPRES. Informe Técnico 14 p.
- MINGORANCE, F., 1991.
Análisis y evaluación del tectonismo reciente asociado a la falla Sampacho, provincia de Córdoba, Argentina Central.
Instituto Panamericano de Geofísica e Historia de México. N° 35: 13-39.
- MURILLO, M.V., 1996.
Neotectónica del flanco occidental de la sierra de Comechingones, entre los arroyos Piedra Blanca y San Miguel (provincia de San Luis).
Tesis de licenciatura, Universidad Nacional de Buenos Aires (inédita), 135 p., Buenos Aires.
- PERARNAU, M., GILBERT, H., ALVARADO, P., MARTINO, R. y M. ANDERSON, 2012.
Crustal structure of the Eastern Sierras Pampeanas of Argentina using high frequency local receiver functions.
Tectonophysics, Vol. 580: 208-217.
- PILGER, R. 1981.
Plate reconstructions, aseismic ridges, and low-angle subduction beneath the Andes. Geological Society of America
Bulletin, Parte 1, 92: 448-456.
- RAMOS, V., 1999.
Rasgos estructurales del territorio argentino.
Geología Argentina. Anales 29 (24): 715-784. Instituto de Geología y Recursos Minerales.
- RAMOS, V., CRISTALLINI, E. y D. PÉREZ, 2000.
El levantamiento de las Sierras Pampeanas en la zona de subducción subhorizontal.
15º Congreso Geológico Argentino. Actas: 265-270. El Calafate.
- RAMOS, V., CRISTALLINI, E. y D. PÉREZ, 2002.
The Pampean flat-slab of the Central Andes.
Journal of South American Earth Sciences 15: 59-78.
- RICHARDSON, T., GILBERT, H., ANDERSON, M. y K.D. RIDGWAY, 2012.
Seismicity within the actively deforming Eastern Sierras Pampeanas, Argentina.
Geophysics 188:408-420.
- 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., VILLALBA, D., BETTIOL, A. y C. SEITZ, 2009.
Sismicidad y paleosismicidad en la región sur de la provincia de Córdoba. Análisis del peligro y riesgo sísmico asociado.
Revista de la Asociación Argentina de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente 23: 45-53.
- SAGRIPANTI, G., y D. VILLALBA, 2011.
Movimientos prehistóricos y recientes en la intraplaca argentina a la latitud 33° S, falla Las Lagunas, Sampacho, Córdoba.
Revista de la Asociación Geológica Argentina 68 (4): 491-501.
- SAGRIPANTI, G.L., SCHIAVO, H.F., FELIZZIA, J., VILLALBA, D., AGUILERA, D., GIACCARDI, A. y J. MEMBRIVES, 2011.
Fuertes paleosismos de intraplaca y sus retornos vinculados a la falla Las Lagunas, Sierras Pampeanas de Córdoba.
Revista de la Asociación Geológica Argentina 68: 52-70.
- SAGRIPANTI, G.L., VILLALBA, D. y M. VILLEGAS, 2012.
Nuevas evidencias de deformaciones cuaternarias asociadas a la falla Sierra Chica. Sierras Pampeanas de Córdoba.
Revista de la Asociación Geológica Argentina 69 (4): 624-639.
- SANTINELLI, M.A., 2013.
Caracterización de las deformaciones Neógenas-Cuaternarias asociadas a la falla Sierra Chica sector embalse de Río Tercero-Villa General Belgrano.
Universidad Nacional de Río Cuarto, Tesis de Licenciatura (Inédita) 110 p., Río Cuarto.

- SCHLAGINTWEIT, O., 1954.
Una interesante dislocación en Potrero de Garay (valle de Calamuchita) y observaciones sobre la Sierra Chica y Grande de Córdoba.
Revista de la Asociación Geológica Argentina 9: 135-154. Buenos Aires.
- SEITZ, C., 2009.
Relevamiento neotectónico de nuevas secciones de la falla Las Lagunas, sur de Córdoba.
Tesis de Licenciatura, Universidad Nacional de Río Cuarto (inédita), 102 p., Río Cuarto.
- SMALLEY, R.JR., PUJOL, J., REGNIER, M., CHIU, J.M., CHATELAIN, J.L., ISACKS, B.L., ARAUJO, M., Y N. PUEBLA, 1993.
Basement seismicity beneath the Andean Precordillera thin-skinned thrust belt and implications for crustal and lithospheric behavior.
Tectonics, 12: 63-76.
- SOMERVILLE, P., 2006.
Review of magnitude-area scaling of crustal earthquakes.
Report to WGCEP, 22 p., URS Corp., Pasadena.
- VILLALBA, D., 2011.
Estudio neotectónico y geodésico tendiente a comprobar movimientos prehistóricos y recientes de la falla Las Lagunas, Sampacho.
Tesis de licenciatura, Universidad Nacional de Río Cuarto (inédita), 142 p., Río Cuarto.
- VILLALBA, D. Y G.L. SAGRIPANTI, 2014.
Análisis morfológico de escarpas asociadas a una falla de intraplaca con actividad cuaternaria: falla Las Lagunas, Córdoba.
Revista de la Asociación Geológica Argentina 71 (1): 86-95.
- WAGNER-MANSLAU, A., 1988.
Estudio geológico-estructural del valle de Calamuchita entre Villa General Belgrano y Santa Rosa de Calamuchita. Provincia de Córdoba.
Tesis de licenciatura, Universidad Nacional de Buenos Aires (inédita), 73 p., Buenos Aires.
- WELLS, D. Y K. COOPERSMITH, 1994.
New empirical relationships among magnitude, Rupture Length, Rupture Width, Rupture area and surface displacement.
Bulletin Seismological Society of America. 84: 974-1.002.