



# Evidencia de actividad Holocena asociada a la falla La Esther. Piedemonte occidental de la sierra de Comechingones. Sierras Pampeanas de Córdoba y San Luis, Argentina

## Evidence of Holocene activity associated with La Esther fault. Western piedmont of the Sierra de Comechingones. Sierras pampeanas de Córdoba and San Luis, Argentina

 Guillermo Luis Sagripanti<sup>1\*</sup>   Daniel Héctor Origlia<sup>1</sup> 

\* Contacto

Recibido: 1 de abril de 2023 • Aceptado: 3 de julio de 2023 • Publicado: 1 de agosto de 2023

### Resumen

Las deformaciones neotectónicas en el borde activo de la Sierra de Comechingones están asociadas a fallas inversas que se ubican en su piedemonte, generando morfoestructuras discontinuas y paralelas a la falla principal que controla el levantamiento serrano. El objetivo de esta contribución es reportar evidencia de actividad holocena asociada a una falla de la zona frontal activa del piedemonte occidental de la Sierra de Comechingones. La metodología seguida fue la toma de fotografías aéreas oblicuas, el relevamiento geológico-estructural y la descripción de un perfil antrópico utilizando técnicas paleosismológicas. Los resultados indican que la falla La Esther es de movimiento inverso, con orientación N 350°-360° e inclinación al este, ha tenido actividad durante el Holoceno y es el flanco externo de un *piedmont foreland*. Se considera que esta falla tendría capacidad para generar fuertes terremotos.

**Palabras clave:** falla inversa, paleomagnitud, piedmont foreland, Sierra de Comechingones.

### Abstract

Neotectonic deformations in the active front of the Sierra de Comechingones are associated with reverse faults that are located in its western piedmont, generating discontinuous morphostructures parallel to the main fault that controls the mountain uplift. This contribution aims to report evidence of Holocene activity located in its neotectonic uplift front. The methodology followed entails obtaining oblique aerial photographs, a geological-structural survey, and the description of an anthropic profile using paleoseismological techniques. The results indicate that the La Esther fault is characterized by East-dipping of reverse movements with orientation N 350°-360° and has undergone activity during the Holocene, being the external flank of a *piedmont foreland*. It is considered that this fault would have the capacity to generate strong earthquakes.

**Keywords:** reverse fault, paleomagnitude, piedmont foreland, Sierra de Comechingones.

<sup>1</sup>Departamento de Geología. Universidad Nacional de Río Cuarto.

## INTRODUCCIÓN

Las deformaciones neotectónicas más orientales en el segmento de subducción subhorizontal Pampeano se reconocen en las Sierras Pampeanas de Córdoba y San Luis (Figura 1). La mayoría de éstas han sido relevadas en los frentes occidentales de levantamiento de las sierras de Comechingones y Sierra Chica, principalmente asociadas a sistemas de fallas que se caracterizan por presentar corrimientos del basamento paleozoico sobre depósitos cenozoicos asociados a fallas de movimiento inverso que inclinan al este y sudeste. En algunos casos, estos corrimientos generan morfologías formadas por una franja de cerrilladas bajas consideradas como *piedmont forelands* o *forebergs* (Costa *et al.* 2014; Costa 2019).

Los *piedmont forelands*, cerrilladas pedemontanas, se encuentran comprendidos entre la falla morfogénica principal donde se localiza la unión serranía piedemonte y la zona de deformación frontal activa. Los mismos están marginados por escarpas continuas o discontinuas con cara hacia la cuenca y el patrón distributivo del drenaje pedemontano se desarrolla en los sectores más distales del piedemonte, luego de haber superado las pendientes anómalas del relieve debido a la presencia de esta morfoestructura (Ikeda 1983; Bull 2008).

El Sistema de Fallas de Comechingones constituye el frente de levantamiento andino de la sierra homónima y presenta rasgos morfoestructurales asociados que son mayormente controlados por fallas inversas con inclinación al este (Figura 1b). La principal estructura de este sistema es la falla Comechingones considerada como responsable de la morfogénesis serrana principal. Otra estructura que forma parte de este sistema de fallas, si bien es de menor expresión topográfica posee mayor importancia neotectónica debido a su comprobada actividad en el cuaternario y a sus antecedentes paleosísmicos, es la falla El Molino (Costa *et al.* 1999, 2014, 2018).

Si bien las principales deformaciones neógenas-cuaternarias, que presentan las mejores expresiones, se encuentran en las escarpas marginales del frente occidental de la Sierra de Comechingones, también se han reconocido deformaciones cuaternarias en fallas inversas ubicadas en su piedemonte oriental (Sagripanti *et al.* 2018, 2022; Sagripanti y Villalba 2020). Las fallas con probada actividad cuaternaria detectadas en estos ámbitos serranos poseen antecedentes de fuertes paleoterremotos que se estima habrían alcanzado la magnitud (Richter) entre M 6,5 - 7,0 y se consideran que estos valores de magnitud podrían ser un umbral de energía de referencia para las Sierras Pampeanas de Córdoba y San Luis (Sagripanti *et al.* 2009, 2014; Costa *et al.* 2001, 2014; Costa 2019; Sagripanti *et al.* 2018; Sagripanti y Villalba 2020; Castaldi *et al.* 2021a).

Es importante mencionar que algunas de estas estructuras que poseen potencial para generar fuertes terremotos se encuentran próximas al emplazamiento de numerosos e importantes centros turísticos y urbanos, centrales hi-

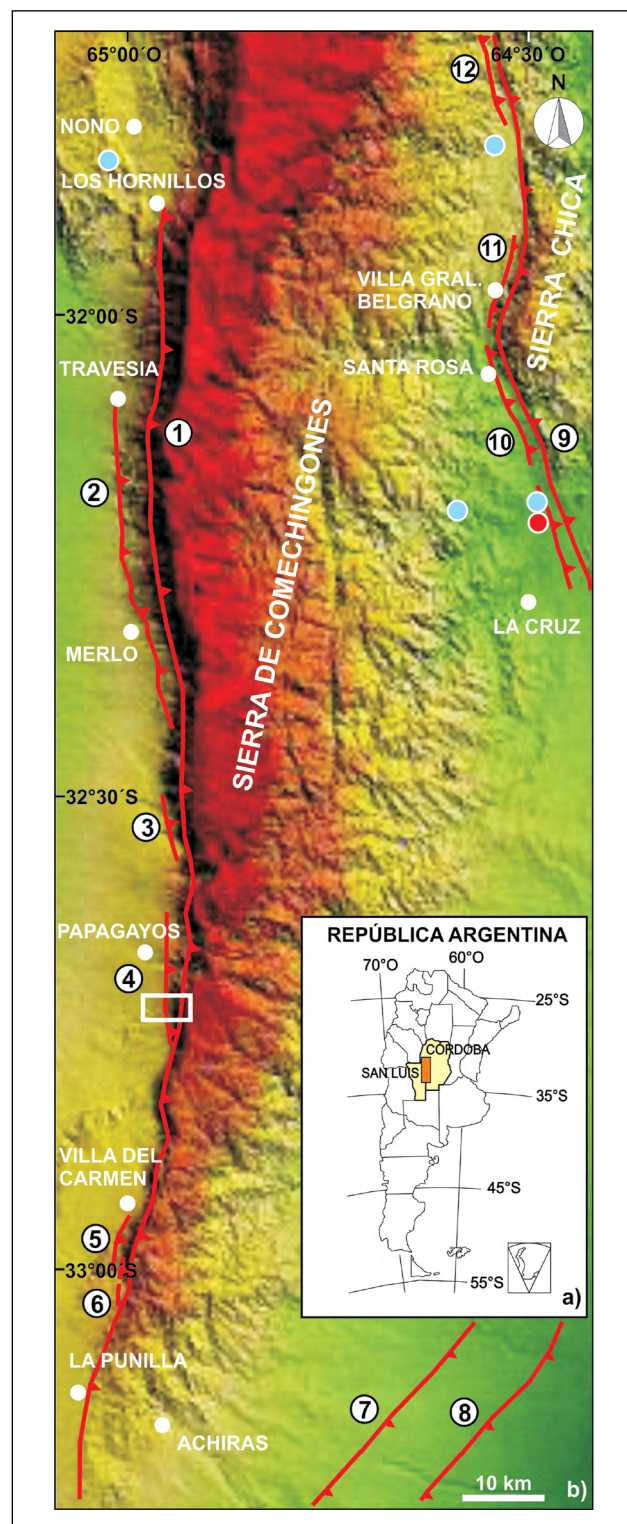


Figura 1. a) Mapa con la ubicación de la zona que comprende la Figura b. b) Mapa con las principales fallas. 1: Sistema de Fallas Comechingones, 2: El Molino, 3: Pisco Yaco, 4: La Esther, 5: La Aguada, 6: Villa del Carmen, 7: Las Lagunas, 8: Las Rosas, 9: Sistema de Fallas Sierra Chica, 10: Santa Rosa, 11: Villa G. Belgrano y 12: Potrero de Garay. El recuadro blanco indica la zona de estudio, los círculos blancos a las localidades, los círculos celestes a las centrales hidroeléctricas y el círculo rojo a la central nucleoelectrónica.

droeléctricas y una nucleoeléctrica, donde se desconoce el riesgo sísmico al que están expuestos (Figura 1b).

Aunque se ha avanzado en la detección y parametrización de algunas fallas sismogénicas ubicadas en el piedemonte occidental de la Sierra de Comechingones, sobre la base de la información que aportan las fotografías aéreas, imágenes satelitarias y perfiles naturales de campo, se han detectado evidencias, entre las localidades de Merlo y Villa del Carmen (San Luis), correspondientes a estructuras que no han sido reportadas y otras que han sido analizadas solo parcialmente. El objetivo de esta contribución es reportar evidencias de actividad holocena asociada a una falla ubicada en la zona frontal activa del piedemonte occidental de la Sierra de Comechingones. El área de estudio se ubica próxima a la localidad de Papagayos, 32° 43' 18" S y 65° 58' 28" O, región oriental de la provincia de San Luis (Figura 1).

Desde hace varios años se están investigando fallas de movimiento inverso, ubicadas en el ámbito del piedemonte de la Sierra de Comechingones, con el objetivo de conocer sobre la actividad cuaternaria y potencial sismogénico asociado, como la falla El Molino, La Aguada, Las Lagunas, entre otras (Costa y Vita Finzi 1996; Costa *et al.* 1998, 1999, 2001, 2018; Sagripanti *et al.* 2011, 2012, 2014, 2018, 2022; Villalba *et al.* 2017; Costa 2019; Sagripanti y Villalba 2020; Castaldi *et al.* 2021a; Sagripanti 2021). Por lo tanto, se considera que los resultados de esta contribución son una continuidad de las investigaciones mencionadas y un aporte para avanzar en el conocimiento sobre el comportamiento de este tipo de fallas.

## CONTEXTO NEOTECTÓNICO Y SISMICIDAD

El levantamiento y la deformación del basamento de las Sierras Pampeanas de Córdoba y San Luis, entre aproximadamente los 27° 30' y 33° 30' S durante el Mioceno-Plioceno y Cuaternario, están condicionados por la subducción subhorizontal de la placa tectónica de Nazca. El acortamiento cortical que produjo el levantamiento neotectónico y la configuración que adoptaron los bloques de las Sierras Pampeanas se vincula al inicio de la subducción de la dorsal Juan Fernández durante los últimos 7-10 Ma (Pilger 1981; Jordan *et al.* 1983; Jordan y Almendinger 1986; Smalley *et al.* 1993; Costa y Vita Finzi 1996; Ramos 1999; Ramos *et al.* 2002).

Este comportamiento de la placa de Nazca genera deformaciones como las correspondientes a los frentes de fallamiento cuaternario que se ubican principalmente en el ámbito del piedemonte occidental de las sierras de Comechingones y Sierra Chica, entre otras. Se considera que estas fallas marginales de los bloques serranos poseen una geometría lítrica que produce una asimetría topográfica que caracteriza a los bloques serranos, con un borde pasivo de ladera tendida al este y un borde activo en la ladera oeste de mayor pendiente, donde se concentra la mayor actividad neógena. Estas estructuras tienen asociadas fallas de bajo ángulo, como corrimientos del basamento cristalino paleo-

zoico (Devónico) sobre depósitos de sedimentos cuaternarios (Gordillo y Lencinas 1979; Jordan y Almendinger 1986; Massabie 1987; Costa 1999; Costa *et al.* 2014).

La expresión superficial de estos corrimientos es sutil y discontinua a lo largo del rumbo de las fallas, definiendo una serie de morfologías formadas por cerrilladas bajas y paralelas o subparalelas al frente de levantamiento principal, que se interpreta como una migración del frente de corrimiento hacia sectores occidentales medios y distales, hacia la cuenca, consideradas como *piedmont forelands* o *forebergs*. Estos rasgos morfotectónicos se ubican entre la falla morfogénica correspondiente al levantamiento principal de la sierra, posiblemente inactivo, donde se encuentra el quiebre topográfico de la unión entre el frente serrano y el piedemonte, y la zona de deformación frontal activa (Ikeda 1983; Costa *et al.* 1999; Costa 2019).

En particular, el desarrollo del *piedmont foreland* en la Sierra de Comechingones, asociado a la falla El Molino, origina un basculamiento de los depósitos aluviales con sentido contrario a la pendiente del piedemonte entre la falla morfogénica neógena y la falla que ejerce el levantamiento principal de la sierra; por lo tanto, el mismo adquiere un estilo estructural análogo al bloque serrano principal. La estructura que caracteriza esta morfoestructura tiene similar geometría y cinemática que la falla principal, y su trazo se curva y une, hacia el sur de Merlo, con las estructuras del frente serrano principal (Costa y Morla 1996; Costa y Vita Finzi 1996; Costa *et al.* 1999, 2018, 2019; Costa 2019).

El Sistema de Fallas de Comechingones posee su trazo principal localizado en la intersección de la ladera serrana con el piedemonte (Figura 1b) y sus expresiones morfotectónicas asociadas se reconocen a lo largo de 160 km, desde aproximadamente la latitud de la localidad de Los Hornillos al norte, provincia de Córdoba, hasta el sur de la localidad de La Punilla en la provincia de San Luis. Este sistema está formado por numerosas fallas inversas, de inclinación variable entre 40° E y 55° E que son controladas por anisotropías previas (Costa y Vita Finzi 1996; Murillo 1996; Costa *et al.* 1998, 1999, 2000, 2001, 2014, 2018).

Los rasgos morfotectónicos más sobresalientes que presenta este sistema de fallas son el trazo principal o falla Comechingones, considerada como responsable de la morfogénesis serrana y otras estructuras ubicadas en el piedemonte, donde se han detectado las evidencias neotectónicas más relevantes. Si bien se han reconocido deformaciones cuaternarias en distintos afloramientos, se considera que la exposición más representativa hasta el presente se ubica en proximidades de Merlo (Figura 1b) y corresponde a la falla El Molino (Costa y Vita Finzi 1996; Costa *et al.* 1998, 1999, 2001, 2014, 2018).

En la falla El Molino se reconoce una compleja estratigrafía asociada a la propagación de dos corrimientos con vergencias opuestas, el de vergencia occidental pone a rocas del basamento cristalino precámbrico sobre materiales detrítico-coluviales de pie de escarpa. Sobre la base de interpreta-



ciones realizadas, se ha propuesto un posible agrupamiento (*clustering*) de terremotos corticales con ruptura asociada, durante al menos los últimos 7 ka y estimado una tasa de acortamiento de 1 mm/año (Costa y Vita Finzi 1996; Costa *et al.* 1999, 2018; Costa 2019).

Entre las localidades de Merlo y La Punilla se encuentran fallas inversas con orientación meridional y buzamiento hacia el este, que al presente se conocen solo parcialmente las características y potencial sismogénico asociado a las mismas (Figura 1b), como por ejemplo la de Los Molles, que corresponde al extremo austral de la falla El Molino, Pisco Yaco, La Aguada, Villa del Carmen y La Esther (Morla y Costa 2004; Villalba *et al.* 2017; Sagripanti 2021; Castaldi *et al.* 2021a y b).

La interpretación de la ocurrencia de eventos paleosísmicos, fuertes, en las fallas El Molino y Las Lagunas, entre otras, ubicadas en el ámbito pedemontano de la Sierra de Comechingones se considera importante para esta región de intraplaca debido a que pone en evidencia la capacidad que poseen las fallas de este ámbito para generar terremotos fuertes. La paleomagnitud estimada para algunos de estos eventos, resultantes de un régimen tectónico de acortamiento neógeno-cuaternario, indica que habrían alcanzado una  $M$  6,5 - 7,0 (Sagripanti *et al.* 2011; Costa *et al.* 2018).

Estudios sobre sismicidad realizados por Alvarado *et al.* (2005) y Richardson *et al.* (2012) indican que la actividad sísmica de la región posee una distribución bimodal, distinguiéndose de interplaca y cortical, con hipocentros localizados entre 90 y 120 km, y en los 25 km más superficiales de la corteza, respectivamente, resultando la misma del régimen de subducción que caracteriza esta región.

La sismicidad en la zona de estudio, en el entorno a la latitud de la falla La Esther, posee registros instrumentales que indican que es cortical, leve y frecuente. Los sismos reportados (fuente INPRES) son normalmente de  $M \leq 3,0$  (Figura 2a) y la profundidad hipocentral de la mayoría de los últimos sismos es en promedio de 16 kilómetros (Figura 2b).

## CONTEXTO ESTRATIGRÁFICO

El conocimiento de la cronoestratigrafía de los estratos asignados al Neógeno y Cuaternario de la región donde se ubica la zona de estudio es impreciso e insuficiente; debido a esto se definieron las unidades estratigráficas sobre la base de información obtenida de la descripción de niveles sedimentarios clásticos gruesos y finos expuestos, y se les asignó una cronología relativa a partir de una correlación con formaciones de similares características ya descritas para la región por Santa Cruz (1973, 1979), Gordillo y Lencinas (1979), Sato *et al.* (2003), Candiani *et al.* (2016) y Chiesa *et al.* (2011, 2019). Las unidades estratigráficas aflorantes en la zona de estudio se describen a continuación:

**Basamento cristalino:** La litología corresponde al complejo granítico cerro Áspero, plutón Uspara, que es un cuerpo alargado formado por un leucogranito de color rosa pálido-

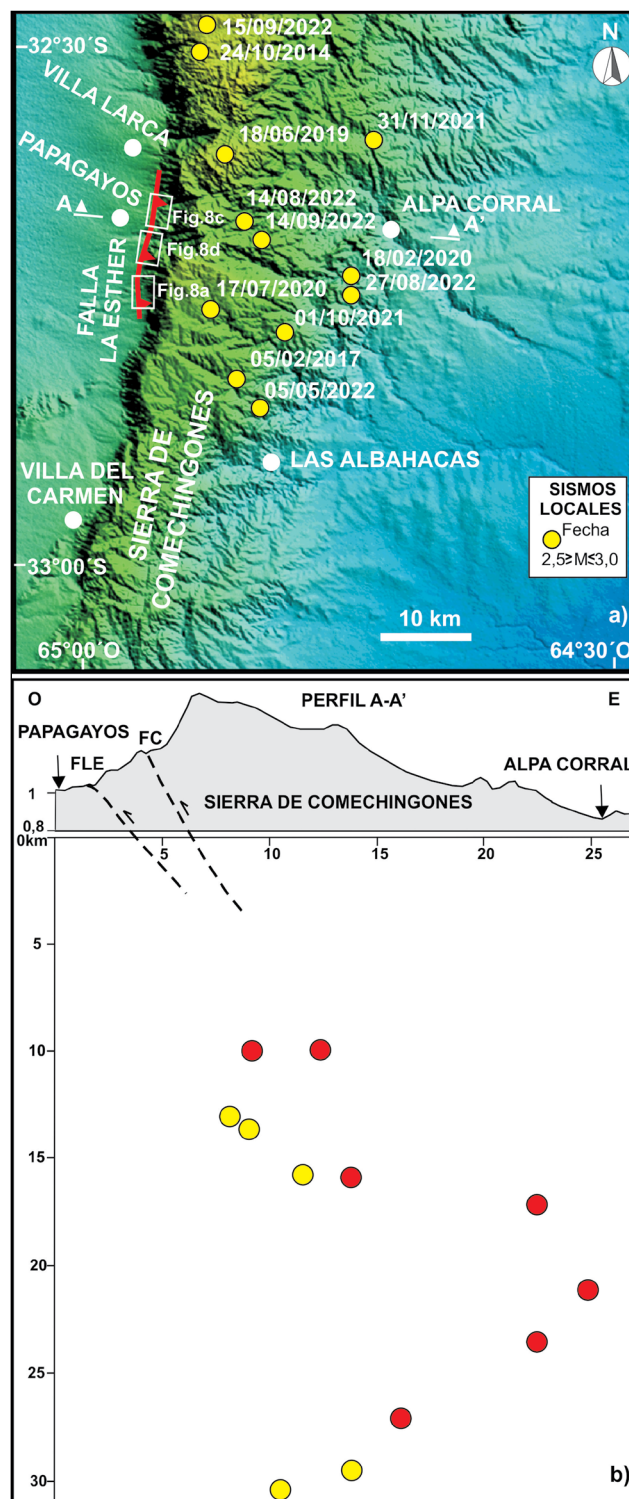


Figura 2. a) Mapa de epicentros de sismos locales en el entorno a la latitud de la falla La Esther. b) Perfil con la proyección en profundidad de las fallas La Esther (LE) y Comechingones (FC), y la distribución hipocentral de los registros sísmicos indicados en a). Los círculos en color rojo representan los registros más próximos a la falla en estudio, ubicados entre las latitudes aproximadas de los extremos a la traza de la misma.

do a gris que aflora de forma discontinua a lo largo de 12 km en el piedemonte occidental de la Sierra de Comechingones. En general, son granitoides que corresponden a la orogenia Achaliana en las Sierras Pampeanas, que se caracteriza por la intrusión de batolitos subcirculares a elípticos y cuerpos menores resultantes de una tectónica compresiva. Este sector se encuentra afectado por fallas que inclinan al este que han brechado y facilitado la alteración de la roca formando caolín, posiblemente illita y clorita. La edad de este es Devónico.

**Formación Papagayos (Formación Río Quinto):** Está compuesta por sedimentos rojizos, areniscas gruesas, conglomerados rojizos masivos con estratificación, margas y calcretas. Esta formación se presenta en forma de afloramientos aislados en el borde occidental de la Sierra de Comechingones entre Merlo y Villa del Carmen. En la zona próxima a la última localidad citada, yace en discordancia sobre el basamento cristalino y está constituida por areniscas conglomerádicas finas con abundante matriz limosa, color castaño rojizo claro, poco compacta. En los niveles conglomerádicos, la matriz se compone de arenas y los clastos son ígneos-metamórficos muy angulosos, de variables dimensiones, en algunos casos mayores a 0,20 m y en distintos sectores esta unidad se observa con una coloración rojiza. Se les asigna a estos depósitos un origen fluvial-aluvial y edad Mioceno tardío-Plioceno medio.

**Formación Uspara:** Está constituida por fanglomerados y cenoglomerados, que contienen arenas con selección y grado de consolidación diversa, y generalmente con cemento calcáreo. Son depósitos aluviales, con predominio de procesos de erosión hídrica mantiforme, reptación y remoción en masa del material coluvial y aluvio-eólico, y se encuentran presentes en el borde occidental de la Sierra de Comechingones. Su edad es Pleistoceno inferior a Pleistoceno medio.

**Conglomerado Merlo:** Está formado por gravas medias a gruesas, polimícticas, mal seleccionadas y muy friables, interestratificadas con niveles de arenas gruesas gravosas, de color castaño muy pálido. Los clastos de granitoides y metamorfitas presentan bordes angulosos a subangulosos. En algunos afloramientos del pie de la Sierra de Comechingones se reconoce a esta formación sobreyaciendo a la Formación Uspara, en contacto neto, erosivo. La edad de esta unidad es Pleistoceno superior.

**Depósito de Piedemonte:** Esta unidad se compone de materiales clásticos sueltos, donde es posible encontrar bloques de basamento de diferentes tamaños, hasta de 0,20 m, con una matriz de materiales más finos como arena, limo y arcilla. Es un depósito de abanico aluvial. Esta unidad es equivalente a la definida por Candiani *et al.* (2016) como Depósitos Pedemontanos y cuya edad es asignada como Holocena.

En la zona de corrimiento se reconocen materiales finos de origen cataclástico, arcillosos, de color pardo rojizo de aproximadamente 0,10 m de espesor.

## ANÁLISIS DE LA DEFORMACIÓN NEOTECTÓNICA

### Metodología

La metodología seguida para la ubicación de sitios potenciales a relevar, correspondientes al frente de deformación activo, fue la realización de un vuelo a baja altura y la toma de fotografías aéreas oblicuas con bajo ángulo de incidencia solar, el relevamiento geológico-estructural de campo y la detección de perfiles naturales o antrópicos para su descripción.

Se realizó el relevamiento de un perfil antrópico ubicado perpendicularmente al trazo de la falla en estudio aplicando técnicas paleosismológicas, donde se describieron las unidades estratigráficas, se delimitaron sus contactos y se relevaron las deformaciones expuestas. Además, se aplicaron fórmulas empíricas para estimar la paleomagnitud asociada a la falla.

### Características de la falla La Esther

La falla denominada La Esther es de movimiento inverso con una orientación que varía entre N 350°-360° e inclinación entre 37° y 55° E. El trazo es sub-paralelo a la falla de Comechingones y en su extremo sur se curva hacia esta estructura principal (Figuras 1 y 3).

La expresión superficial que presenta es una morfología sutil definida por una serie de cerrilladas bajas, discontinuas, con escarpa de cara al oeste, hacia la cuenca, y sub-paralelas al frente de levantamiento principal.

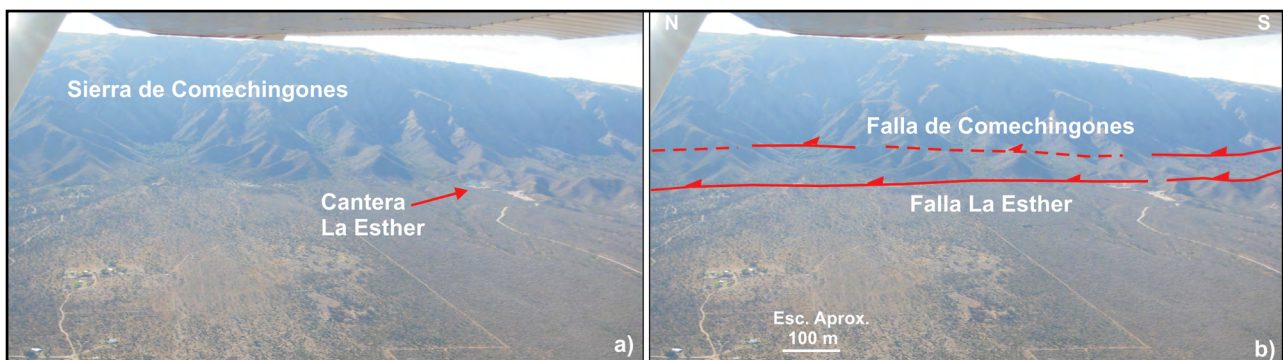


Figura 3. a) Fotografía oblicua tomada en dirección sureste donde se ubica la cantera La Esther. b) Dibujo sobre la fotografía donde se indica el trazo de la falla La Esther.



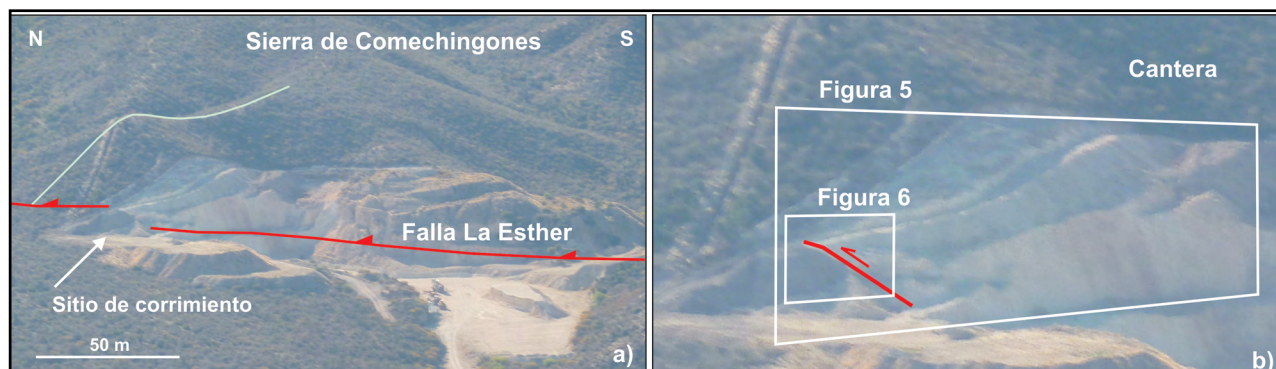


Figura 4. a) Fotografía aérea oblicua tomada en dirección este donde se presenta una vista de la cantera La Esther y el trazo de la falla La Esther. b) Dibujo sobre la fotografía oblicua, de mayor detalle, donde se indica falla La Esther y con recuadros blancos la ubicación de las Figuras 5 y 6

### Perfil Exposición de la Falla

Es un perfil antrópico que se encuentra en una cantera denominada La Esther ( $32^{\circ} 43' 18''$  S y  $65^{\circ} 58' 28''$  O), donde se realiza la explotación de caolín entre otros minerales y se ubica a aproximadamente 5 km al sur de la localidad de Papagayos (Figuras 1, 4 y 5). El perfil tiene una orientación N  $145^{\circ}$  con frente al suroeste, su longitud es de 7 m y posee 3 m de altura (Figura 6).

Las unidades presentes en el perfil se describen a continuación.

**Unidad A:** Litología que corresponde a un granitoide con un alto grado de alteración. De acuerdo con la altura que tiene el frente de explotación de la cantera, su espesor sería de al menos 20 m. En el sector que está en contacto con las unidades B, C, D y E (Figura 6) se encuentra cubierto por material suelto mezclado (arenas y arcillas) producto de la remoción mecánica generada por la labor de la cantera. Esta unidad se correlaciona con el basamento cristalino descrito en la estratigrafía.

**Unidad B:** Es un nivel, pardo rojizo, compuesto por clastos líticos angulosos cementados, de tamaño entre 0,1 y 0,2 m, que tienen una disposición caótica y provienen en su mayoría de granitoides. Se interpreta como un conglomerado con matriz areno limosa. Este depósito correspondería a un

abanico aluvial asociado al frente serrano. Su espesor es de al menos 1,4 m y posiblemente esta unidad, que se correlaciona con la Formación Papagayos, está de forma discordante sobre la unidad A.

**Unidad C:** Está compuesta por clastos líticos ígneos y metamórficos con matriz areno arcillosa. En el perfil Exposición de la Falla, entre los 0 m y 5,5 m, este depósito de aspecto fanglomerádico en contacto con la unidad A presenta una distribución caótica de los materiales y se reconocen clastos líticos angulosos que definen una laminación grosera. Se interpreta como un depósito de abanico del pie de la sierra que posee un espesor de al menos 1,2 m y se correlaciona con la Formación Uspara.

**Unidad D:** Está formada por clastos líticos angulosos tamaño gravas media a gruesa de origen ígneo-metamórfico, matriz soportada, limo-arcillosa. Su espesor es de al menos 0,7 m, se considera que corresponde a un depósito de abanico aluvial y se correlaciona con el Conglomerado Merlo.

**Unidad E:** Formada por clastos líticos, ígneos-metamórficos, angulosos, de tamaño grava con matriz sostén areno arcillosa y presenta una laminación poco visible. Se considera que corresponde a un depósito de abanico aluvial. Su espesor es variable entre 0,4 y 1 m. Se correlaciona con el Depósito de Piedemonte, holoceno, definido por Candiani et al. (2016).

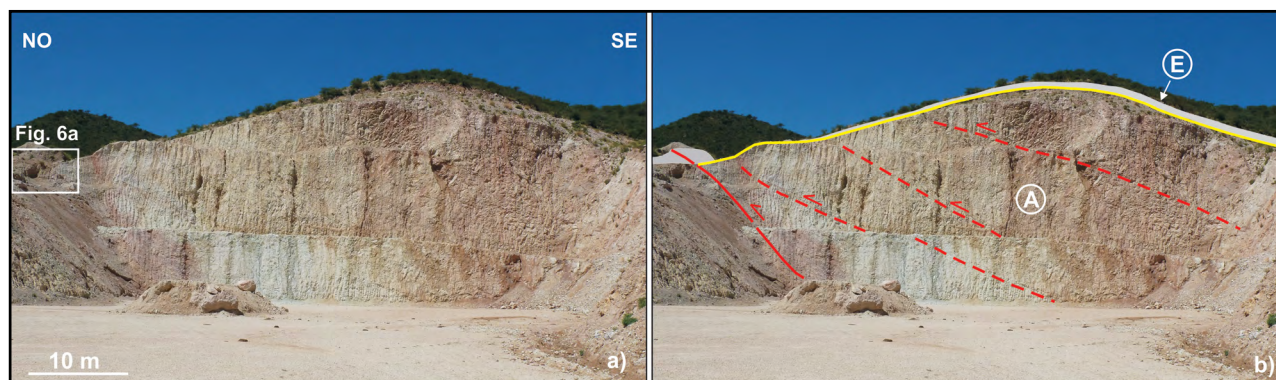
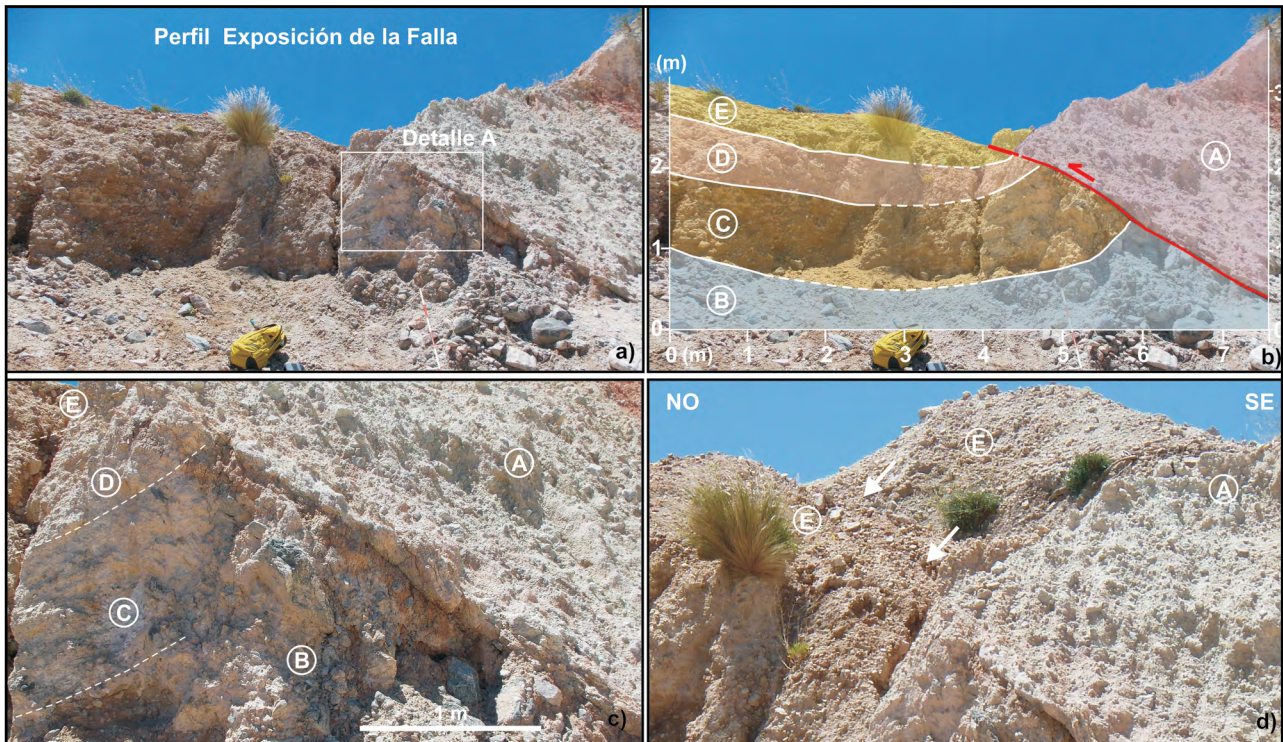


Figura 5. a) Vista panorámica en dirección norte de la cantera La Esther. b) Dibujo sobre la fotografía donde se indica la ubicación de los planos de fallas con línea roja y los planos inferidos en línea roja de trazos, la topografía del techo de la unidad A con línea de color amarillo y los sedimentos detríticos de depósitos modernos, Unidad E, en color gris.





**Figura 6.** a) Vista en dirección norte del perfil Exposición de la Falla. b) Dibujo sobre la fotografía del perfil con las unidades definidas y los contactos, indicados con línea blanca continua y los contactos inferidos con línea de trazos blanca. La falla principal está indicada con línea de color rojo. c) Detalle A. d) Vista de la falla propagando en los sedimentos holocenos, indicado con flechas blancas.

Las deformaciones que se han relevado se encuentran principalmente en la unidad A, que corresponde al bloque del techo de la falla. En esta unidad, donde la deformación y grado de alteración mecánica varían a lo largo del perfil (Figura 5), se reconocen varios planos de discontinuidad que pertenecen a la zona de deformación de la falla; el más importante, que corresponde a la falla La Esther, se ubica en el extremo noroeste del perfil y es un plano de falla de movimiento inverso con orientación N 350° e inclinación que varía entre 37° E en la parte superior a 47° y 55° E en la parte inferior. Los planos de fallas restantes, inferidos, poseen una orientación de N 350° e inclinaciones entre 30° y 20° E (Figura 5b).

Entre los 4 m y 7,5 m horizontales del perfil se reconoce que la unidad A sobrecorre a las unidades B, C y D (Figura 6b) que corresponden al bloque del piso de la falla. Además, el plano de falla que ha propiciado el corrimiento del basamento sobre los depósitos sedimentarios también ha afectado a los depósitos, detríticos de la unidad E (Figuras 5 y 6).

Los contactos de las unidades sedimentarias ubicadas en el bloque del piso de la falla, principalmente de la unidad C, presentan una curvatura cóncava hacia arriba entre los 0 m y 6 m horizontales, definiendo la geometría de un sinclinal que posee la traza axial con una orientación aproximadamente paralela al rumbo de la falla principal (Figura 6b). Esta deformación que presentan las unidades correspondería a un sinclinal por arrastre debido al empuje horizontal y vertical generado por el corrimiento del techo de la falla sobre las

unidades sedimentarias clásticas correspondientes al piso de la falla.

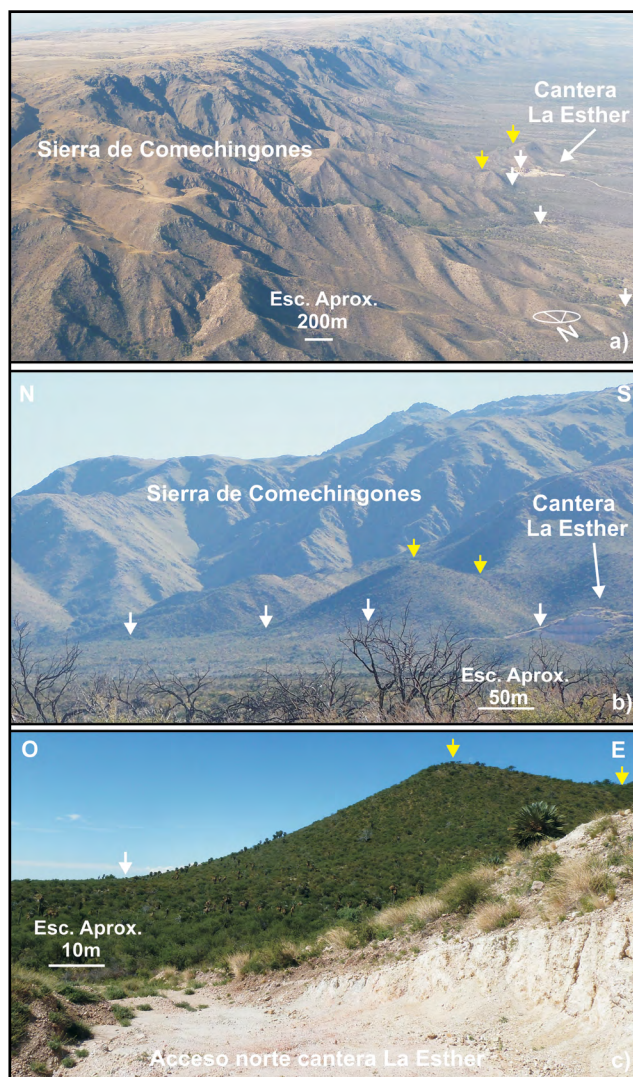
En el techo de la unidad A se reconoce una geometría que define una curvatura antiforme, con la orientación de la traza axial aproximadamente paralela al rumbo de la falla principal. El techo de esta unidad se encuentra coronado por los sedimentos clásticos de la unidad E, que poseen su mayor espesor en el sector este-sureste del perfil e inclinan hacia el este (Figura 5b).

La expresión morfológica superficial que genera esta estructura es sutil; son cerrilladas de escasa altura que poseen una asimetría topográfica similar a los principales bloques serranos, con una ladera que inclina al oeste de mayor pendiente, entre 12° y 14°, con escarpa de cara a la cuenca, hacia el oeste del piedemonte, donde se reconocen las evidencias de deformaciones correspondientes al frente activo (Figuras 4, 5 y 7) mientras que la otra ladera inclina alrededor de 3° al este con baja pendiente. Estas morfoestructuras disminuyen su altura tanto hacia el sur como hacia el norte, lo que dificulta la detección de la deformación en superficie. Esta variación en la altura posiblemente está vinculada a que el desplazamiento de la falla disminuya hacia los extremos de la traza.

## ESTIMACIÓN DE LA PALEOMAGNITUD

En los estudios tendientes a valorar el peligro sísmico asociado a fallas sismogénicas, uno de los principales pará-





**Figura 7. a) Vista oblicua en dirección sur donde se presenta la cantera y la falla La Esther. b) Vista panorámica hacia el este donde se muestra la cantera, el cerro de la Figura c) y la falla La Esther. c) Vista hacia el norte de un cerro próximo a la cantera que posee una ladera con pendiente hacia el este. En las figuras, la ubicación de la falla La Esther se ha indicado con flechas blancas y la inclinación hacia el este de las cerrilladas con flechas amarillas.**

metros a determinar es la magnitud. La energía liberada por un fuerte terremoto puede ser representada también por medio de la magnitud del momento sísmico ( $M_w$ ). La ventaja que ofrece esta determinación sobre otras formas de medición de la magnitud (amplitud de las ondas sísmicas) es que relaciona directamente el tamaño del terremoto y la longitud de la fuente, que son medidas en el campo (Reiter, 1988). Normalmente en estudios sobre el peligro sísmico son aplicadas relaciones empíricas para determinar la magnitud, algunas de estas relaciones indican una proporción lineal entre la longitud de ruptura de la falla y el tamaño del terremoto (de Polo y Slemmons, 1990).

Si bien son numerosas las evidencias primarias usadas para inferir la magnitud de un paleoterremoto, la longitud de

ruptura de la superficie y el desplazamiento máximo son los parámetros más comunes. La estimación de la primera de éstas es la que se realiza con un cierto grado de incertidumbre, partiendo de que es difícil corroborar que la escarpa generada, que es la evidencia actual, se haya formado por la ocurrencia de un único paleoterremoto. Esta situación puede incidir en la subestimación o sobrestimación de la longitud de ruptura superficial (Bonilla *et al.* 1984; Wells y Coppersmith 1994; McCalpin 2009).

En la estimación de paleomagnitud se usan modelos simples que se basan en datos medidos y modelos más complejos que se basan en datos inferidos por métodos indirectos, presentando estos modelos un cierto grado de incertidumbre, generado por la deficiencia en la longitud aportada por los datos históricos y la dificultad para medir con precisión la longitud de ruptura prehistórica. Por lo tanto, hay errores que pueden conducir a una sobre o sub estimación de la longitud de ruptura. Por ejemplo, si la traza de la superficie de ruptura es discontinua esto puede ser generado por erosión o estar sepultada por sedimentos más modernos, cuando probablemente la escarpa tiene mayor longitud y se encuentra obliterada (McCalpin 2009).

Se consideran como fuentes de incertidumbre a: los extremos de la traza no han sido determinados y examinados adecuadamente; los extremos de la traza pueden estar sepultados por sedimentos más modernos o vegetación que ocultan la ruptura; el desplazamiento de la falla disminuye o se extingue gradualmente hacia los extremos de la traza, resultando en algunos casos indefinidos; la disminución local del desplazamiento a lo largo de la falla está incorrectamente interpretada; dificultad para distinguir entre la falla principal y secundarias, e inclusión o exclusión de irregularidades en la geometría de la falla (McCalpin 2009).

La certidumbre en la estimación de una ruptura dependerá de la cantidad de desplazamiento original de la falla, del tiempo transcurrido pos evento, de los procesos geomorfológicos, topografía, clima y resistencia de los materiales a la erosión. Por ejemplo, en escarpas desarrolladas en materiales no cohesivos, estas se pueden obliterar más rápido, favoreciendo la subestimación la longitud de ruptura original (McCalpin 2009).

La longitud de ruptura superficial unitaria asumida en este estudio, para la falla La Esther, introduce importantes fuentes de incertidumbre. Por ejemplo, los extremos de la traza no se determinaron de forma precisa en campo debido a que los sitios para constatar su presencia son muy escasos, en algunos lugares inaccesibles por vegetación y en otros por estar sepultados con los sedimentos más modernos. No obstante, la longitud de la traza se ha determinado por medio de la distancia de una línea recta que une los extremos asumidos de la misma.

Para disminuir el grado de incertidumbre considerado, además de los relevamientos y revisiones de campo de algunos sitios ubicados sobre la traza de la falla, se recurrió al apoyo de la técnica de la toma de fotos aéreas a baja al-



tura, oblicuas y con bajo ángulo de incidencia solar. En la fotointerpretación se definió como base de referencia para delimitar la traza, a la evidencia de ruptura de la falla más reciente que genera una expresión morfológica superficial y que se encuentra asociada al perfil descripto que, si bien es sutil, es distintiva para el sector de estudio. Esto ha permitido reconocer y delimitar el rasgo rectilíneo superficial que genera esta traza formada por tramos algo discontinuos. Se asume que este rasgo morfológico superficial es generado por la ruptura del plano de falla que afecta a los sedimentos modernos, de edad holocena, definidos por Candiani *et al.* (2016). Si bien la traza es discontinua, se puede identificar a lo largo de, al menos, 14 kilómetros con una orientación paralela o subparalela a la traza de la falla principal, responsable del levantamiento serrano.

Con el fin de conocer de forma preliminar el tamaño de un paleoterremoto asociado a la falla La Esther se realizó una aproximación determinística utilizando formulas empíricas propuestas por distintos autores como Wyss (1979), Bonilla *et al.* (1984), Wells y Coppersmith (1994) y Somerville (2006), que permiten escalar el tamaño de un terremoto, determinando la magnitud superficial ( $M_s$ ) y la magnitud del momento sísmico ( $M_w$ ).

Los parámetros que fueron considerados en cálculo son la longitud del trazo de la falla, que se asume como la posible longitud de ruptura holocena, que es de 14 km, y la profundidad hipocentral de 16 km, que resulta del promedio de los últimos sismos registrados a la latitud de la falla La Esther.

Wyss (1979):

$$M_s = A + 4,15 \quad (1)$$

Donde A es igual al logaritmo de la superficie de la falla en  $\text{km}^2$ .

Bonilla *et al.* (1984):

$$M_s = 6,04 + 0,704 \text{ Log } L \quad (2)$$

Donde L es la longitud de ruptura de la falla en kilómetros.

Wells y Coppersmith (1994):

$$M_w = 3,98 + 1,02 \text{ Log } L \quad (3)$$

y Somerville (2006):

$$M_w = 3,78 + 1,05 \text{ Log } L \quad (4)$$

En (3) y (4) donde L es la superficie de ruptura de la falla en  $\text{km}^2$ .

Los valores obtenidos son: (1)  $M_s = 6,7$ ; (2)  $M_s = 6,5$ ; (3)  $M_w = 6,3$  y (4)  $M_w = 6,2$ .

## RESULTADOS

Las deformaciones relevadas resultan de un corrimiento causado por una falla de movimiento inverso, con vergencia hacia el oeste, que posiciona el basamento granítico, Devónico, sobre una secuencia de depósitos de materiales detríticos coluviales de pie de escarpa de edad Neógeno-Cuaternario.

Se determinaron los siguientes parámetros de la falla La Esther en el perfil Exposición de la Falla: la orientación del plano de falla principal es  $N 350^\circ$  y su inclinación de  $37^\circ$  E y aumenta hacia la parte inferior del perfil, hasta alcanzar  $55^\circ$  E; la orientación de los planos de fallas secundarias es  $N 350^\circ$  con inclinaciones entre  $30^\circ$  y  $20^\circ$  E (Figuras 5 y 6), el desplazamiento de inclinación es de al menos 4,3 m entre las unidades A y B (Figura 6b) y el rechazo vertical expuesto es de al menos 2,6 m de la unidad A (Figura 6b).

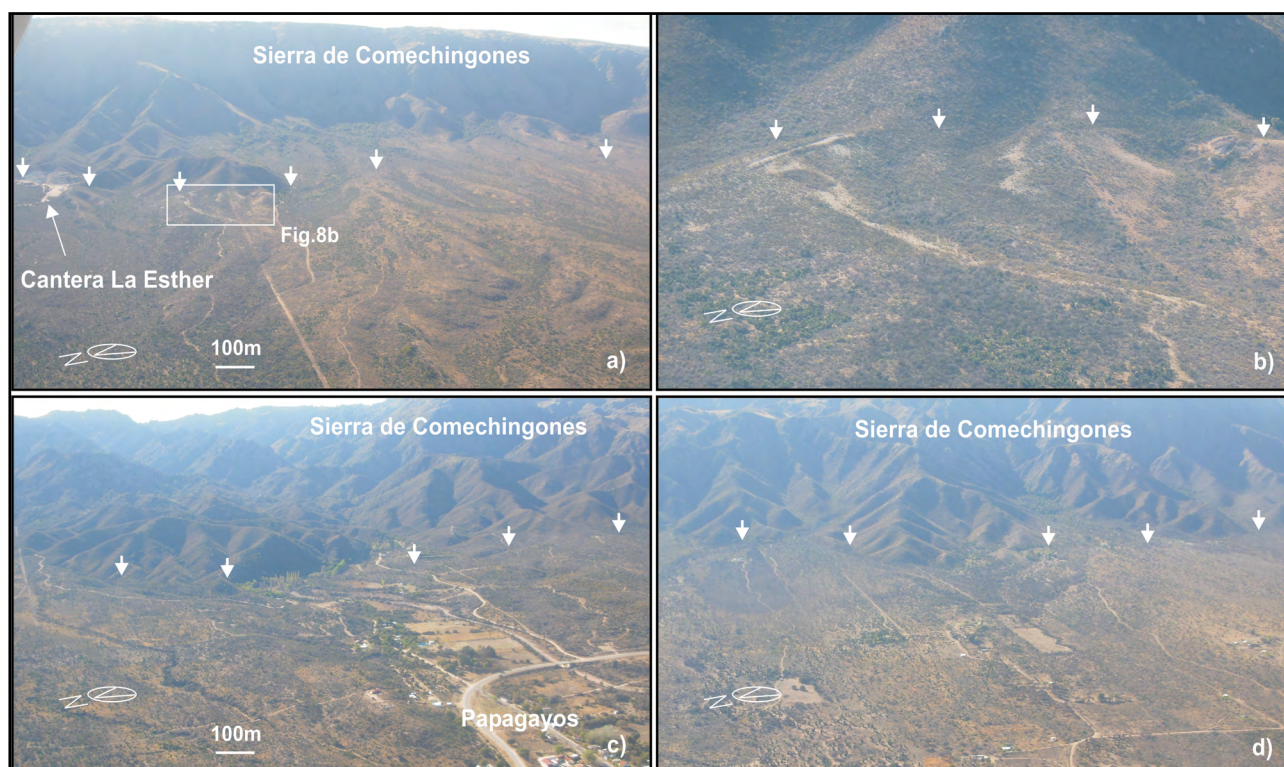
La morfología superficial que genera esta estructura en algunos sectores presenta un flanco con una escarpa al oeste del piedemonte, hacia el centro de la cuenca, con inclinación entre  $12^\circ$  y  $14^\circ$ , de hasta 10 m de altura y el otro flanco, coronado por la unidad E, con una inclinación de  $3^\circ$  hacia el este, lo que permite interpretar que la falla La Esther sería el borde activo de una morfoestructura, *piedmont foreland*, desarrollado en la zona de estudio.

La falla presenta una expresión sutil de difícil detección debido posiblemente a la conjunción de varios factores, como lo son el bajo rechazo vertical, la disminución del buzamiento hacia la superficie (Figuras 5 y 6), la obliteración por los depósitos detríticos fluviales y por la densa vegetación nativa del ámbito serrano (Figura 7c). Sin embargo, se ha logrado reconocer la expresión superficial del trazo de la falla en fotografías oblicuas, tomadas a baja altura y con bajo ángulo de incidencia solar, desde el sur de la cantera La Esther hasta el norte de la localidad de Papagayos (Figura 8). Estos rasgos superficiales, si bien son sutiles, han permitido determinar que la longitud del trazo de la falla es de al menos 14 kilómetros.

Si bien, la longitud de ruptura superficial unitaria considerada para la falla es uno de los parámetros que introduce la mayor incertidumbre en la estimación de la paleomagnitud, los resultados obtenidos de las relaciones empíricas aplicadas para calcular la  $M_s$  y  $M_w$  son entre 6,2 y 6,7. Siendo los mismos similares a los obtenidos para otras fallas con actividad cuaternaria comprobada correspondientes al Sistema de Fallas Comechingones. Por lo tanto, estos valores permiten tener una aproximación sobre el potencial de la falla en estudio.

## DISCUSIÓN

a) Una característica morfoestructural de la mayoría de las Sierras Pampeanas es que los bloques principales presentan una ladera tendida con baja pendiente (borde pasivo) y una corta, abrupta (borde activo), donde se concentra el fallamiento neógeno. En el ámbito pedemontano de alguno de estos bloques se han relevado cerrilladas limitadas por



**Figura 8.** a) Vista oblicua del sector de la cantera La Esther con la continuidad del trazo de la falla homónima hacia el sur. b) Vista oblicua ampliada de un sector de la Figura a). c) Vista oblicua con el trazo de la falla próxima a la localidad de Papagayos. d) Vista oblicua con el trazo de la falla en un sector entre la cantera y la localidad de Papagayos. En las figuras el trazo de la falla La Esther se ha indicado con flechas blancas. La ubicación de las figuras a), c) y d) se indican en la Figura 2a.

fallamiento cuaternario en su flanco externo. El desarrollo de estas cerrilladas o *piedmont foreland* genera un basculamiento de las superficies aluviales en sentido opuesto a la pendiente pedemontana en consonancia con el estilo estructural del bloque serrano principal (Costa 2019).

La presencia de lomas correspondientes a niveles aluviales, alineadas al frente serrano principal y basculadas hacia el este, que presentan en su extremo occidental una escarpa de cara hacia el oeste del piedemonte, donde se ubica el centro de la cuenca, se considera que corresponde a un *piedmont foreland* asociado a la falla La Aguada (Figura 1b), ubicada al sur de la falla La Esther (Castaldi *et al.* 2021b).

Las evidencias relevadas, características de un ambiente compresivo, correspondientes a la falla La Esther, tanto el corrimiento del basamento sobre depósitos detríticos como la morfología superficial desarrollada y el basculamiento hacia el este de depósitos detríticos holocenos, poseen correspondencia con los antecedentes mencionados. Por lo tanto, se interpreta que la falla en estudio corresponde al flanco externo de un *piedmont foreland* que se ubica en el piedemonte occidental de la Sierra de Comechingones, próximo a la localidad de Papagayos y que estas evidencias de movimientos recientes están indicando la migración del frente activo hacia el oeste del piedemonte, donde se ubica la cuenca.

**b)** Estudios realizados en las fallas El Molino y La Aguada (Figura 1b) indican que las mismas poseen potencial para

producir fuertes terremotos. En el caso de la primera, se ha determinado un posible agrupamiento de terremotos corticales para los últimos 7 ka. Estos eventos sísmicos han sido con ruptura superficial asociada, evidenciando la ocurrencia de fuertes paleoterremotos (Costa *et al.* 2018). Por otra parte, los estudios realizados en la falla La Aguada indican a partir de las evidencias de deformaciones relevadas que, la misma tendría potencial para generar eventos sísmicos fuertes que podrían alcanzar el umbral de energía suficiente para generar ruptura en superficie (Castaldi *et al.* 2021b).

La similitud que tienen algunas características de la falla en estudio con las nombradas anteriormente como, que es una falla de movimiento inverso que inclina al este, ubicada en el borde externo de un *piedmont foreland* y que posee evidencias de movimientos cuaternarios, junto a los valores paleomagnitud obtenidos, permiten considerar que la falla La Esther también podría tener potencial para generar fuertes terremotos.

**c)** En el Sistema de Fallas Sierra Chica de Córdoba se ha logrado documentar la migración del frente de corrimiento neotectónico y se reconoce que no presenta morfologías de fallamiento diagnósticas asociadas. En los valles de Los Rarres y Calamuchita se ha reconocido un frente de fallamiento cuaternario externo al frente serrano, y la zona correspondiente a la deformación frontal activa asociada presenta lomas sin escarpas notorias u otro tipo de morfología diag-



nóstica de fallamiento (Sagripanti *et al.* 2014; Costa *et al.* 2021). Estas lomadas, formadas por rocas del basamento cristalino, están coronadas por una delgada capa de depósitos detríticos cuaternarios. Las rocas corresponden al bloque elevado de la falla y, en proximidades de los planos de corrimiento cuaternarios, presentan una importante desagregación mecánica, con un ángulo de fallamiento menor a 45° E en la zona de deformación frontal activa (Costa 2019).

La falla La Esther en general no presenta morfologías de fallamiento que indiquen su presencia; solo en algunos tramos de su trazo se pueden reconocer cerrilladas de baja altura, con una ladera tendida que inclina al este, como también sutiles deformaciones superficiales detectadas en las fotografías tomadas a baja altura. Las evidencias morfológicas superficiales que genera esta estructura, junto al hecho que la roca del basamento cristalino correspondiente al bloque elevado de la falla, en proximidades de los planos de corrimiento tiene desagregación mecánica y que está coronada por un depósito detrítico holoceno inclinado hacia el este, presentan similitud con las descritas anteriormente para el Sistema de Fallas Sierra Chica. Por lo tanto, se interpreta que las evidencias de deformaciones y morfologías relevadas corresponden a un sector de deformación frontal activa presente en el piedemonte occidental de la Sierra de Comechingones.

**d)** Las fallas inversas El Molino, Pisco Yaco, La Aguada, entre otras, se considera que forman parte del Sistema de Fallas Comechingones. Estas estructuras han tenido actividad durante el neógeno-cuaternario, se ubican en el flanco externo del *piedmont foreland* correspondiente al frente activo de deformación (Costa *et al.* 2018; Castaldi *et al.* 2021b), tienen una orientación paralela a la falla principal responsable del levantamiento serrano, inclinan al este y en su extremo sur se curvan hacia la falla principal. La ubicación de la falla La Esther en el flanco externo del *piedmont foreland*, piedemonte occidental de la Sierra de Comechingones, su orientación e inclinación, las deformaciones en sedimentos neógenos-cuaternarios que posee, la curvatura de su extremo sur hacia la falla principal, indicando que esta estructura se podría unir con la misma o bien que continúa como no emergente, se suponen características similares a las reportadas en las fallas citadas anteriormente. Por lo tanto, se considera que esta falla también formaría parte del sistema de fallas mencionado.

## CONCLUSIONES

**a)** Se concluye que tanto las deformaciones relevadas que corresponden a un corrimiento del basamento, Devónico, sobre sedimentos no consolidados de edad Neógeno-Cuaternario, como la presencia de depósitos detríticos holocenos que inclinan hacia el este son evidencias de la actividad, al menos, holocena de la falla La Esther.

**b)** Las interpretaciones realizadas sobre la base de las evidencias relevadas permiten concluir que la falla La Esther es una estructura que forma parte del Sistema de Fallas Comechingones y sería la responsable de la formación de una morfoestructura con las características de un *piedmont foreland* en el piedemonte occidental de la Sierra de Comechingones.

**c)** La presencia de la falla La Esther, que forma el límite del flanco externo del *piedmont foreland*, donde se concentra la deformación neógena-cuaternaria, permite concluir que existen evidencias del frente activo de deformación en el piedemonte occidental de la Sierra de Comechingones en el entorno a los 32° 43' 18" S y 65° 58' 28" O, entre las localidades de Papagayos y Villa del Carmen.

**d)** Los valores de  $M_s$  y  $M_w$  obtenidos en la aproximación realizada por medio de fórmulas empíricas, junto a las deformaciones y morfologías relevadas en este trabajo, permiten concluir que la falla La Esther tendría potencial para generar fuertes terremotos.

**e)** Se considera de importancia mencionar que en un radio de 100 km de la falla La Esther se encuentran ubicadas varias centrales hidroeléctricas, una central nucleoelectrica, importantes centros turísticos y un emplazamiento urbano con cerca de 200.000 habitantes, y como hasta el presente no se conoce con certeza el potencial para generar fuertes terremotos que posee esta falla, es posible que el peligro sísmico asociado a esta estructura puede estar siendo subestimado.

## CONTRIBUCIÓN DE AUTORÍA

El diseño del estudio, análisis e interpretación de los datos y la redacción del borrador original fue elaborado por Guillermo Sagripanti. Los autores Guillermo Sagripanti y Daniel Origlia realizaron la revisión del manuscrito, edición final y aprobación del manuscrito final.

## CONFLICTO DE INTERESES

Los autores expresan que no existe algún conflicto de interés.

## AGRADECIMIENTOS

Al editor temático MSc. Norberto Jorge Bejerman, a los revisores por el tiempo dedicado a la lectura crítica del manuscrito, observaciones y sugerencias que han permitido mejorar este artículo.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alvarado, P., Castro de Machuca, B. y Beck, S. (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.
- Bonilla, M., Mark, R. y Lienkaemper, J. (1984). Statistical relations among earthquake magnitude, surface rupture length, and surface fault displacement. *USGS. Open-File Report* 84-256. Version 1.1.
- Bull, W. (2008). *Tectonic Geomorphology of Mountains: A New Approach to Paleoseismology*. Blackwell Publishing, 316 p., London
- Candiani, J., Ojeda, G. y Ulacco, H. (2016). Hoja Geológica 3366-II Villa Merlo. Provincia de San Luis y Córdoba. *Instituto de Geología y Recursos Minerales, Servicio Geológico Minero Argentino*. Boletín N° 415, 134 p., Buenos Aires.
- Castaldi, G., Villalba, D. y Sagripanti, G. (2021a). Evidencias de deformación cuaternaria asociadas a la falla Villa del Carmen. Extremo sur del Sistema de Fallas de Comechingones. Sierras Pampeanas de Córdoba y San Luis. *18° Reunión de Tectónica, San Luis. Libro de Resúmenes* pág. 29.
- Castaldi G., Villalba, D., Sagripanti, G. y Degiovanni, S. (2021b). Evidencias de actividad cuaternaria asociadas a la falla La Aguada, piedemonte occidental de la Sierra de Comechingones. Sierras Pampeanas de Córdoba y San Luis. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 78 (4): 497-511.
- Chiesa, J., Basaez, A., Navío, J., Lucero, N., Ojeda, G. y Strasser, E. (2011). Mioceno-Plioceno estratigraphy of the San Luis Province, Argentina. *Cenozoic Geology of the Central Andes of Argentina*. SCS Publisher. 75-89.
- Chiesa, J., Lucero N. y Basaez, A. (2019). Estratigrafía, paleontología y evidencias paleoambientales del Pleistoceno de San Luis. *Opera lilloana* 52, *Mioceno al Pleistoceno del centro y norte de Argentina*: 420-445.
- Costa, C.H. (1999). Rasgos estructurales del territorio argentino, tectónica cuaternaria en las Sierras Pampeanas. *Instituto de Geología y Recursos Minerales - SEGEMAR. Geología Argentina, Anales* 29: 779-784.
- Costa, C. (2019). La migración del frente de corrimiento neotectónico de las Sierras Pampeanas y su importancia morfológica. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 76 (4): 315-325. Número especial: Tectónica.
- Costa, C. y Morla, P. (1996). Algunos rasgos estructurales de la depresión del río Conlara, provincias de San Luis y Córdoba. *13° Congreso Geológico Argentino, Actas* 2: 283, Buenos Aires.
- Costa, C. y Vita Finzi, C. (1996). Late holocene faulting in the southeast Sierras Pampeanas of Argentina. *Geology, Vol.* 24 (12): 1127-1130.
- Costa, C., Ortiz Suarez, A., Gardini, C., Chiesa, J., Ojeda, G., Strasser, E., Escayola, M., Kraemer, P., Ulacco, H., Morla, P., Almandoz, G. y Coniglio, J. (1998). *Hoja Geológica 3366-II, Santa Rosa. Servicio Geológico Minero Argentino, Boletín* N° 373, 106 p., Buenos Aires.
- Costa, C., Gonzalez Díaz, E., Murillo, M., Gardini, C., Giaccardi, A., Sequeiros, J. y Bea, S. (1999). Morfoneotectónica del frente de levantamiento andino de la Sierra de Comechingones, Provincia de Córdoba y San Luis. *14° Congreso Geológico Argentino, Actas* 1: 32-33.
- Costa C.H., Machette, M.N., Dart, R., Bastias, H., Paredes, J., Perucca, L., Tello, G. y Haller, K. (2000). Mapa and Database of Quaternary Faults and Folds in Argentina. *International Lithosphere Program, USGS. Open-file report* 00-0108: 81p.
- Costa, C.H., Murillo, V., Sagripanti, G.L. y Gardini, C. (2001). Quaternary intraplate deformation in the southeastern Sierras Pampeanas, Argentina. *Journal of Seismology* 5: 399-409.
- Costa, C., Massabie, A., Sagripanti, G., Brunetto, E. y Coppolecchia, M. (2014). Neotectónica. *Relatorio 19° Congreso Geológico Argentino, Actas*: 725-746, Córdoba.
- Costa, C.H., Owen, L.A., Ricci, W.R., Johnson, W.J. y Halperin, A.D. (2018). Holocene activity and seismogenic capability of intraplate thrusts: Insights from the Pampean Ranges, Argentina. *Tectonophysics* 737: 57-70. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2018.05.002>
- Costa, C., Morla, P., Hauriab, N. y Garroa, H. (2019). The structural framework of an intermountain basin in the Pampean Ranges of Argentina; the Conlara depression. *Journal of South American Earth Science* 96: 102387.
- Costa, C., Owen, L., Johnson, W. y Kirby, E., (2021). Quaternary activity and seismogenic potential of the Sierra Chica Fault System, Argentina. *Journal of South Am. Earth Sc.* <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2021.103328>



- De Polo, C. y Slemmons, B. (1990). Estimation of earthquake size for seismic hazards. *Geological Society of America. Vol. III*, p. 1-22.
- Gordillo, C.E. y Lencinas, A.N. (1979). Sierras Pampeanas de Córdoba y San Luis. *Segundo Simposio de Geología Regional Argentina, Academia Nacional de Ciencias, Córdoba. Actas: 577-650.*
- Ikeda, Y. (1983). Thrust-front migration and its mechanism: Evolution of intraplate thrust systems. *Bulletin Department Geography University Tokyo 15: 125-159.*
- Jordan, T., Isacks, B., Allmendinger, R., Bremer, J. y Ramos, V. (1983). Andean Tectonics related to geometry of subducted Nazca Plate. *Geological Society of America Bulletin 94: 341-361.*
- Jordan, T. 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.*
- McCalpin, J.P. (2009). *Paleoseismology*. Academic Press Inc., 615 p., California.
- Massabie, A. (1987). Neotectónica y sismicidad de la región de Sierras Pampeanas Orientales, Sierras de Córdoba, Argentina. *10° Congreso Geológico Argentino, Simposio de Neotectónica, Actas: 271-274, Tucumán.*
- Morla, P. y Costa, C., (2004). El frente de levantamiento de la Sierra de Comechingones, entre Papagayos y Villa del Carmen (Provincia de San Luis). *Resúmenes 12° Reunión sobre Microtectónica y Geología Estructural: 26.*
- 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.
- Pilger, R. (1981). Plate reconstructions, aseismic ridges, and low-angle subduction beneath the Andes. *Geological Society of America Bulletin, Part 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 Pérez, D. (2002). The Pampean flat-slab of the Central Andes. *Journal of South American Earth Sciences 15: 59-78.*
- Reiter, L., 1988. *Earthquake hazard analysis*. Columbia University Press. 241p.
- Richardson, T., Gilbert, H., Anderson, M. y Ridgway, K. D. (2012). Seismicity within the actively deforming Eastern Sierras Pampeanas, Argentina. *Geophysics 188:408-420.*
- Sagripanti, G.L. (2021). Evidencias de actividad cuaternaria asociadas a fallas ubicadas entre 32°27' y 32°44' LS. Piedemonte occidental de la Sierra de Comechingones, San Luis. *18° Reunión de Tectónica, San Luis. Libro de Resúmenes* pág. 78.
- Sagripanti, G. y Villalba, D. (2020). Deformaciones holocenas en el piedemonte oriental de la Sierra de Comechingones. Falla Las Lagunas. *Revista de la Asociación Geológica Argentina 77 (2): 245-260.*
- Sagripanti, G., Villalba D., Bettiol A. y Seitz, C. (2009). Sismicidad y paleosismicidad en la región sur de la provincia de Córdoba. Análisis del peligro y riesgo sísmico asociado. *Revista de la Asociación Argentina de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente 23: 45-53.* ISSN 1851-7838.
- Sagripanti, G.L., Schiavo, H.F., Felizzia, J., Villalba, D., Aguilera, D., Giaccardi, A. y Membrives, J. (2011). Fuertes paleosismos de intraplaca y sus retornos vinculados a la falla Las Lagunas, Sierras Pampeanas de Córdoba. *Revista de la Asociación Geológica Argentina 68: 52-70.*
- Sagripanti, G.L., Villalba, D. y Villegas, M. (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.*
- Sagripanti, G.L., Villalba, D., Villegas, M., Castaldi, G., Benito, E. y Muratore, N. (2014). Avances en la Valoración del Peligro Sísmico en Fallas con Actividad Cuaternaria. Sierras Pampeanas de Córdoba y San Luis. *Revista de la Asociación Argentina de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente 32: 93-105.*
- Sagripanti, G., Villalba, D., Castaldi G., Giménez, M., Aguilera, D. y Giaccardi, A. (2018). Actividad cuaternaria asociada a la falla Las Rosas, Sierras Pampeanas de Córdoba. *Revista de la Asociación Geológica Argentina 75 (3): 409-424.*
- Sagripanti, G., Villalba, D. y Andreazzini, J. (2022). Actividad cuaternaria entre el piedemonte y la planicie orientales de la Sierra de Comechingones asociada a la falla Santa Catalina. Sierras Pampeanas de Córdoba, Argentina. *Revista de la Asociación Geológica Argentina 79 (2): 198-217.*

- Santa Cruz, J. (1973). Informe del mapa geológico final del Valle del Conlara, San Luis. C.A.A.A.S. *Dirección Nacional de Geología y Minería*, Inédito. Buenos Aires.
- Santa Cruz, J. (1979). Geología de las unidades sedimentarias aflorantes en el área de las cuencas de los ríos Quinto y Conlara. Provincia de San Luis. República Argentina. *7° Congreso Geológico Argentino. Actas 1:335-349*. Neuquén.
- Sato A.M., González, P.D. y Llambías, E.J. (2003). Evolución del orógeno Famatiniano en la Sierra de San Luis: magmatismo de arco, deformación y metamorfismo de bajo a alto grado. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 58 (4): 487-504.
- Smalley, R.Jr., Pujol, J., Regnier, M., Chiu, J.M., Chatelain, J.L., Isacks, B.L., Araujo, M. y Puebla, N. (1993). Basement seismicity beneath the Andean Precordillera thin-skinned thrust belt and implications for crustal and lithospheric behavior. *Tectonics* 12: 63-76.
- Somerville, P. (2006). Review of magnitude-area scaling of crustal earthquakes. *Rep. to WGCEP, 22.*, URS Corp., Pasadena.
- Villalba, D., Castaldi, G. y Sagripanti, G. (2017). Nuevas evidencias de actividad cuaternaria en la Sierra de Comechingones: falla La Esther. *20° Congreso Geológico Argentino, Actas: 192-193*, Tucumán.
- Wells, D. y Coopersmith, K. (1994). New empirical relationships among magnitude, Rupture Length, Rupture Width, Rupture area and surface displacement. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 84, p. 974-1.002.
- Wyss, M. (1979). Estimating maximum expectable magnitude of earthquakes from fault dimensions. *Geology* 7, 336-340.