

## Análisis neotectónico del extremo norte del sobrecorrimiento La Cantera, provincia de San Juan, Argentina

José Luis Millán<sup>1,\*</sup> y Laura P. Perucca<sup>1,2,\*\*</sup>

<sup>1</sup> Departamento Geología, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales,  
Universidad Nacional de San Juan (FCEfyN-UNSJ), Av. Ignacio de La Roza y Meglioli, 5400 San Juan, Argentina.

<sup>2</sup> CONICET, Gabinete de Neotectónica. Instituto de Geología, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales,  
Universidad Nacional de San Juan (INGEO-FCEfyN-UNSJ), Av. Ignacio de La Roza y Meglioli 5400, San Juan, Argentina.

\* g26argentina@hotmail.com, \*\* lperucca@unsj-cuim.edu.arx

### RESUMEN

El área de estudio corresponde al sector norte del sobrecorrimiento La Cantera, ubicado a 56 km al noroeste de la ciudad de San Juan y a unos 30 km de los tres principales embalses ubicados sobre el río San Juan. El objetivo de este estudio consistió en conocer los aspectos morfotectónicos de la zona, efectuar un análisis directo e indirecto de la traza de la falla a partir del estudio de la red de drenaje y analizar las características generales del trazo que afecta las unidades holocenas del corrimiento La Cantera. La red de drenaje de la zona es dendrítica, típica de abanicos aluviales y muestra anomalías que se relacionan directamente con la traza de la falla La Cantera. Se determinaron dos tipos de anomalías: aguas arriba del escarpe de la falla, la red posee un patrón de drenaje en rastrillo (broom-shaped river pattern) y en el bloque elevado la red dendrítica se vuelve más densa e incidida.

Se analizaron cuatro trincheras naturales y una artificial, las cuales permitieron identificar el plano del corrimiento La Cantera, de rumbo norte-sur y buzamiento aproximado 30° al oeste. En dos trincheras se reconocieron dos cuñas coluviales que señalarían al menos dos episodios sísmicos. En una de ellas se pudo datar por el método C14 un nivel con una incipiente edafización afectado por la falla, obteniéndose una edad de  $4580 \pm 50$  AP, lo que indicaría que uno de los eventos ocurrió con posterioridad a la formación de ese nivel.

Palabras clave: neotectónica, corrimiento La Cantera, Precordillera, Argentina.

### ABSTRACT

The study area is located in the north portion of the La Cantera thrust, 56 km northwest of the city of San Juan and about 30 km of the three major dams along the San Juan River. The aim of this study was to determine some morphotectonic aspects of the area, making direct and indirect analyses of the drainage network and general characteristics of the fault trace, affecting the Holocene units. The drainage design is dendritic, typical of alluvial fans, showing some anomalies that are directly related to the trace of La Cantera thrust. Two types of anomalies were identified: upstream of the fault scarp the network has a broom-shaped river pattern and in the hanging wall, the dendritic network becomes more dense and incised.

We analyzed five natural and artificial trenches, which helped to identify the fault plane, who trends north-south and dips approximately 30°W. Besides, two colluvial wedges were recognized in two trenches

*that would indicate at least two seismic events. In one of them a level with incipient pedogenesis affected by the fault, could be dated (C14) resulting in an age of  $4580 \pm 50$  BP, suggesting that one of the events occurred after the formation of this level.*

*Key words: neotectonics, La Cantera thrust, Precordillera, Argentina.*

## INTRODUCCIÓN

El área de estudio se encuentra ubicada aproximadamente en el centro de la Provincia de San Juan entre los  $31^{\circ}04'$  y  $31^{\circ}10'S$  y  $69^{\circ}01'$  y  $68^{\circ}58'O$ , departamento de Ullum, al noroeste de la capital de San Juan. La zona corresponde a la provincia geológica de Precordillera Central, borde occidental de la sierra de La Cantera y oriental de la sierra de La Invernada (Figura 1). La sierra de La Invernada se destaca como un cordón orográfico alargado en sentido norte-sur, con alturas máximas de 3700 m sobre el nivel del mar. La sierra de La Cantera también tiene orientación norte sur y está compuesta por areniscas y lutitas de edad devónica.

Los ríos y arroyos ubicados en el faldeo oriental de la sierra de La Invernada y occidental de la sierra de La Cantera, drenan a partir del mogote La Leona hacia el norte en la cuenca de Gualilán. La Pampa de Gualilán constituye una cuenca endorreica, que recibe el aporte de la red de avenamiento más importante de la región. Hacia el sur del mogote La Leona los arroyos provenientes tanto de la sierra de La Invernada como de la sierra de La Cantera drenan hacia el sur por la quebrada de La Cantera hasta el río San Juan (Figura 1). Las deformaciones cuaternarias modifican la red de drenaje ya que los pequeños arroyos tributarios son susceptibles a cualquier modificación sutil de la topografía en función de su tasa de erosión (Audemard, 1999).

Existen muy escasos antecedentes referidos a las características de la falla La Cantera. Entre los primeros se puede mencionar a Bastías (1986), quien identificó evidencias muy notorias de actividad tectónica cuaternaria en el faldeo occidental de la sierra de La Cantera, al norte del río San Juan. Calculó la longitud de la falla en aproximadamente 20 km con muy buenas evidencias de reactivación Holocena, en especial cuando la falla atraviesa el río de la quebrada Gualilán, donde observa cómo el curso fue desplazado elevándose el bloque oeste. Masramon (1986) identificó evidencias de neotectónica en el área de Pachaco, que podrían constituir la prolongación meridional de la denominada falla La Cantera.

Mingorance (1998) reconoció para la falla La Cantera dos sectores según las características analizadas. Por un lado, el sector norte caracterizado por una mayor actividad tectónica cuaternaria en los frentes montañosos y mayor actividad sísmica histórica cortical. En el sector sur la deformación cuaternaria se concentró casi exclusivamente en el valle intermontano, indicado por las fallas que afectan el piedemonte y la escasa actividad tectónica en los frentes montañosos. Finalmente señaló, basado en el análisis y cuantificación de indicadores paleosísmicos identificados

a lo largo de la falla La Cantera, que al menos tres eventos sismotectónicos individuales de distinta magnitud, sincronización temporal y localización fueron generados por la falla en tiempos prehistóricos e históricos, siendo el evento más importante el terremoto de 1924 ocurrido en el sector norte ( $M_s=6.0$ ). Sin embargo, no se conocían hasta la fecha datos sobre su cinemática. Tampoco existían estudios paleosísmicos previos de detalle a lo largo de su trazado, ni dataciones que permitieran caracterizar con exactitud esta fuente sismogénica (Costa *et al.* 2000).

El objetivo de este trabajo es mejorar el conocimiento del potencial sísmico del corrimiento La Cantera, situado a escasos 50 km al noroeste de la ciudad de San Juan ( $>700,000$  habitantes) y entre 35 y 40 km de los principales embalses de la región. Además, analizar las modificaciones de la red de drenaje impuestas por el corrimiento La Cantera y algunos afloramientos naturales de los planos de falla que permitieron obtener datos estructurales del mismo. Finalmente, determinar la actividad holocena de la falla para el tramo norte de la falla.

## MARCO TECTÓNICO Y GEOLÓGICO

Entre los  $29^{\circ}$  y  $33^{\circ}S$ , la placa de Nazca se introduce por debajo de la Sudamericana a unos 100 km de profundidad, a una tasa de 6.3 cm/año (Ramos 1988, Kendrick *et al.* 2003) y un azimut de aproximadamente  $78^{\circ}$  (Vigny *et al.* 2009). Esta subhorizontalización se habría iniciado entre los 8 y 10 Ma (Jordan y Gardeweg 1987, Kay *et al.* 1991). La evolución tectónica en este sector es el resultado de la interacción entre la placa Sudamericana y el segmento de la placa de Nazca que contiene a la dorsal de Juan Fernández, produciendo la ausencia de volcanismo y una abundante sismicidad cortical entre estas latitudes (Jordan *et al.* 1983, 1993; Kay y Mpodozis 2002) (Figura 2a y 2b).

La provincia geológica Precordillera es un orógeno paleozoico que muestra tres estilos tectónicos diferentes (Precordillera Occidental, Central y Oriental). Precordillera Central es una faja plegada y corrida de piel fina asociada a pliegues con vergencia oriental (Ramos 1999). Posee cordones montañosos que se desarrollan a lo largo de todo San Juan con rumbo N-S. Sus afloramientos corresponden principalmente a rocas ordovícicas y siluro-devónicas, sobre las que yacen rocas carboníferas y terciarias en neta discordancia o en relación por falla. Estructuralmente es una faja plegada y corrida epidérmica con vergencia hacia el este constituida por corrimientos principales con su nivel de despegue en la secuencia cambro-ordovícica (Allmendinger *et al.* 1990).

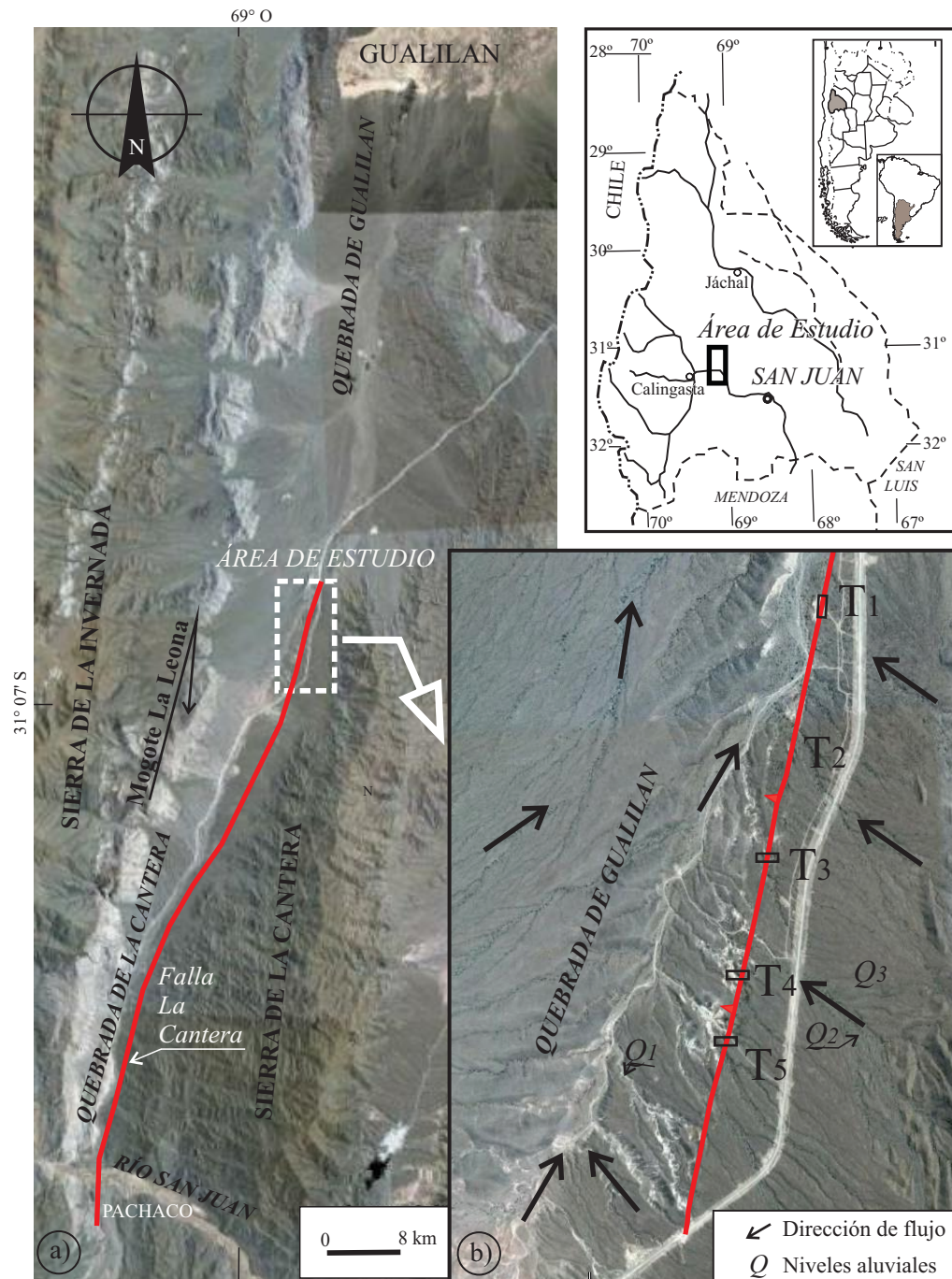


Figura 1. a) Mapa de Ubicación del área de estudio y b) Detalle del extremo norte del corrimiento La Canter, localización de trincheras (T1 a T5) y niveles aluviales Q<sub>3</sub> a Q<sub>1</sub>.

El origen de las deformaciones ha sido sugerido por Baldis (1975), por la presencia de un bloque de basamento rígido y alargado, prácticamente no deformado desde el Paleozoico, en donde las secuencias cámbricas a devónicas se depositaron en pseudoconcordancia y no se manifestaron mayores discontinuidades angulares con el depósito de rocas del Carbonífero y Terciario. Esto produjo una comarca cubierta de sedimentos subconcordantes y con inclinación regional hacia el oeste. El efecto de los empujes andinos-

terciarios produjo la ruptura y despegue de los sobrecorrimientos (*over-thrusts*). Del análisis efectuado por Baldis y Chebli (1969), Baldis (1975) y Baldis *et al.* (1990), se concluye que el horizonte de despegue general está incluido dentro de las calizas cambro-ordovícicas, y posiblemente coincide con los cambios verticales de facies dolomíticas a calcáreas. Beer y Jordan (1989), al estudiar la relación de la deformación de la faja de sobrecorrimientos con el desarrollo del antepaís terciario del Bermejo, concluyeron que el

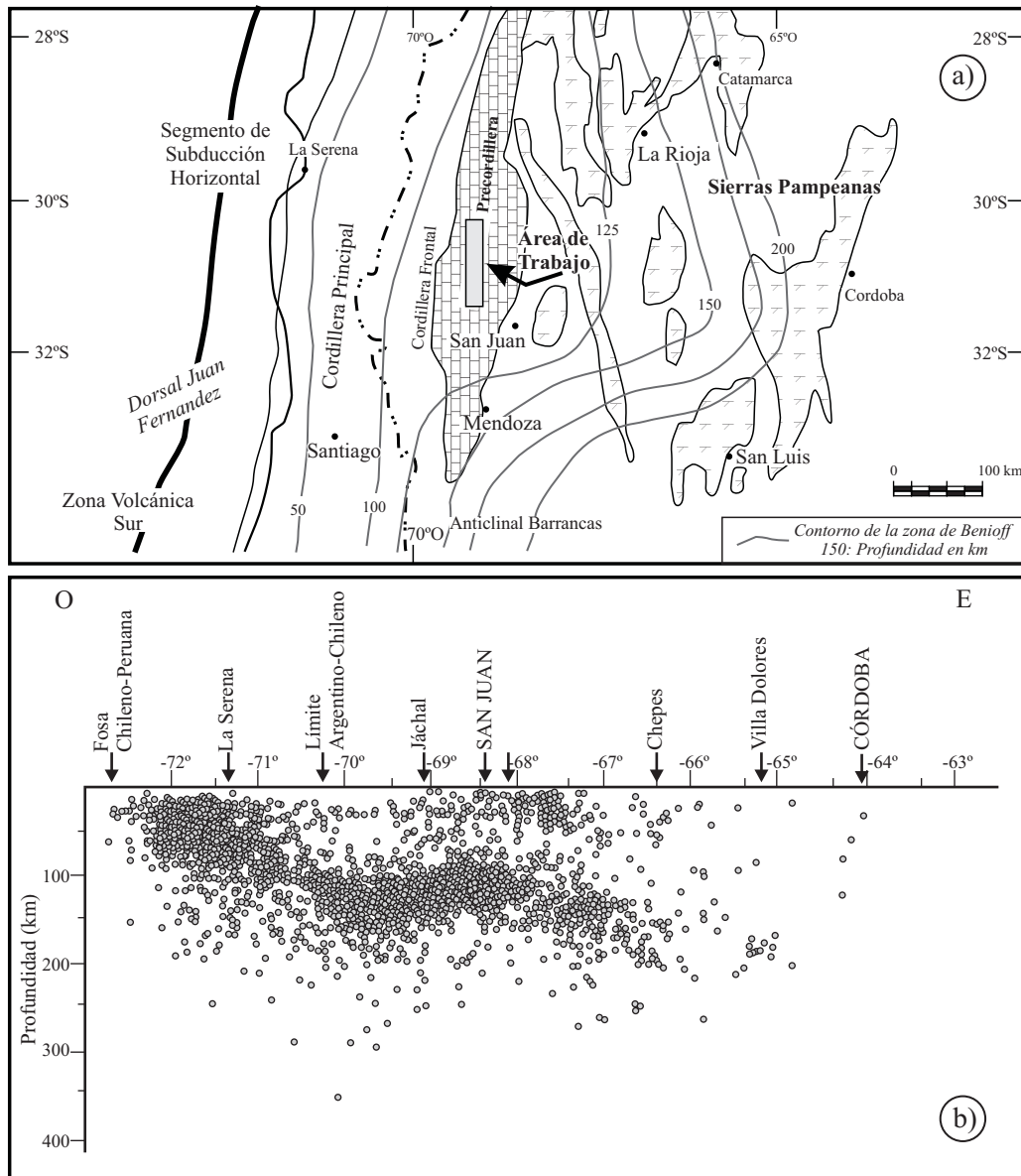


Figura 2. a) Ubicación del segmento de subducción plana entre los 28° y 32°S con los contornos de la profundidad de subducción (modificado de Ramos *et al.* 2002) b) Perfiles oeste-este con la actividad sísmica entre 28° y 33°30'LS (modificado de INPRES 1993).

proceso de despegue se inició en los 10.3 millones de años, continuándose por lo menos hasta los 6.7 millones de años. Ramos y Vujovich (2000) caracterizaron a la Precordillera Central por su naturaleza epidérmica y su marcada vergencia hacia el este. Señalaron como uno de los rasgos más notables, el continuo incremento de la inclinación de los cabalgamientos de 30° en su sector frontal, hasta vertical y/o volcado en el sector más occidental. Remarcaron que a pesar del aumento de la inclinación de las fallas, los ángulos de corte de las mismas se mantienen entre 20° y 30° al oeste. Esto implicaría que los ángulos actuales de las fallas son secundarios y adquiridos por una rotación diferencial que se incrementa hacia el oeste.

La reconstrucción palinspástica de la estructura de

Precordillera Central permite reconocer un acortamiento orogénico de 49 km, equivalente al 71%, si se asume un nivel de despegue en las calizas cambro-ordovícicas, a unos 6 km por debajo del nivel del mar, a la altura del Río Sasso. Este acortamiento es mínimo, y su magnitud estaría condicionada por la resolución en profundidad de los distintos corrimientos (Ramos y Vujovich, 2000).

Estratigráficamente, en el piedemonte de la sierra de La Cantera se reconocieron rocas de la Formación Pachaco (Eoceno sup-Mioceno), areniscas finas y gruesas a conglomerados finos. Los niveles reconocidos en el área de trabajo corresponderían al miembro inferior de dicha formación, dado que se identificaron areniscas de colores rojizos, amarillentos y verdes y niveles bentoníticos



similares a los descritos por Milana *et al.* (1993) en su localidad tipo, además de un conglomerado fino con clastos de vulcanitas ácidas. Esta formación presenta una estructura homoclinal buzante al oeste, con rumbo norte-sur. El buzamiento medido en la zona varía desde 21° en el cauce principal del valle de la quebrada de Gualilán a ~50° próximo a la zona de falla.

### Unidades cuaternarias

Se reconocieron en el piedemonte occidental de la sierra de La Cantera 3 niveles aluviales cuaternarios de composición fanglomerádica. Se asigna como nivel Q<sub>1</sub> al más joven, que coincide con los cauces actuales de drenaje y Q<sub>3</sub> al más antiguo, ubicado en la posición topográfica más elevada (Figura 1).

El nivel Q<sub>3</sub> es el nivel más antiguo (Pleistoceno?), teniendo en cuenta su posición topográfica, presencia de barniz del desierto y el grado de incisión de los cauces fluviales (Bastias 1986, Espízua 2002). Se ubica en discordancia angular sobre los depósitos de la Formación Pachaco. La composición litológica de los clastos corresponde a grauvacas con tamaños que varían desde 2 cm hasta 15 cm, que provienen de los afloramientos silúrico-devónicos de la sierra de La Cantera. Los clastos son angulosos a subredondeados y en distintas secciones son clasto-soportados. También existen en los sectores distales escasos clastos de caliza subangulosos que provienen de los mogotes del borde oriental de la sierra de La Invernada. Se puede reconocer el desarrollo de pavimento y barniz del desierto, este último no se desarrolla en igual forma sobre toda la superficie, hallándose parches de colores más claros. Además se observan clastos con signos de termoclastismo.

El nivel Q<sub>2</sub> corresponde a las terrazas de los pequeños cauces que existen en la zona de trabajo (Pleistoceno sup?). Se compone de clastos angulosos a subredondeados de grauvacas provenientes de la sierra de La Cantera y no existe aporte de clastos de caliza de los mogotes ubicados en el borde occidental de la sierra de La Invernada. El tamaño de los clastos varía desde pocos centímetros hasta 50 cm en algunos casos. Constituyen depósitos clasto-soportados de colores grisáceos similares al nivel Q<sub>3</sub>, sin desarrollo de barniz o pavimento del desierto.

El nivel Q<sub>1</sub> es el nivel aluvial más reciente, y está representado por los depósitos de los cauces actuales temporarios de la zona. El relleno sedimentario de los cauces presenta facies de gravas y gravillas intercaladas con facies de arena. Los cauces que atraviesan la falla La Cantera de este a oeste se componen de gravas de composición grauváquica de tamaño variado con un promedio de 6 cm, de bordes subredondeados a subangulosos. En el cauce principal que drena de sur a norte, denominado quebrada Gualilán, se suman los clastos de caliza con tamaños entre 3 y 10 cm que provienen de los mogotes de borde occidental de la sierra de La Invernada.

### Marco neotectónico

Entre los 28° y 32°LS se reúne una serie de factores geológicos y tectónicos que aparentemente se relacionan con la sismicidad superficial. Este ambiente de intraplaca es un sitio donde se pueden ubicar y definir las principales fuentes sismogénicas, las que muestran distintos grados de actividad. Esta región se caracteriza por concentrar gran parte de las deformaciones cuaternarias conocidas en la Argentina ya que prácticamente el 90% se concentra en esta latitud (Costa *et al.* 2000). Por lo general las fallas asociadas a esta sismicidad son subparalelas con rumbo general meridional. Los terremotos destructivos más importantes del país se produjeron en esta región, asociados a rupturas superficiales en un ambiente de intraplaca, como los terremotos de 1944 (Ms 7.4) y 1977 (Ms 7.4).

El corrimiento La Cantera es una de las principales estructuras activas en el área de Precordillera Central que se extiende por 47 km a lo largo del valle intermontano que separa las sierras de La Cantera y La Invernada desde la localidad de Pachaco por el sur, hasta el sector meridional de la Pampa de Gualilán por el norte. Posee un rumbo general norte-sur, vergencia al este e inclina en promedio aproximadamente 30° al oeste. Presenta escarpas de falla a contrapendiente, simples y compuestas, con alturas que varían entre 2 m y 6 m (Figuras 1 y 3a).

El corrimiento La Cantera afecta a todos los niveles aluviales del piedemonte occidental de la sierra homónima y modifica la red de drenaje actual. Otras geoformas típicas identificadas a lo largo de la falla son los espolones triangulares, barreales de falla (*sagponds*) y vertientes alineadas (Figura 3b, c)

### ANÁLISIS DE TRINCHERAS

Se analizaron en el extremo norte de la falla La Cantera cinco trincheras, cuatro naturales ubicadas en las márgenes de los pequeños tributarios del arroyo La Cantera con sentido O-E y una artificial efectuada durante la construcción de una ruta nacional orientada N-S, de las cuales cuatro permitieron medir el buzamiento del corrimiento que ronda los 30° al oeste, con rumbo aproximadamente N-S. Además, las trincheras 4 y 5 se encuentran asociadas a la surgencia de aguas (vertientes), alineadas siguiendo el trazado de la falla (Figura 1).

En la Figura 3c se aprecia un pequeño barreale de falla (*sag pond*) ubicado pocos metros al norte de la trinchera 3, originado por una escarpa a contrapendiente de 0.50 m de desplazamiento vertical que podría ser el resultado de un evento histórico. La falla afecta en este sector, el nivel aluvial actual aunque, esta hipótesis debe ser validada por dataciones absolutas de los depósitos finos del barreale. Las mayores alturas de las escarpas se ubicaron en el tramo central del corrimiento, en donde alcanzan los 20 m de altura. En síntesis, este corrimiento muestra evidencias



Figura 3. a) Vista al suroeste del corrimiento La Cantera en la que se observan las escarpas simples y compuestas; b) Vista al noroeste de la falla La Cantera y desarrollo de los espolones triangulares; y c) Barreal de falla originado al pie de la escarpa holocena (histórica?).

geomorfológicas continuas de desplazamientos repetidos, indicados por escarpas de 0.5 a 20 m de altura, los cuales corresponden a los desplazamientos verticales acumulados durante el Pleistoceno tardío y el Holoceno. Los desplazamientos mínimos medidos sobre el plano de falla varían entre 0.50 m y 1.80 m.

### Trinchera uno

La trinchera 1 se localiza en las coordenadas  $S31^{\circ}05'09.8''$   $W68^{\circ}58'57.1''$  y está orientada en sentido norte-sur (Figuras 1 y 4a). Es una trinchera artificial que quedó expuesta al extraer áridos durante la construcción de la ruta provincial 148. Se observa además una falla

perpendicular de rumbo aproximado E-O que desplaza algunos niveles rojizos de sedimentitas terciarias. El rumbo de la falla principal es  $N10^{\circ}E$ , la falla inclina  $10^{\circ}$  al oeste y sobrepone sedimentitas terciarias sobre el nivel aluvial  $Q_3$ . Sobre el plano de falla se ubicaron estrías con un pitch de  $90^{\circ}$  (Figura 4a).

### Trinchera dos

La trinchera 2 está localizada en las coordenadas  $S31^{\circ}05'43.4''$   $W68^{\circ}59'05.6''$  y se orienta en sentido O-E (Figura 1 y Figura 4b). El rumbo de la falla inversa es  $N14^{\circ}O$  y el buzamiento  $31^{\circ}$  al oeste y coloca sedimentitas terciarias de la Formación Pachaco por sobre los fanglomerados del nivel aluvial  $Q_3$ . En el bloque hundido se aprecian los pliegues de arrastre generados por la falla. Estos pliegues de arrastre (*drag-folds*) ligados al movimiento de la falla, están bien marcados en los niveles conglomerádicos. Hacia el este y fuera del perfil puede observarse en campo el relativo paralelismo de los clastos, orientados según la dirección de flujo del nivel aluvial y a medida que se aproximan a la línea de falla éstos comienzan a disponerse en forma anómala con la disposición ya nombrada.

### Trinchera tres

La trinchera 3 está situada en las coordenadas  $S31^{\circ}06'03.2''$   $W68^{\circ}59'09.5''$  y se orienta en sentido ONO-ESE (Figuras 1 y 5). El rumbo medido en la falla es  $N41^{\circ}O$  y el buzamiento  $33^{\circ}$  al oeste. A partir del análisis del perfil se ha interpretado un primer evento que correspondería a la generación de la falla y cabalgamiento de los depósitos de edad terciaria sobre los depósitos aluviales del nivel  $Q_2$ . Los clastos que se encuentran cerca del escardillo en la fotografía están orientados paralelos al plano de la falla.

Posteriormente se habría depositado una cuña coluvial como resultado de la caída gravitatoria de los niveles aluviales inestables, con un arreglo caótico de los clastos. Posteriormente, un nuevo evento generó la segunda cuña coluvial, de menor dimensión, deformando los depósitos más antiguos. Finalmente se depositó el nivel aluvial más joven en el que se observa clastos horizontales a subhorizontales y que aparentemente no se encuentra afectado por la falla.

### Trinchera cuatro

La trinchera 4 está ubicada en las coordenadas  $S31^{\circ}06'23.1''$   $W68^{\circ}59'18.3''$  (Figuras 1 y 6). El rumbo de la falla en este tramo es  $N8^{\circ}E$  y el buzamiento  $33^{\circ}$  al oeste. Se ha podido identificar un afloramiento de la falla a cada lado del cauce y también el contacto de la falla en planta. La falla coloca en este sector sedimentitas terciarias sobre



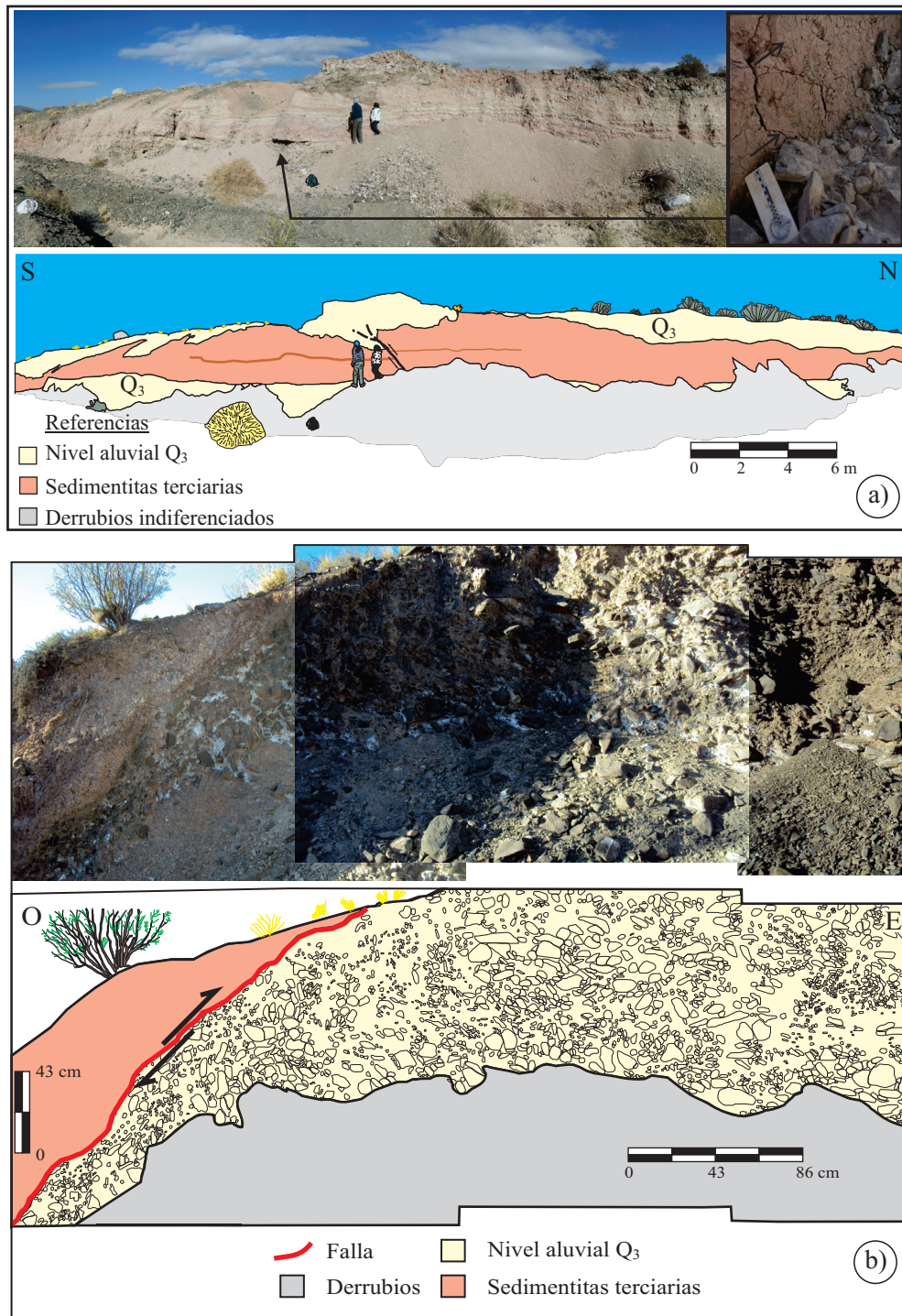


Figura 4. Descripción de trincheras. a) Trinchera T1, vista al oeste en la que se aprecian las sedimentitas neógenas sobre los depósitos coluviales del nivel Q<sub>3</sub>, b) Trinchera T2 en la que se aprecia un pliegue de arrastre en los fanglomerados del nivel Q<sub>3</sub>.

depósitos coluviales cuaternarios del nivel Q<sub>2</sub>. Una característica del sector es el cambio en el grado de incisión del cauce, siendo mucho mayor en el labio elevado de la falla (aproximadamente 2 m). Esta situación de cambio en la profundidad del cauce a ambos lados de la falla es notable a lo largo de todo el trazado de la falla.

#### Trinchera cinco

La trinchera 5 se localiza en las coordenadas S31°06'33.6" W68°59'22.5" y se orienta en sentido NO–SE (Figuras 1 y 7a). El rumbo medido en la falla en este tramo es N65°O y el buzamiento 30° al oeste. Esta falla inversa

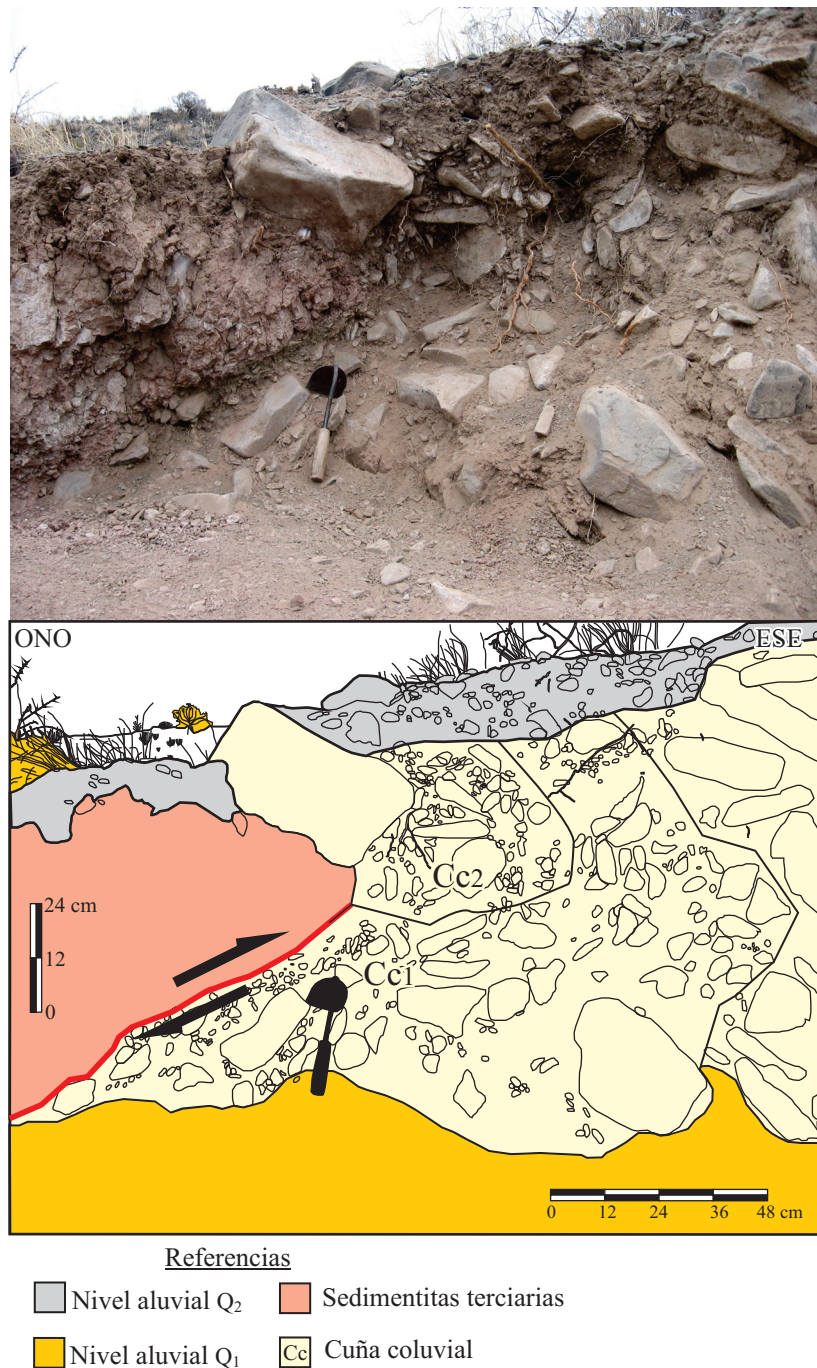


Figura 5. Análisis de la Trinchera T3 en la que se interpretan dos eventos con desarrollo de las respectivas cuñas coluviales. Finalmente se depositó el nivel aluvial más joven que aparentemente no se encuentra afectado por la falla.

sobrepone sedimentitas terciarias sobre depósitos aluviales cuaternarios del nivel Q<sub>2</sub>. Se identificaron dos cuñas coluviales con clastos dispuestos caóticamente, y otro nivel en el cual los clastos se alinean paralelo al plano de la falla. Se interpreta que podría haber sucedido el fallamiento, posteriormente se produjo la cuña, una nueva reactivación de la falla y la generación de otra cuña. Por último se habrían depositado los depósitos aluviales que cubren todo el perfil, ligeramente arqueados y que podrían estar afectados por la

falla. En las sedimentitas terciarias se observan distintos niveles meteorizados siendo uno de ellos datado por su contenido en carbonatos. La muestra se indica en el perfil como CA1. Esta fue datada por el método C14 obteniéndose una edad de  $4580 \pm 50$  años AP, lo que correspondería al Holoceno medio. Sin embargo, es necesario aclarar que los carbonatos, constituyen muestras problemáticas para datación debido a su movilidad. Así, un carbonato de origen pedogenético se irá formando a medida que se desarrolle



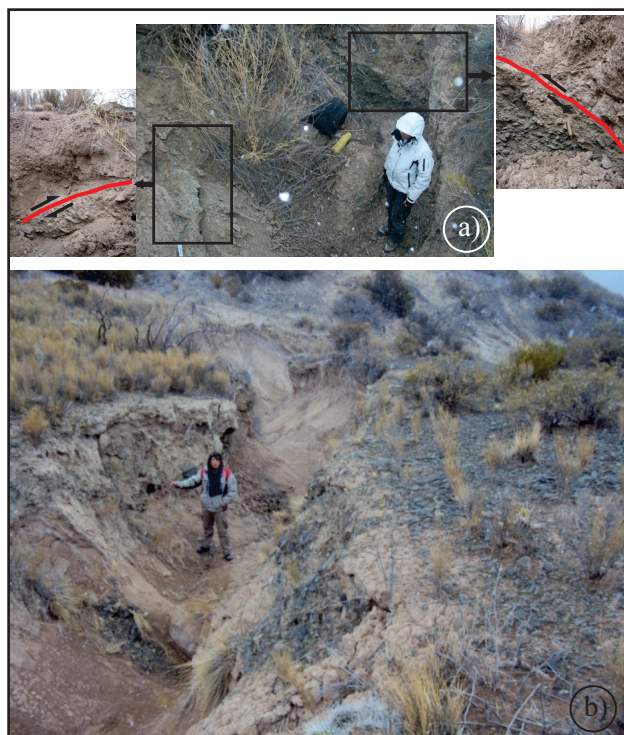


Figura 6. Trincheras T4. a) vista en ambas márgenes del arroyo, b) Vista aguas abajo del arroyo, en el labio elevado en donde es posible observar la mayor incisión del cauce.

el suelo, pero además puede tener aporte de carbonatos transportados por el agua, más antiguos ó recientes y de génesis distinta. Lo mismo para depósitos carbonáticos que pueden formarse por colmatación–dsecación de lagunas ó lugares encharcados donde no se puede conocer el origen del carbono interviniente. Por ello es conveniente que el fechado sobre carbonatos sea refrendado con dataciones de materia orgánica asociadas a ellos como una forma de validar estos resultados. Para esta trinchera se propone la siguiente evolución (Figura 7b):

Un primer evento generó una escarpa de falla con espacio suficiente para generar una cuña coluvial por colapso y erosión. Es decir que, como consecuencia del movimiento de la falla, sedimentos de relleno fueron acumulados en su bloque descendido, favoreciendo la formación de una cuña sedimentaria compuesta principalmente por relleno coluvial y aluvial. Posteriormente habría sucedido un segundo pulso, produciendo una segunda escarpa de falla y generando espacio suficiente para el desarrollo de una segunda cuña coluvial.

Finalmente, habría ocurrido otro evento asociado a la falla La Cantera, en 1924 (histórico). Si bien no se pudo identificar con claridad la existencia de deformaciones en los sedimentos no consolidados presentes en los perfiles de las trincheras estudiadas, se logró obtener evidencia geomorfológica que podría corresponder a este evento en un cauce actual ubicado al norte de la trinchera 5, con desarrollo de un barreal de falla.

## ANÁLISIS DE LA FALLA LA CANTERA COMO FUENTE SISMOGÉNICA

Existen muy escasos antecedentes referidos a la sismicidad en el área de trabajo. Sólo Mingorance (1998) postuló, a partir del análisis de la documentación histórica y registros instrumentales disponibles, que se produjeron al menos seis eventos corticales de magnitudes medias a bajas desde 1894 hasta 1998, entre los que destaca el terremoto de 1924 ( $M_s=6.0$ ), registrado instrumentalmente por Hartmann (1926) que sólo fue percibido en la ciudad de San Juan. Cabe destacar que la zona en la cual se reconoció evidencia de deformación cosísmica histórica se encontraba al momento del terremoto, totalmente despoblada y relativamente alejada de posibles vías de acceso. En la actualidad, este sector del piedemonte oriental medio–inferior de la Precordillera continúa deshabitado. Actualmente, con nuevos equipos de registros y acceso más rápido a esta información, se puede apreciar mayor cantidad de sismos registrados entre el borde occidental de la sierra de La Cantera y oriental de la sierra de La Invernada (más de 15 sismos de  $M>3.5$  en el periodo 1964–2007) con otras fuentes sismogénicas de la Provincia de San Juan.

La falla La Cantera posee un trazado rectilíneo y prácticamente continuo a lo largo de 47 km. Según Wells y Coppersmith (1994), esto supone una magnitud momento máxima esperable para la misma de 7.1.

El periodo de recurrencia fue calculado por primera vez por el INPRES (1993), que obtuvo valores de 5000 años. El periodo de recurrencia para la falla La Cantera teniendo en cuenta la datación realizada en la trinchera 5 ( $4580 \pm 50$  AP) y el sismo de 1924 de  $M_s=6$ , fue estimado en este trabajo en  $2656 \pm 50$  años.

## ANÁLISIS DE ANOMALÍAS EN LA RED DE DRENAJE

El análisis de las características de la red de drenaje constituye una herramienta muy importante en el estudio de la actividad tectónica en sistemas de fajas corridas (*thrust fault systems*) ya que son sumamente sensibles a los procesos tectónicos verticales relacionados a plegamientos y corrimientos (Audemard 1999).

La red de drenaje en el flanco occidental de la sierra de La Cantera es una red dendrítica divergente típica de abanicos aluviales. Sin embargo, se producen anomalías en el patrón de drenaje cuando los ríos atraviesan el trazo de la falla La Cantera, aumentando el grado de incisión de los cauces y modificando la red al tipo en rastrillo (Figura 8).

Una red de Drenaje en rastrillo (*Broom-shaped drainage*) es un conjunto de cursos de agua de una vertiente que se agrupan para aumentar su caudal con el fin de vencer una estructura activa que se opone a la escorrentía natural. Se trata de un conjunto de drenajes desplazados, adaptados, desviados por procesos de erosión regresiva, captura u

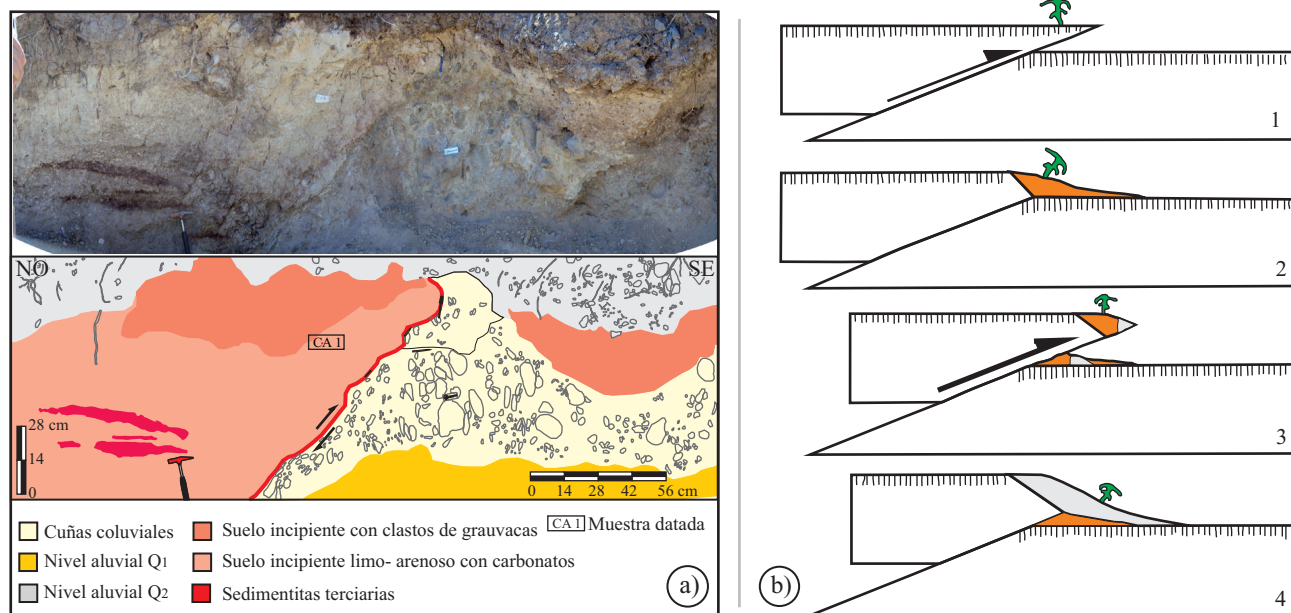


Figura 7. Trincheras T5. a) Vista al norte e interpretación de la Trincheras T5 con desarrollo de al menos dos cuñas coluviales, b) evolución propuesta para la falla en este sector, según Bull (2008): 1. Primer pulso, se genera espacio para el desarrollo de cuña coluvial, 2. Colapso y erosión de escarpa de falla, 3. Segundo pulso, bisección de depósitos y generación de espacio para formación de cuña coluvial y 4. Colapso y erosión de escarpa del segundo pulso. Posiblemente exista un tercer pulso en tiempos históricos aunque no es claro su registro en los depósitos.

obtención. Audemard (1999) reconoció estas anomalías en el patrón de drenaje en sistemas de corrimientos activos en Venezuela y Colombia y señaló su importancia como indicadores del movimiento vertical producido por los corrimientos.

De norte a sur las anomalías de la red de drenaje en rastrillo desarrolladas sobre los depósitos aluviales cuaternarios del piedemonte son indicativas de la traza de falla (Figura 8). Con elipses de color rojo se señala la ubicación de algunas redes en rastrillo, asociadas a las trincheras de falla analizadas. Es posible apreciar una mayor densidad de estas anomalías en el tramo norte del sector estudiado, posiblemente relacionado con una reactivación tectónica en tiempos recientes.

El cambio en la profundidad de incisión, de gradiente y también de patrón del drenaje a lo largo de los arroyos también son indicadores de movimientos verticales. Al oeste de la falla La Cantera, en el bloque elevado, puede observarse que la red de drenaje se densifica notablemente en algunos sectores (elipses negras). Sigue comportándose como una red de drenaje dendrítica, pero fuertemente incisa, muy densa y meandriforme, debido tal vez al grado de exposición del bloque elevado, ya que quedan expuestos los niveles finos de la Formación Pachaco, de carácter impermeable (Figura 8).

## CONCLUSIONES

El corrimiento La Cantera localizado en el valle intermontano ubicado entre la sierra de La Cantera y

la sierra de La Invernada, posee notables evidencias de actividad tectónica cuaternaria. Las estructuras de escala mesoscópica reconocidas en los sedimentos cuaternarios confirman la continuidad de las deformaciones pliocenas-pleistocenas en el Holoceno, en este sector de intraplaca, poniendo en evidencia la actividad cuaternaria tardía de la falla La Cantera.

En la zona de trabajo se identificaron 3 niveles cuaternarios que fueron clasificados desde Q<sub>1</sub> para los más jóvenes correspondientes a los cauces actuales y Q<sub>3</sub> para los más antiguos. El nivel Q<sub>3</sub> resultó el más representativo de la zona de trabajo y en todos los niveles la composición de los clastos es grauváquica-lutítica provenientes de la sierra de La Cantera aunque en Q<sub>3</sub> se identificaron algunos clastos de caliza, lo que indicaría que en algún tiempo el sector recibía aportes desde el oeste. Todos los niveles se encuentran afectados por el corrimiento La Cantera.

Se realizó el análisis de la red de drenaje, permitiendo definir anomalías que coinciden con la traza del corrimiento La Cantera. Se definió para la zona de trabajo una red dendrítica típica de abanicos aluviales que al atravesar el bloque elevado de la falla La Cantera sufre modificaciones en el patrón de drenaje. Se determinó que, aguas arriba de la traza de la falla, la red cambia a rastrillo y en el bloque elevado de la falla los cauces menores de la red dendrítica se encuentran notablemente incididos y la red es más densa. De esta manera, todos los niveles aluviales identificados y analizados son afectados por la traza del corrimiento La Cantera.

Se reconocieron y analizaron cinco trincheras en la zona de trabajo, en ellas se identificó el plano del corrimien-

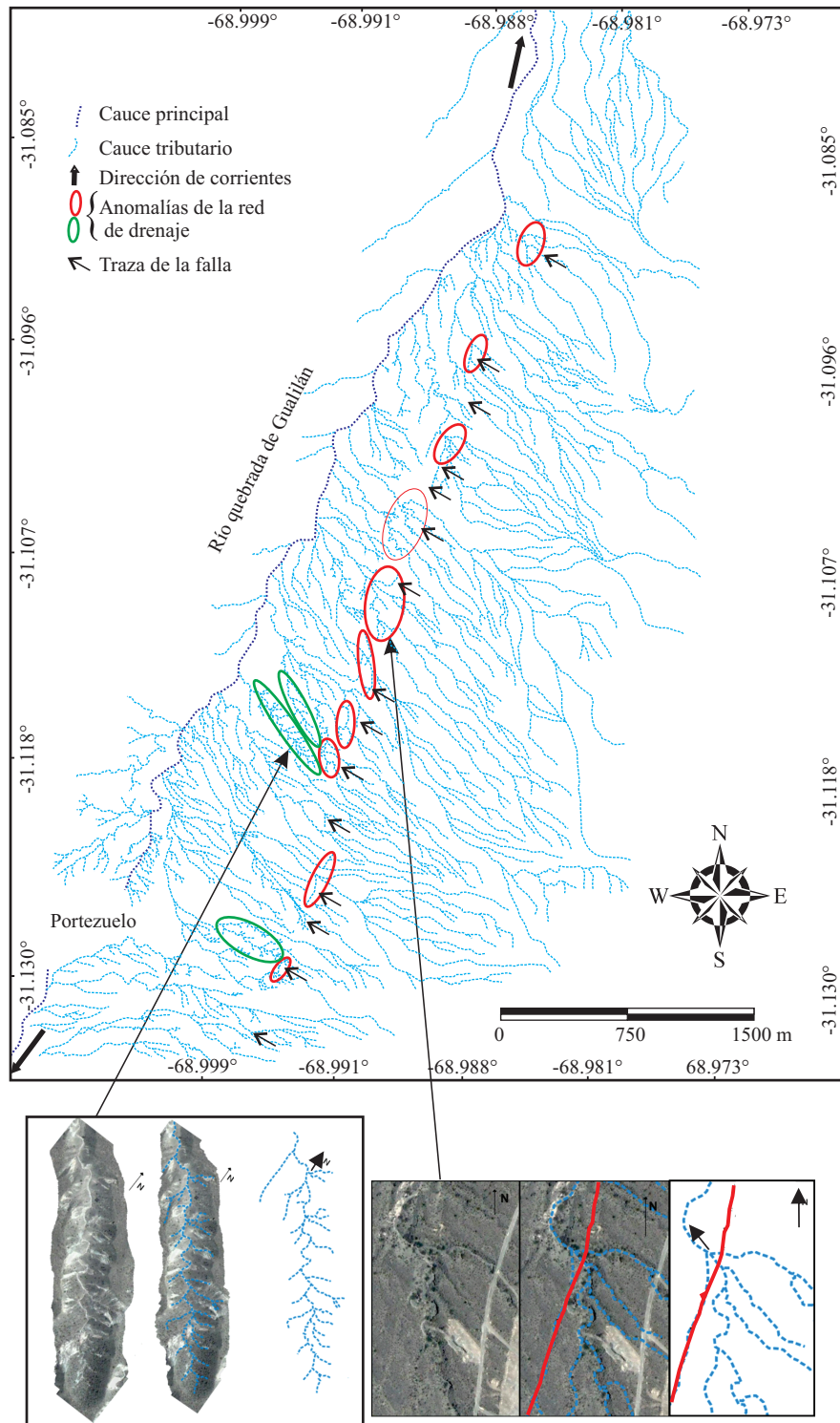


Figura 8. Anomalías de la red de drenaje por efecto del corrimiento La Cantera con un patrón de drenaje en rastrillo (elipses rojas) y cambio en el grado de incisión y en la densidad del drenaje en el labio elevado de la falla (elipses verdes).

to La Cantera, de rumbo norte sur y buzamiento promedio de  $30^\circ$  al oeste, aunque en la trinchera 1 el buzamiento es de  $10^\circ$  al oeste, y se identificaron estrías con un pitch de  $90^\circ$  que indica el movimiento vertical de la falla. En las trincheras 3 y 5 se reconocieron dos cuñas coluviales que permitieron

interpretar al menos dos episodios de fallamiento, y en esta última se pudo datar por el método C14 un nivel edafizado, obteniéndose una edad de  $4580 \pm 50$  años AP, correspondiente al Holoceno medio. Este nivel se encuentra afectado por la falla por lo que fue posible inferir que uno de los



eventos habría ocurrido después de la generación del suelo incipiente (Holoceno medio-sup). El periodo de recurrencia para la falla La Cantera teniendo en esta datación y el sismo de 1924 de  $M_s=6$ , es calculado dentro de un intervalo de aproximadamente  $2656 \pm 50$  años AP. Se calculó el máximo sismo posible para la falla La Cantera a base de fórmulas determinísticas que tienen en cuenta su longitud, dando como resultado una magnitud de 7.1.

Por todo lo expuesto, la potencialidad de la falla La Cantera, cercana a la ciudad de San Juan (>700,000 habitantes) y a los tres embalses ubicados a lo largo del río San Juan, aguas arriba de la misma, no debe ser subestimada.

## AGRADECIMIENTOS

La presente contribución fue financiada con fondos del proyecto 1E/850 CS-CICITCA, así como del PIP 0799/247 (CONICET). Se agradece a los evaluadores, Dras. Pilar Villamor y María Ortuño, por sus valiosas sugerencias que contribuyeron al mejoramiento de esta contribución.

## REFERENCIAS

- Allmendinger, R., Figueroa, D., Zinder, E., Beer, J., Mpodozis, C., Isacks, B.L., 1990, Foreland shortening and crustal balancing in the Andes at 30° latitude: *Tectonics*, 9, 789-809.
- Audemard, F., 1999, Morpho-structural expression of active thrust fault systems in the Humid Tropical Foothills of Colombia and Venezuela: *Zeitschrift für Geomorphologie*, 118, 1-18.
- Baldis, B.A., 1975, Acerca de la estructura profunda de Precordillera Central: Buenos Aires, Argentina: *Revista Minera Geología y Minería*, XXIII (1-2).
- Baldis, B.A., Chebli, G., 1969, Estructura profunda del área central de la Precordillera sanjuanina, en *Cuartas Jornadas Geológicas Argentinas*, Buenos Aires, 1, 47-66.
- Baldis, B.A., Martínez, R., Villegas, C.R., Pereyra, M.E., Pérez A.M., 1990, Estructura, provincialismo geológico y unidades tectonoestratigráficas, en *Relatorio del 11° Congreso Geológico Argentino*, San Juan, Argentina, 1, 186-211.
- Bastías, H., 1986, Fallamiento cuaternario en la región sismotectónica de Precordillera: San Juan, Argentina: Universidad Nacional de San Juan, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, tesis doctoral (inédita), 147 p.
- Beer, J.A., Jordan I., 1989, The effects of neogene thrusting on deposition in the Bermejo Basin, Argentina: *Journal of Sedimentary Research*, 59(2), 330-345.
- Bull, W., 2008, *Tectonic Geomorphology of Mountains: A New Approach to Paleoseismology*: Ed. Wiley-Blackwell, 316 pp.
- Costa, C., Machette, M.N., Dart, L., Bastías, H.E., Paredes, J.D., Perucca, L.P., Tello, G.E., Haller, K.M., 2000, Map and database of Quaternary faults and folds in Argentina: Reston, United States Geological Survey, Open File Report 00-0108, 76 pp.
- Espízua L., 1992, Glaciaciones Cuaternarias en el valle del Río Mendoza, Andes Argentinos, en Trombott, D., Villalba, R. (eds.), *IANIGLA, 30 Años de Investigación Básica y Aplicada en Ciencias Ambientales*: Mendoza, Argentina, Instituto Argentino de Nivología, Glaciología y Ciencias Ambientales, 111-116.
- Hartmann, J., 1926, Reorganización del servicio sísmico en La Plata y observaciones sísmicas efectuadas en los años 1922-1924: La Plata, Argentina, *Contribuciones geofísicas*, 126 pp.
- Instituto Nacional de Prevención Sísmica (INPRES), 1993, La verdadera dimensión del problema sísmico en la provincia de San Juan: San Juan, Argentina, *Publicación Técnica N° 18*, 46 pp.
- Jordan, T., Gardeweg, M., 1987, Tectonic evolution of the late Cenozoic Central Andes, en Ben Avraham, Z. (ed.), *Mesozoic and Cenozoic Evolution of the Pacific Margins*: Nueva York, Oxford University Press, 193-207.
- Jordan, T.E., Isacks, B., Allmendinger, R.W., Brewer, J., Ramos, V., Ando, C., 1983, Andean tectonics related to geometry of subducted Nazca plate: *Geological Society of America Bulletin*, 94, 341-361.
- Jordan, T.E., Allmendinger, R.W., Damati, J.F., Drake, R.E., 1993, Chronology of motion in a complete thrust belt: the Precordillera, 30-31°S, Andes Mountains: *Journal of Geology*, 101, 137-158.
- Kay, S.M., Mpodozis, C., 2002, Magmatism as a probe to the Neogene shallowing of the Nazca plate beneath the modern Chilean flatslab: *Journal of South American Earth Sciences*, 15, 39-59.
- Kay, S., Mpodozis, C., Ramos, V., Munizaga, F., 1991, Magma source variations for mid-late Tertiary magmatic rocks associated with a shallowing subduction zone and a thickening crust in the central Andes (28° to 33° S), en Harmon, R.S., Rapela, C.W. (eds.), *Andean Magmatism and its Tectonic Setting*: Geological Society of America, *Special Paper* 265, 113-137.
- Kendrick, E., Bevis, M., Smalley, R.J., Brooks, B., Vargas, R.B., Lauría, E., Fortes, L.P.S., 2003, The Nazca-South America Euler Vector and its Rate of Change: *Journal of South American Earth Sciences*, 16, 125-131.
- Masramon, E., 1986, Geología de las sedimentitas meso-cenozoicas del área del Palque de Pachaco, Departamento Zonda, Provincia de San Juan: San Juan, Argentina, Universidad Nacional de San Juan, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, tesis de licenciatura (inédita), 77 pp.
- Milana, J.P., Cevallos, M., Zavattieri, A., Prampano, M., Papu, H., 1993, La secuencia terciaria de Pachaco: sedimentológica, edad, correlaciones y significado paleogeográfico, en 12° Congreso Geológico Argentino y 2° Congreso de Exploración de Hidrocarburos, 1, 226-234.
- Mingorance, F., 1998, Evidencias de paleoterremotos en la falla activa La Cantera-Cinturón de empuje de la Precordillera, San Juan, Argentina, en 10° Congreso Latinoamericano de Geología Actas, 2, 161-166.
- Ramos, V., 1988, The tectonics of the Central Andes; 30° to 33°S latitude, en Clark, S., Burchfiel, C. (eds.), *Processes in Continental Lithospheric Deformation*: Geological Society of America, *Special Paper* 218, 31-54.
- Ramos, V.A., 1999, Plate tectonic setting of the Andean Cordillera: *Episodes*, 22, 183-190.
- Ramos, V.A., Vujovich, G.I., 2000, Descripción geológica hoja 3169-IV San Juan, Provincia de San Juan: Buenos Aires, Argentina, Secretaría de Energía y Minería, SEGEMAR, Instituto de Geología y Recursos Minerales, Boletín N° 243, 82 pp.
- Ramos, V.A., Cristallini, E.O., Pérez, D., 2002, The Pampean flat-slab of the Central Andes: *Journal of South American Earth Sciences*, 15, 59-78.
- Vigny, C., Rudloff, A., Ruegg, J.-C., Madariaga, R., Campos, J., Alvarez, M., 2009, Upper plate deformation measured by GPS in the Coquimbo Gap, Chile: *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 175, 86-95.
- Wells, D.L., Coppersmith, K.J., 1994, New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, and surface displacements: *Bulletin of the Seismological Society of America*, 84, 974-1002.

Manuscrito recibido: Octubre 21, 2010

Manuscrito corregido recibido: Abril 15, 2010

Manuscrito aceptado: Mayo 9, 2011