

# ANÁLISIS DEL CAMPO DE ESFUERZOS EN UNA SECUENCIA LACUSTRE DE PRECORDILLERA ORIENTAL, SAN JUAN-MENDOZA

Laura P. PERUCCA<sup>1,2\*</sup>, Ángel M. PEREZ<sup>2,3</sup>, Stella M. MOREIRAS<sup>1,4</sup> y Adriana BRACCO<sup>5</sup>

<sup>1</sup> Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Tecnológicas (CONICET).

<sup>2</sup> Gabinete de Neotectónica. INGENEO. Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Universidad Nacional de San Juan. Av. Ignacio de La Roza y Meglioli s/n. (5400) San Juan.

Email: lperucca@unsj-cuim.edu.ar

<sup>3</sup> INPRES. Instituto de Prevención Sísmica - Roger Balet 47 norte. (5400) San Juan. Email:mperez@inpres.gov.ar

<sup>4</sup> Instituto Argentino de Nivología, Glaciología y Ciencias Ambientales (IANIGLA) - CRICYT. CONICET. Av. Dr Ruiz Leal s/n. Parque. (5500). Mendoza. Email: moreiras@lab.cricyt.edu.ar

<sup>5</sup> Gabinete de Estratigrafía. INGENEO. Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Universidad Nacional de San Juan. Av. Ignacio de La Roza y Meglioli s/n. (5400) San Juan. Email: adrygeo@yahoo.com.ar

## RESUMEN

En la quebrada del río Acequión, ubicada en el sur de la provincia de San Juan y norte de Mendoza (32° 10' S), en el centro-oeste argentino, se efectuó el análisis de las fallas que afectan depósitos lacustres de edad holocena. Estas fallas se encuentran asociadas a estructuras de licuefacción y avalanchas de roca indicadoras de paleoterremotos, lo que permite extender el registro sísmico de la región hasta el Holoceno temprano. Al comparar el campo de esfuerzos regional actual (determinado por sismicidad instrumental, con el cálculo del mecanismo focal de los terremotos recientes ocurridos en la región) con el campo de esfuerzos local, se observó que mientras el primero se caracteriza por la compresión, el campo local de la secuencia lacustre es extensional. Esto indicaría que aunque el esfuerzo regional actual es compresivo y de dirección NE-SO debido a la convergencia entre las placas de Nazca y Sudamérica, el antiguo lago adosado a las sierras de Pedernal y Los Pozos, está afectado por fallas normales, principalmente debido a esfuerzos locales distensivos originados por el readjustamiento de estos depósitos durante el levantamiento de las zonas montañosas aledañas.

Palabras clave: *Río Acequión, Depósitos lacustres, Fallas cuaternarias, Campo de esfuerzos, Terremotos.*

**ABSTRACT:** *Analysis of the stress field in a lacustrine sequence of eastern Precordillera, San Juan-Mendoza.* An analysis of faults affecting Late Neogene lacustrine deposits was made in Acequión area, placed in the south of the province of San Juan. These faults are associated with liquefaction structures and rock avalanche deposits originated by paleoearthquakes, extending the earthquake records until the early Holocene in this region. By comparing the present regional stress field (determined by instrumental seismicity, with the focal mechanism analysis of recent earthquakes occurred in the region) with the local stress field, it was observed that whereas the first one is characterized by compression, the local field on the lacustrine sequence is normal. The current regional stress field is compressive due to the subduction of Nazca plate under South America plate. The old lake embedded to Pedernal and Los Pozos range, is affected by normal faults, mainly due to a normal local stress originated by the arrangement of these deposits.

Keywords: *Acequión river, Lacustrine deposits, Quaternary faults, Earthquakes, Stress field.*

## INTRODUCCIÓN

Las sismitas constituyen la expresión de la actividad sísmica de fallas y su preservación en el registro estratigráfico es una evidencia paleosísmica que constituye una herramienta muy valiosa para el estudio de la sismicidad de una región. Un criterio de análisis para atribuir un origen sísmico a una estructura de deformación sería establecer la relación que existe

entre los mecanismos que generaron las fallas y los que produjeron las sismitas. Estas sismitas se van a generar bajo el mismo campo de esfuerzos regional o local que generó o reactivó la falla. Es por ello que el origen de las estructuras de licuefacción, cuyo mecanismo disparador fue un sismo, va a estar condicionado -al igual que las estructuras tectónicas- por el campo de esfuerzos bajo el que fueron generadas.

El reconocimiento de fenómenos de licuefacción y fallas en una secuencia lacustre en la quebrada del río Acequión, al igual que avalanchas de rocas pre-históricas, asociadas a fuentes sismogénicas cercanas constituyen un aporte al estudio de la paleosismicidad regional. Esto es de suma importancia ya que el registro de sismos históricos en la Argentina comienza aproximadamente a principios del siglo XVII, con la llegada de los pri-

meros colonizadores españoles. Además, como la densidad de la población en el centro-oeste argentino en esa época era muy baja, sólo se registraron los eventos catastróficos ocurridos en los últimos 150 años.

El área del río Acequión se ubica al sur de la provincia de San Juan, distante aproximadamente 120 km de la ciudad capital, en el departamento Sarmiento, a los 68°50'O y 32°06'07' S, entre la quebrada del río del Agua al norte y el río Montaña-de Los Pozos al sur. Por el este se encuentra limitada por el cerro Pedernal - cerro Los Pozos y por el oeste por la sierra Paramillos del Tontal y pequeñas lomadas y serranías (Fig. 1a).

La comarca estudiada abarca una porción de la pampa de Acequión y el extremo suroeste de la sierra de Pedernal dentro de la región suroeste de la provincia geológica de Precordillera oriental. La provincia geológica Precordillera es una faja plegada y corrida ubicada al este de la cordillera de los Andes y constituida por rocas sedimentarias paleozoicas afectadas por la subducción subhorizontal de la placa de Nazca por debajo de la Sudamericana. Esto determinó la migración del frente orogénico, la ausencia de volcanismo, la intensa sismicidad de intraplaca y la actividad tectónica durante el Cuaternario, ubicada principalmente en el frente orogénico (Ramos *et al.* 1986). Esta provincia geológica se divide en occidental, central y oriental a partir de sus características litológicas edad y estilo de deformación (Ortiz y Zambrano 1981, Baldís y Bordonaro 1984). La Precordillera oriental, posee estructuras de vergencia occidental (Ortiz y Zambrano 1981) controladas por fábricas de basamento que inclinan al este y por un nivel de despegue profundo (Zapata 1998). Las estructuras cortan pero no exponen basamento siendo el mecanismo de deformación de tipo piel gruesa y similar al de Sierras Pampeanas (Ortiz y Zambrano 1981, Allmendinger *et al.* 1990). En estas áreas montañosas afloran rocas carbonáticas de edad cambro-ordovícica, en tanto que en la pampa de Acequión existen

asomos de sedimentitas neógenas constituidos por potentes niveles de conglomerados, areniscas y pelitas. Los depósitos del Pleistoceno-Holoceno están constituidos por fanglomerados aluviales con niveles de pedimentación, depósitos de remoción en masa y de origen lacustre afectados por estructuras paleosísmicas (Paredes y Perucca 2000).

## MARCO TECTÓNICO

La región oeste de Sudamérica posee una compleja morfología, con un margen occidental activo, representado por una topografía y sismicidad típicas debido a la interacción de las placas de Nazca, Antártica y Sudamérica. Esta convergencia comenzó hace aproximadamente 200 millones de años con la subducción de la placa oceánica de Nazca por debajo de la continental sudamericana, con pendiente hacia el este. El movimiento relativo entre ambas placas a los 29° Sur es de unos 11cm/año, basada en un promedio de 9,7 cm/año en dirección este para la placa de Nazca y un promedio de 1,4 cm/año en dirección oeste para la placa Sudamericana (Uyeda y Kanamori 1979). Para la mayoría de las deformaciones cuaternarias, el marco tectónico es predominantemente compresivo, aunque su distribución no es homogénea debido a las diferentes geometrías de la placa de Nazca (Barazangi e Isacks 1976, Pilger 1984, Jordan *et al.* 1983)

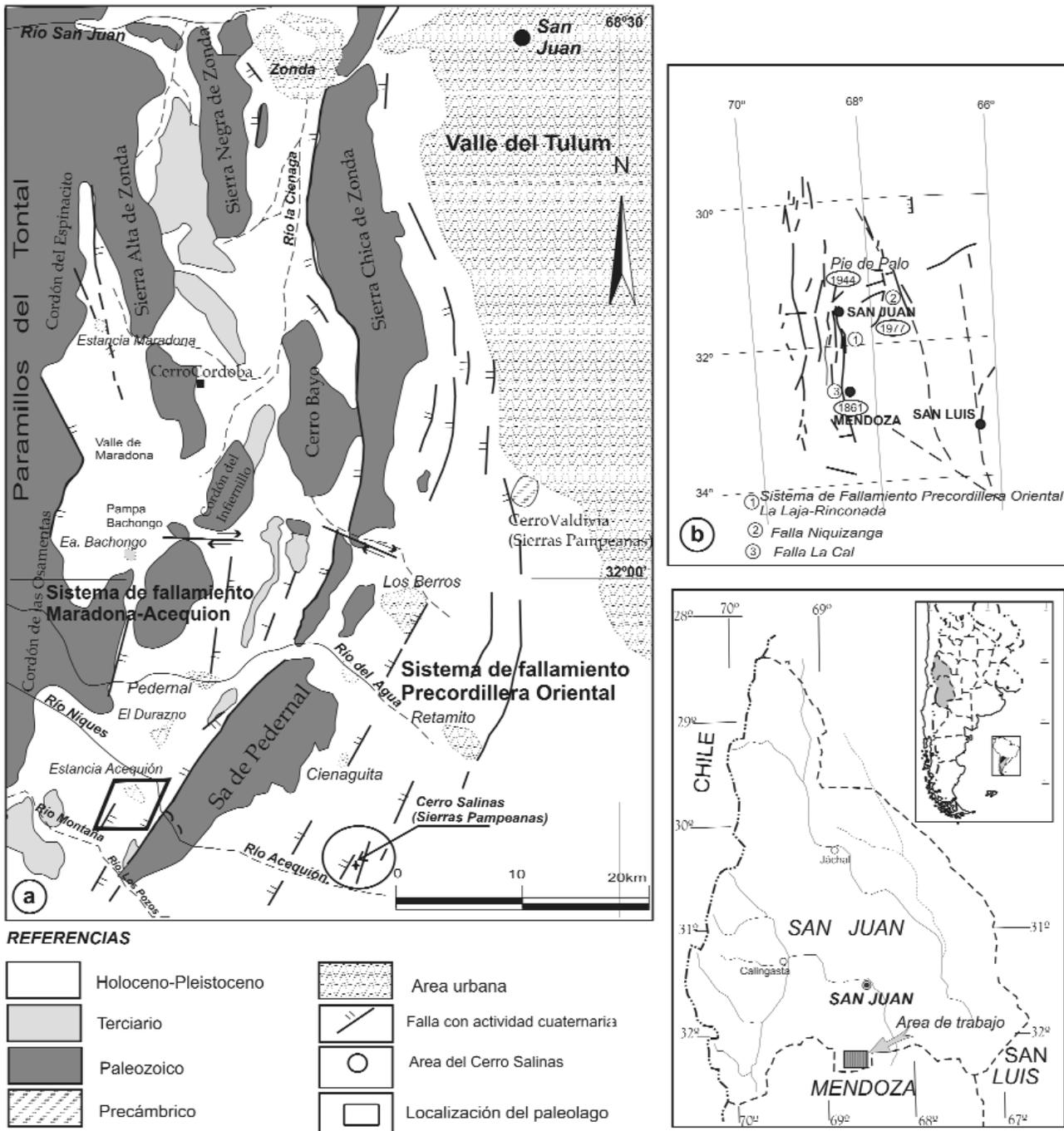
La distribución de hipocentros en la Argentina muestra de norte a sur, grandes diferencias en la sismicidad, que disminuye notablemente de norte a sur y de oeste a este. La región norte de los Andes (18° a 28° LS) y la región central (28° a 36° LS) se caracterizan por tener una elevada sismicidad instrumental e histórica.

Entre los 28° y 33° 30' LS se pueden ubicar y definir las principales fuentes sísmogénicas de la región, las que muestran distintos grados de actividad. Esta región se caracteriza también por la subhorizontalidad actual de la placa de Nazca, la que habría comenzado entre los 18 y 12 Ma (Ramos *et al.* 2002) y por concentrar

gran parte de las deformaciones cuaternarias conocidas en la Argentina ya que prácticamente el 90% se concentra en estas latitudes (Costa *et al.* 2000). Por lo general las fallas asociadas a esta sismicidad son subparalelas con rumbo general meridional. Los terremotos destructivos más importantes ocurridos en el país se produjeron en esta región (Fig. 1b), asociados a rupturas superficiales en un ambiente de intraplaca, como los terremotos de 1944 (Ms 7,4) y 1977 (Ms 7,4) en San Juan y el terremoto de 1861 (Ms 7,1) en Mendoza.

A la latitud de la provincia de San Juan, una sección vertical tipo, muestra una distribución bimodal de la sismicidad (Fig. 2). Los eventos de profundidad intermedia corresponden a la sismicidad de interplaca a lo largo de la zona de Wadati-Benioff de la placa de Nazca subductada (90-120 km). Los eventos superficiales corresponden a deformaciones corticales localizadas en la parte superior de la placa (5-35 km) y es el sector donde se generan los sismos que pueden constituir una amenaza para vidas humanas y construcciones. Mientras una zona de baja actividad sísmica aparece también entre 40 y 95 kms. (INPRES 1982, Smalley e Isacks 1990).

A los 32° LS, las principales deformaciones cuaternarias se representan por fallas y pliegues anticlinales, con una elevada sismicidad pero sin evidencias claras de ruptura superficial durante los terremotos que afectaron la región, con excepción posiblemente de la falla La Cal, durante el terremoto de 1861 (Ms 7,1) (Bastías *et al.* 1993, Mingorance 2000a y b, 2006). A esta latitud se encuentra el área de estudio limitada por dos fuentes sísmogénicas con actividad tectónica durante el Cuaternario: por el este el área del cerro Salinas, perteneciente al sistema de fallamiento Precordillera oriental, y por el oeste, el área Acequión en el extremo sur del corredor tectónico Maradona-Acequión (Perucca y Paredes 2004) (Fig. 1a).



**Figura 1:** Ubicación del área de estudio en relación con los sistemas de fallamiento Cua-ternario Maradona-Acequión y cerro Salinas (a) y segmentos de falla activos y terremotos históricos asociados (b).

**EL SISTEMA DE FALLAMIENTO PRECORDILLERA ORIENTAL**

Este sistema se localiza en el borde oriental de Precordillera oriental, con una longitud aproximada de 120 km. Los cordones montañosos se extienden en dirección meridional, norte-sur, desde la sierra

de Villicum por el norte hasta la sierra de Pedernal-Acequión por el sur donde se dispone con rumbo NNE.

El cordón montañoso de Precordillera oriental posee un perfil topográfico asimétrico, con un flanco occidental de muy corta extensión y fuerte pendiente y un borde oriental con pendientes modera-

das. Estas características se repiten en sus piedemontes en los que se desarrollan rasgos geomorfológicos originados por la actividad tectónica durante el Cuaternario.

Sin embargo, la preservación y el número de estas evidencias son diferentes, ya que en el piedemonte occidental, los tra-

**CUADRO 1:** Principales sismos históricos de magnitud mayor a 5 ocurridos cerca del área de estudio\*.

FECHA	LUGAR	MAGNITUD
22-05-1782	Terremoto de Santa Rita (Mendoza)	Ms 6,5/7
20-03-1861	Terremoto de Mendoza	Ms 7,1
12-08-1903	Terremoto de Uspallata (Las Heras, Mendoza)	Ms 6,3
26-07-1917	Terremoto de Panquehua (Mendoza)	Ms 6,8
17-12-1920	Terremoto de Costa de Araujo (Mendoza)	Ms 6,8
14-04-1927	Terremoto en Uspallata (Las Heras, Mendoza)	Ms 7,1
23-04-1929	Terremoto en Mendoza	Mb 5,7
01-01-1930	Terremoto en Mendoza	Mb 5,8

\*(Moreiras 2004).

**CUADRO 2:** Registro instrumental de sismos con epicentros cercanos al área de estudio (Ms>5)\*

FECHA	LUGAR	PROFUNDIDAD EPICENTRAL (km)	MAGNITUD
03-07-1941	Caucete (San Juan)	20	Ms 6,7
15-01-1944	Albardón (San Juan)	30	Ms 7,4
11-06-1952	Rinconada (San Juan)	30	Ms 7,0
25-04-1967	Paramillos (Mendoza)	45	Mb 5,4
23-11-1977	Caucete (San Juan)	17	Ms 7,4
26-01-1985	Barrancas-Lunlunta (Mdza)	12	Ms 5,7

\*(INPRES 2006).

**CUADRO 3:** Sismos instrumentales (M> 3) con características similares respecto a los parámetros focales que afectaron la región del valle del Tulum, sierra Pie de Palo y norte de la provincia de Mendoza\*

FECHA	LUGAR	PROFUNDIDAD (Km)	MAGNITUD
23/11/77	31,6° S 67,41° O	17	Ms 7,4
10/11/80	31,57° S 67,46° O	29	Ms 5,7
24/02/98	31,38° S 67,57° O	26	mb 3,1
15/04/98	31,32° S 67,47° O	21	mb 3,4
19/04/98	31,50° S 67,29° O	22	mb 3,4
18/07/98	31,32° S 68,34° O	16	mb 3,7

\*(Fuente NEIC 2006).

mos de falla son cortos y escasos, reconocibles sólo en algunas porciones. En la bajada oriental de los cordones montañosos, la preservación de los rasgos de fallamiento es muy buena, distinguiéndose en numerosos sectores escarpas a contrapendiente, paralelas y con su cara hacia el oeste. Estas fallas subparalelas afectan los distintos niveles de abanicos aluviales, conos-glaciés, lomadas pedemontanas y terrazas, con un grado de preservación diferente para distintas zonas.

Bastias (1986) reconoció en la región, de norte a sur, diversas áreas de fallamiento, siendo la más cercana al área de estudio el área de fallamiento del cerro Valdivia-cerro Salinas (Fig. 1a). Esta zona de falla pertenece a la porción sur del sistema de

fallamiento Precordillera oriental, con rumbo NNE y levanta los afloramientos más occidentales del basamento de las Sierras Pampeanas a los 32° S, definiendo el límite entre el basamento Pampeano y la faja plegada y corrida de Precordillera. Esta área de fallamiento consiste en varios tramos de falla, con una longitud total de 15 km que afectan el flanco occidental de un anticlinal (Ramos *et al.* 1997) con un basamento precámbrico por encima de los depósitos cuaternarios (Ortiz *et al.* 1975).

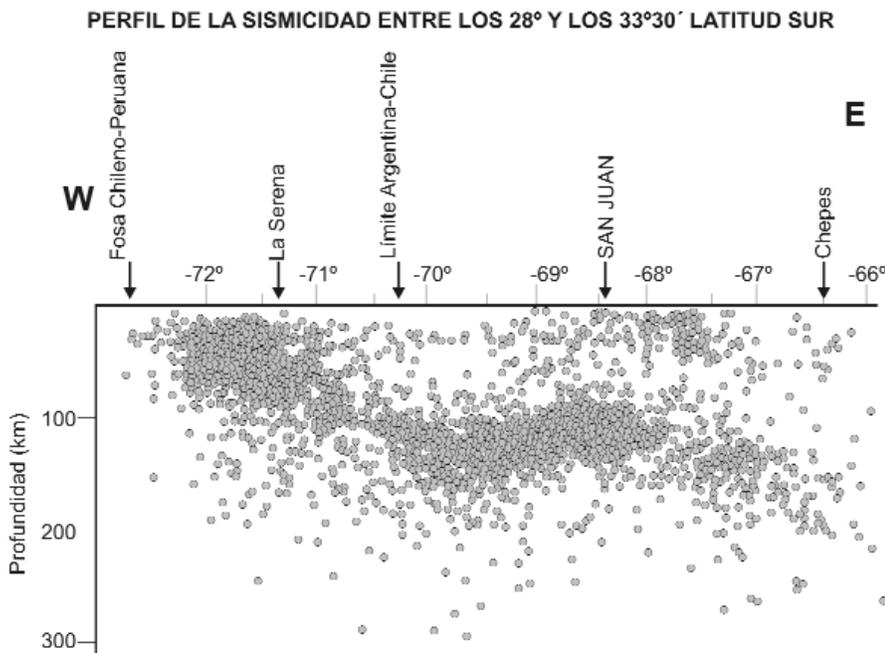
Vergés *et al.* (2002) indicaron que la estructura del cerro Salinas está formada por un frente monoclinar desarrollado sobre una rampa cortical que inclina al Este con vergencia occidental. Estos au-

tores mencionaron que la deformación en el área del cerro Salinas comenzó durante el Mioceno tardío y continuó hasta épocas muy recientes tal como se observa en varias terrazas plegadas y falladas. Martos (2002) determinó al menos cuatro reactivaciones de estas fallas durante el Holoceno, con un intervalo de recurrencia de 2000 años para esta zona de fallamiento ubicada 10 km al este del área de estudio (Fig. 1a).

### Corredor tectónico Matagusanos-Maradona-Acequión

El denominado corredor tectónico Matagusanos-Maradona-Acequión (Perucca 1990) es una depresión tectónica elongada y de rumbo norte-sur a NNE en su porción austral, ubicada en la porción centro-sur de la provincia de San Juan, entre las unidades morfoestructurales de Precordillera central por el oeste y Precordillera oriental por el este (Fig. 1). Este corredor tectónico separa dos ambientes estructurales diferentes, uno oriental en donde las fallas poseen escarpas con la cara libre al oeste y otro occidental donde las escarpas miran al este. El cambio en la orientación de estas estructuras se produce a escasos 1,5 km al este de los cordones montañosos de Precordillera Central. En el área de la Estancia Acequión, los actuales emprendimientos agrícolas han enmascarado las evidencias superficiales de fallamiento cuaternario, sin embargo, se reconocen los depósitos lacustres asignados al Pleistoceno tardío-Holoceno afectados por fallas y otras evidencias de tectonismo reciente.

En la quebrada del río Acequión fue posible reconocer numerosas estructuras de fallamiento que presentan un rechazo de pocos decímetros y que afectan principalmente una secuencia sedimentaria lacustre. Dentro de las estructuras reconocidas en el área se presentan fallas de tipo normal, inversas de bajo ángulo e inversas de alto ángulo, pliegues de arrastre de falla y pliegues asociados a *slumping* que han sido afectados por fallas posteriores.



**Figura 2:** Perfil con la distribución de la sismicidad entre los 28° y 33° 30'LS (modificado de INPRES 2006).

## METODOLOGÍA

Para efectuar el análisis de la fracturación en el área del río Acequión, se realizó un estudio a diferentes escalas de trabajo. Se evaluó el modelo tectónico regional mediante la interpretación de imágenes satelitales, fotografías aéreas y toma de datos de campo, para posteriormente estudiar en detalle la estructura del área. Para el calcular el campo de esfuerzos de la zona se efectuó un análisis de la fracturación presente en los depósitos lacustres del Pleistoceno tardío-Holoceno aflorantes en la quebrada El Mono, por poseer ésta algunas de las fallas más representativas del área. De esta forma, se pudo estudiar la cinemática y dinámica de la zona durante el Holoceno.

Se utilizó el método de análisis poblacional de 18 fallas identificadas en los depósitos lacustres, o método de los diedros rectos (Pegoraro 1972, Angelier y Mechler 1977, Costa *et al.* 1992) (geométrico - cinemático), y se obtuvo el campo de esfuerzos para el Pleistoceno tardío-Holoceno. Este método se utiliza principalmente para determinar la orientación de paleoesfuerzos en poblaciones de fallas

pertencientes a una misma etapa de deformación. Se trata de un método geométrico que se basa en limitar, para cada falla, las zonas del espacio compatibles en compresión y extensión, superponiendo estos campos en proyección estereográfica. El proceso se realiza para el conjunto de la población de fallas.

El método de los diedros rectos calcula para cada dirección del espacio el porcentaje de fallas que han quedado en los diedros en compresión y en los de extensión. El movimiento a lo largo de la falla genera dos diedros de acortamiento y dos de extensión. La orientación del tensor de esfuerzos que se obtiene se logra por la progresiva superposición y eliminación de los diedros que no guardan homogeneidad, obteniéndose un área residual de diedros donde se encuentran los ejes  $\sigma_1$  y  $\sigma_3$ .

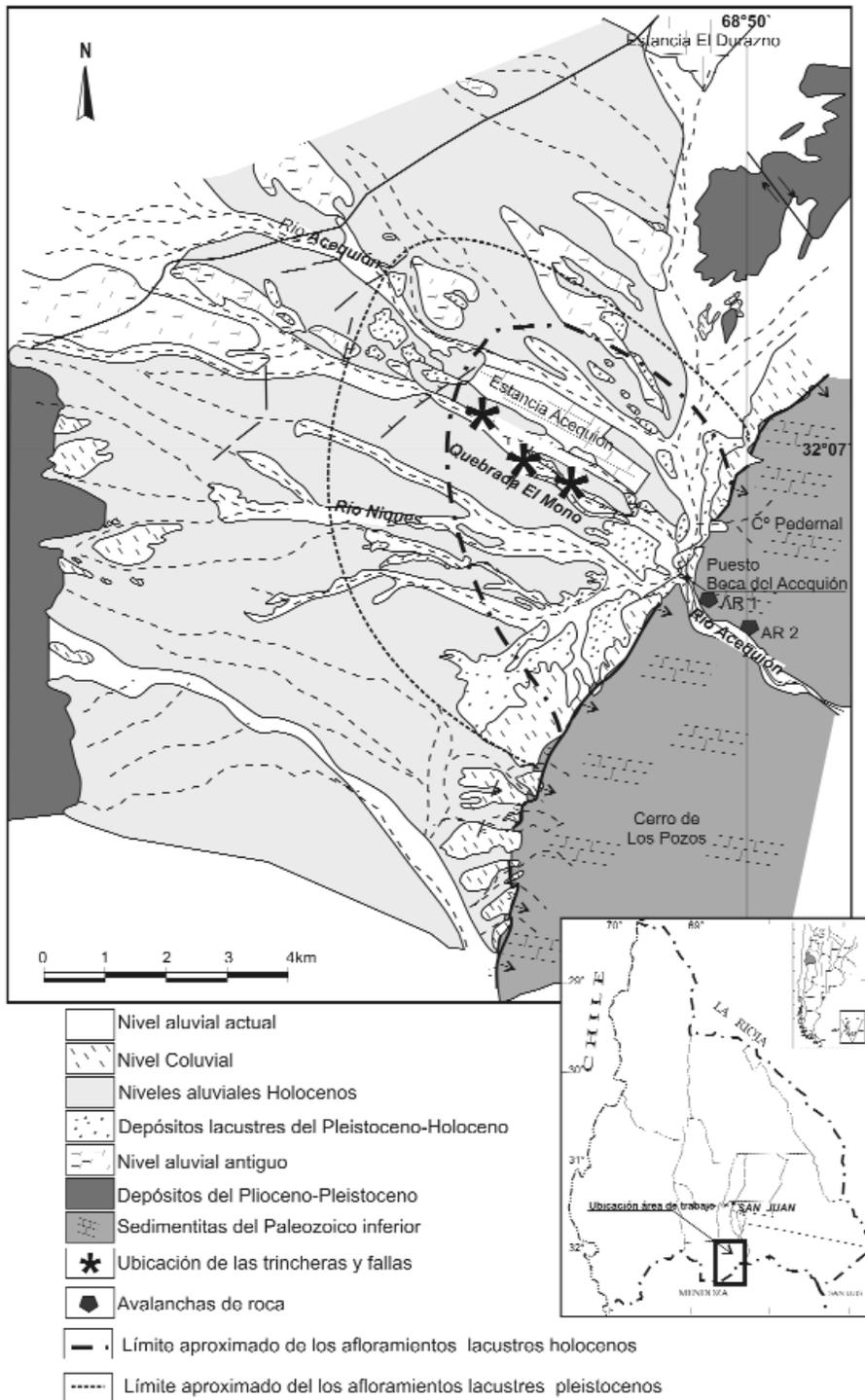
Para establecer el campo de esfuerzos regional actual se obtuvieron los mecanismos focales de sismos ocurridos en la región, cercanos al valle del Tulum y Pie de Palo (Cuadro 3) seleccionándose aquellos eventos de magnitud superior a 3 en un área mayor a la de estudio, a fin de que el cálculo de tensor de esfuerzos re-

gional fuese representativo. Se determinaron los mecanismos focales individuales y el tensor de esfuerzos, para los sismos de la región utilizando el método de determinación simultánea del tensor regional de esfuerzos y de los mecanismos focales individuales (Rivera y Cisternas 1990). Se obtuvo una dirección de esfuerzos NE-SO.

## ANÁLISIS DE LA SISMICIDAD HISTÓRICA

La recopilación de documentos históricos ocurridos con anterioridad a la instalación de los primeros sismógrafos sólo es posible a partir de la conquista española registrándose numerosos terremotos en regiones próximas de Chile, norte de la provincia de Mendoza y en la provincia de San Juan. Los sismos históricos de magnitud mayor a cinco cercanos al área de estudio son mencionados por Moreiras (2004) (Cuadro 1).

A pesar del registro en el país de numerosos terremotos en tiempos históricos, no existe una relación clara entre sus epicentros y las principales estructuras cuaternarias y en la mayoría de los casos, tampoco se han reconocido superficies de rotura histórica asociadas, a excepción de las observadas en las fallas La Laja durante el terremoto de 1944 y Niquizanga en el terremoto de 1977 como se mencionó anteriormente. También es probable que muchos de terremotos prehistóricos de gran magnitud se hayan caracterizado por deformaciones distribuidas en plegamientos y fracturación secundaria, antes que en rupturas superficiales. Costa *et al.* (1999) indican que es factible que este tipo de paleoeventos, aún los de naturaleza destructiva, no hayan dejado evidencias en el registro morfoestratigráfico cuaternario, complicando las estimaciones sobre parámetros tales como recurrencia y tasa de movimiento. En otros casos, las evidencias de actividad tectónica durante el cuaternario sugieren la ocurrencia de terremotos prehistóricos de gran magnitud relacionados con estas estructuras, recurrentes durante el Holoceno.



**Figura 3:** Distribución de los depósitos lacustres aflorantes en el área del río Acequión y ubicación de trincheras en la quebrada El Mono.

Por otra parte, la sismicidad instrumental, en la que los sismos han sido registrados por sismógrafos en estaciones sísmológicas, otorga una información más completa respecto a la de los sismos históricos, ya que se puede determinar una

profundidad y magnitud más precisa y conocer el mecanismo focal y el campo de esfuerzos actual para la región. Algunos de los terremotos más importantes registrados en la región son listados en el Cuadro 2.

## ANÁLISIS DE LA PALEOSISMICIDAD

Los procesos secundarios como la licuefacción originan generalmente las expresiones más espectaculares de un terremoto, denominadas sismitas. Su detección en el registro sedimentario aporta datos fundamentales para el estudio y análisis de la paleosismicidad. En la quebrada del río Acequión (Fig. 3) se identificaron dos grandes avalanchas de rocas denominadas AR-1 y AR-2 las cuales endicaron este río generando dos antiguos paleo-lagos (Perucca y Moreiras 2003a, 2003b). La datación por carbono 14 de resto de materia orgánica conservada en el paleo-lago más reciente arrojó una edad holocena temprana ( $7497 \pm 157$  años AP). Para el lago más antiguo, la edad obtenida por  $C^{14}$  fue  $15540 \pm 370$  años AP. Por otro lado, distintas estructuras de licuefacción tales como cráteres, diques de arena, *slumps*, nódulos, entre otras, fueron descritas en los sedimentos finos del paleo-lago más joven cuyo análisis permitió establecer la ocurrencia de al menos tres paleosismos en la región (Paredes y Perucca 2000).

Las avalanchas de rocas generalmente, en áreas sísmicas, están asociadas a sismos de magnitudes mayores a 6 (Keefer 1984); mientras, los procesos de licuefacción están generalmente asociados a sismos de magnitud mayor a 5 (Atkinson *et al.* 1984). Al mismo tiempo, la mayoría de los terremotos históricos ocurridos en las provincias de San Juan y Mendoza, e incluso los que tuvieron epicentro en el noroeste argentino han tenido asociados deslizamientos y fenómenos de licuefacción (Moreiras 2004, Perucca y Moreiras 2006; Perucca y Bastias 2004). Es por ello, que Paredes y Perucca (2000) y Perucca y Moreiras (2003 a, b; 2006) estiman a que al menos tres sismos debieron afectar la región durante el Holoceno. Perucca *et al.* (en prensa) relacionan estas sismitas a reactivaciones del sistema de fallamiento de Precordillera oriental, área de fallamiento del cerro Salinas. Utilizando las relaciones empíricas que deter-

minan la magnitud mínima del sismo generador de las estructuras con el ancho de los diques de arena, obtienen una  $M_s > 6,6$ .

Martos (2002), independientemente, determinó al menos cuatro reactivaciones durante el Holoceno, con un intervalo de recurrencia de 2000 años para las fallas del sistema del cerro Salinas ubicado 10 km al este del área de estudio. Este autor además determinó una magnitud máxima probable de sismos entre 6,6 y 6,8 para dicho área. Además, el área de fallamiento La Rinconada, ubicada algunos kilómetros al norte del cerro Salinas, perteneciente también al sistema de fallamiento Precordillera oriental, está asociada al terremoto del 10 de junio de 1952, de  $M_s$  7 (INPRES 1993) a pesar de que no se encontraron evidencias de ruptura histórica.

La actividad de este sistema de fallas es documentada también por Ortiz y Zambrano (1981) quienes determinan la presencia de depósitos cuaternarios arqueados y/o sobreelevados que indicarían una fase de plegamiento pos-terciaria en esta área. La sierra de Pedernal habría sufrido nuevos alzamientos durante el Neógeno tardío según estos autores.

## ANÁLISIS DEL CAMPO DE ESFUERZOS

Dentro de los depósitos lacustres ubicados en el área Acequión predomina la fracturación de carácter normal, aunque también se encuentran fallas inversas principalmente asociadas a estructuras en *slump*. Las fallas reconocidas en la quebrada El Mono son en general normales (Fig. 4) desarrollando una geometría de pequeños horst y grabens. El desplazamiento de estas fallas puede superar los 0,50 m y generar pliegues de arrastre visibles en la alternancia de capas limo-arcillosas y arenosas. En forma subordinada se encuentran fallas inversas que también han generado pliegues de arrastre. Aprovechando los sistemas normales se pueden observar las intrusiones de arenas licuefactadas y estructuras diapíricas.



**Figura 4:** Foto de una de las fallas directas observadas en los depósitos lacustres aflorantes en la quebrada El Mono.

Del análisis dinámico de las fallas medidas en el campo se generaron estereografías y ciclografías.

El análisis poblacional de las 18 fallas seleccionadas, a través del método de los diedros rectos muestra fallas normales con valores de  $\sigma_1$  28°/81,  $\sigma_2$  176°/10 y  $\sigma_3$  261°/04 (Fig. 5b). La figura 5a muestra una gráfica con valores superpuestos y otra con el último valor de falla graficada con azimut 359° e inclinación 16° NE con una componente dextral normal. Asociadas a estas fallas se encuentran las estructuras de licuefacción de origen sísmico.

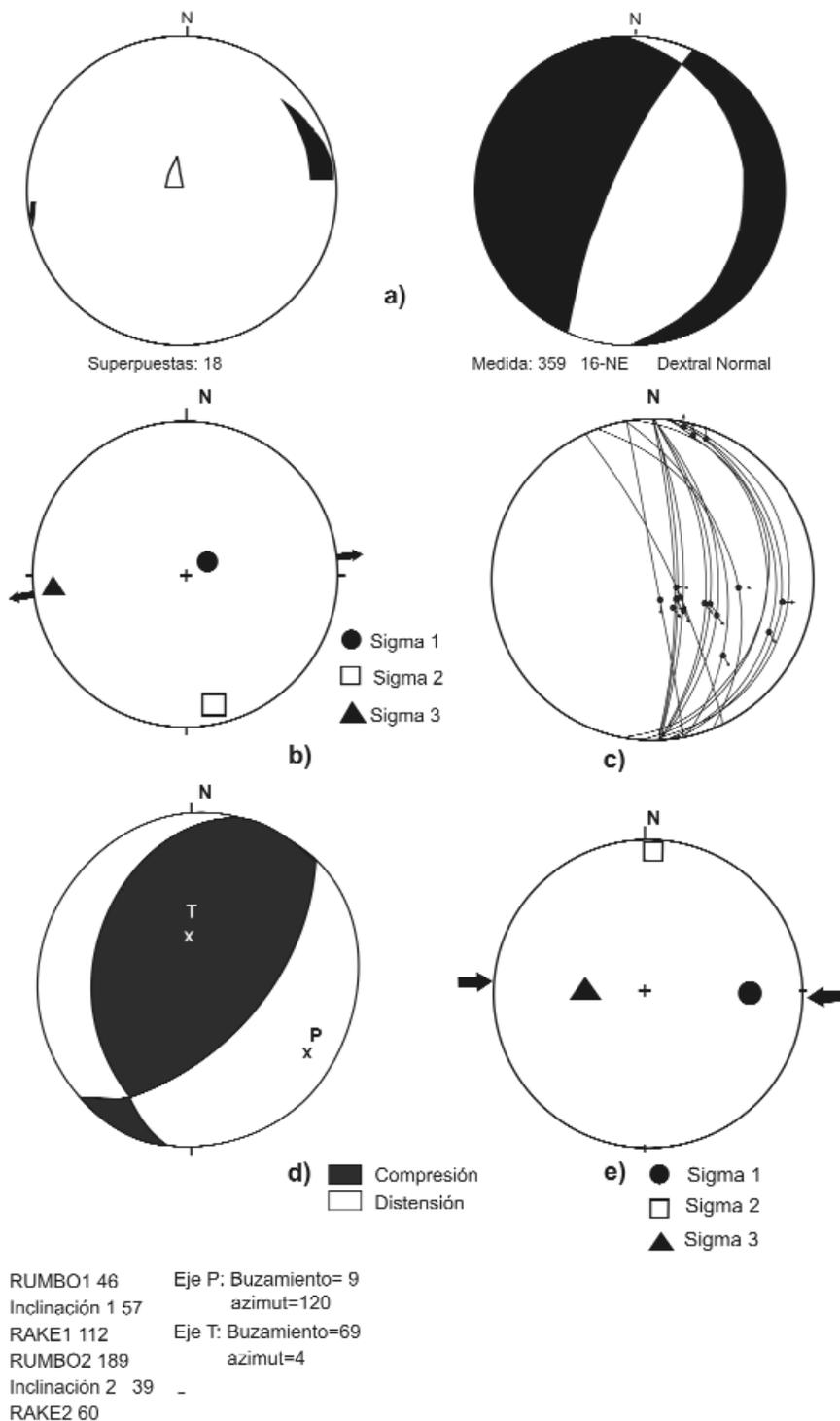
Los valores de las fallas expresados como mecanismos focales determinados para la zona correspondiente a los depósitos lacustres, de acuerdo a la solución de ejes principales de esfuerzos, muestran un régimen extensional para el área (Fig. 5b). De la representación de las fallas con sus ciclográficas y la dirección de desplazamiento correspondiente a cada una de

ellas es posible apreciar la orientación y dirección de las mismas. En general estas fallas poseen rumbos NNO e inclinan al E y al SE (Figura 5c).

Los mecanismos focales compuestos de seis sismos con registro instrumental del Cuadro 3 analizados para esta región indican que el campo de esfuerzos regional actual es compresivo (Fig. 5d).

El campo de esfuerzos regional actual determinado a partir de los mecanismos focales de eventos de  $M_s > 3$  que afectaron la región del centro-sur sanjuanino (Cuadro 3) muestra poblaciones de fallas inversas que marcan una dirección de esfuerzo de  $\sigma_1 = 93^\circ/60$ ,  $\sigma_2 = 02^\circ/86$  y  $\sigma_3 = 265^\circ/31$  (Fig. 5e). Con esta dirección de máxima compresión con un azimut de  $93^\circ/60$  y con el método de los ángulos diedros, se obtienen poblaciones de fallas inversas con sismos de intra-placa.

Al efectuar el análisis de los mecanismos focales de terremotos ( $M > 5$ ) ocurridos en la zona ubicada en el valle del Tulum,



**Figura 5:** a) Esquema gráfico de los diedros rectos para las 18 fallas seleccionadas en la quebrada El Mono. Campo de esfuerzos durante el Holoceno; b) Esquema gráfico basado en el método de inversión de esfuerzos; c) Gráfico compuesto por las trazas ciclográficas de cada falla de la estación; d) Mecanismo focal compuesto regional a partir de la sismicidad instrumental (Cuadro 3); e) Dirección de esfuerzos de los mecanismos focales de los sismos analizados.

sierra Pie de Palo y norte de la provincia de Mendoza (Cuadro 2) se obtuvo de acuerdo a la solución de los ejes principa-

les de esfuerzos, un régimen compresivo para toda la región (Fig. 5e).

## DISCUSIÓN

Una vez calculado el campo de esfuerzos reciente y determinado sus direcciones, es posible deducir la cinemática de las fallas del área Acequión durante la sedimentación de los depósitos lacustres. Se pueden conocer entonces las principales fuentes sísmogénicas y su compatibilidad con el campo de esfuerzos. Si la actividad sísmica generó las estructuras de paleosismicidad, con el estudio de la sismicidad actual en la región es posible establecer una relación directa entre el estado de esfuerzos reciente (Cuaternario) y el campo de esfuerzos actual, a partir de datos instrumentales, dando el contraste entre ambos campos una idea de su evolución.

El análisis de la sismicidad instrumental de la región muestra un campo de esfuerzos actual definido esencialmente por fallas inversas que marcan una dirección  $\sigma_{MAX}$  93°/60. Esto indicaría que el marco tectónico regional y el régimen de esfuerzos en el área están dominados por compresión E-O, por lo que resultan en general, fallas inversas y corrimientos con componente de desplazamiento de rumbo en esas fallas N-S. Esto estaría vinculado a la subducción de la placa de Nazca por debajo de la Sudamericana, determina en general un contexto compresivo dominante en la región para el Cuaternario, con deformaciones neotectónicas, principalmente fallas inversas y corrimientos asociados. Es por ello que los mecanismos focales compuestos de los seis terremotos analizados en la región indican un campo de esfuerzos actual compresivo (Fig. 5d). Inicialmente Alvarado *et al.* (2004) mencionan que en esta región de Sudamérica continúa predominando la compresión que resulta en terremotos con corrimientos de la corteza terrestre. Alvarado y Beck (2006) analizaron los terremotos de 1944 y 1952 ocurridos en la región usando una combinación de distintas técnicas sísmicas para delimitar los parámetros de las fuentes sísmogénicas en ambos eventos. Obtuvieron mecanismos focales que eviden-

cian corrimientos para el sismo de 1944 (Mw 7,4) con una componente oblicua para el terremoto de 1952 (Mw 6,8).

Sin embargo, el campo de esfuerzos en el área de Acequión durante el Pleistoceno-Holoceno está definido esencialmente por fallas normales, que definen una dirección de  $\sigma_{MAX} 28^\circ/81$  indicando un régimen distensivo para los depósitos lacustres ubicados en el extremo suroeste de Precordillera oriental.

La hipótesis que mejor se ajusta a la coexistencia de ambos campos de esfuerzos es la de un acomodamiento de los niveles lacustres cuaternarios adosados a la sierra de Pedernal al sufrir ésta nuevos alzamientos durante el Neógeno tardío. El alzamiento estaría documentado por la presencia de depósitos cuaternarios arqueados o sobreelevados, indicando una fase de plegamiento postterciaria (Ortiz y Zambrano 1981).

Esta actividad tectónica habría ocurrido a fines del Plioceno superior-Pleistoceno originando importantes desniveles topográficos (Martos 1995). La evolución geomorfológica de la sierra de Pedernal habría estado controlada por la fractura regional que limita su flanco occidental y por las fallas que afectan el piedemonte oriental. Estos movimientos continuarían en la actualidad, tal como lo demuestra la elevada sismicidad registrada en el sector y la presencia de numerosas fallas con actividad durante el Holoceno.

## CONCLUSIONES

En el área del río Acequión se han reconocido numerosas evidencias paleosísmicas, tales como estructuras de deformación (licuefacción), que indican la ocurrencia de paleosismos de magnitud mayor a 5 en la región. Estos hallazgos permitieron extender el registro sísmico de la zona al menos al Holoceno lo cual es fundamental para este sector del país, ya que la sismicidad histórica en las provincias de San Juan y Mendoza ha aportado sólo indicaciones parciales de la ocurrencia de terremotos.

Por otra parte, el estudio de estos depó-

sitos lacustres holocenos permitió establecer el campo de esfuerzos local existente en el Holoceno-Pleistoceno. Este campo de esfuerzo local de características extensionales resulta distinto al campo de esfuerzo actual determinado a partir del cálculo del mecanismo focal de los terremotos históricos que afectaron la región. Es decir que, mientras que el esfuerzo regional en la provincia de San Juan es compresivo, con una dirección noreste-suroeste, principalmente influenciado por la convergencia entre las placas de Nazca y Sudamericana, los depósitos lacustres del Neógeno tardío adosados a las sierras de Pedernal y Los Pozos que están afectadas en su flanco occidental por la falla regional Villicum-Zonda, sufrieron un acomodamiento que generó las fallas normales a causa de esfuerzos distensivos locales posiblemente vinculado a un arqueamiento de los depósitos.

El presente estudio permite establecer que a pesar de la presencia de un campo de esfuerzos regional caracterizado por la compresión desde el Neógeno, a consecuencia de la cual resultaron grandes plegamientos y fallas inversas, coexistieron durante el Holoceno campos de esfuerzos distensivos locales, probablemente debido a un comportamiento diferencial en pequeñas cuencas constituidas por depósitos lacustres de escaso espesor. La existencia de este marco distensivo habría favorecido la génesis de estructuras de escape de fluido por licuefacción.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado parcialmente con aportes realizados por el PID 6267 CONICET y 21E/645 - CICITCA (UNSJ).

Expresamos nuestro agradecimiento a los árbitros de la revista por sus acertadas correcciones y sugerencias que mejoraron la presente contribución.

## TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

Allmendinger, R., Figueroa, D., Snyder, D., Beer, J., Mpodozis C. e Isacks, B.L. 1990. Foreland

shortening and crustal balancing in the Andes at 30°S latitude, *Tectonics* 9(4): 789-809.

Alvarado, P. y Beck, S. 2006. Source Characterization of the San Juan (Argentina) crustal earthquakes of 15 January 1944 (Mw 7.0) and 11 June 1952 (Mw 6.8). *Earth and Planetary Science Letters* 243: 615-631.

Alvarado, P., Beck, S., Zandt, G., Araujo, M. y Triep, E. 2004. Modeling of Andean Backarc (30° - 36°S) Crustal earthquake waveforms using a portable regional broadband seismic network. En Miranda S. y Sisterna, J. (eds.) *Tópicos de Geociencias. Un volumen de Estudios Sismológicos, Geodésicos y Geológicos en Homenaje al Ing. Fernando Séptimo Volponi*: 53-93, San Juan.

Angelier, J. y Mechler, P. 1977. Sur une méthode graphique de recherche des contraintes principales également utilisable en tectonique et en séismologie: la méthode des dièdres droits. *Bulletin Société Géologique Française* 7(19): 1309-1318.

Atkinson, G.M., Liam Finn, W.D. y Charlwood, R.G. 1984. Simple computation of liquefaction probability for seismic hazard applications. *Earthquake Spectra* 1(1): 107-123.

Baldis, B. y Bordonaro, O. 1984. Cámbrico y Ordovícico de la Sierra Chica de Zonda y Cerro Pedernal, provincia de San Juan, Génesis del margen continental de la Precordillera. 9° Congreso Geológico Argentino, Actas 4: 190-207, Bariloche.

Barazanghi, M. e Isacks, B. 1976. Spatial distribution of earthquakes and subduction of the Nazca plate beneath South America. *Geology* 4: 686-692.

Bastias, H. 1986. Fallamiento cuaternario en el área sismotectónica de Precordillera. Tesis Doctoral Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de San Juan, (inédito), 160 p., San Juan.

Bastias, H., Tello, G., Perucca, L. y Paredes, J. 1993. Peligro Sísmico y Neotectónica. En Ramos. V. (ed.) *Geología y Recursos Naturales de Mendoza*, 11° Congreso Geológico Argentino y 2° Congreso de Exploración de Hidrocarburos, Relatorio 6 (I): 645-658, Mendoza.

Costa, C., Gardini, C. y Moran, R. 1992. ALFA-G: Programa para el análisis geométrico de fallas. 7° Reunión Argentina de Microtectónica, Resúmenes, 8 p., Bariloche.

Costa, C., Rockwell, T., Paredes, J. y Gardini, C.

1999. Quaternary deformations and seismic hazard at the Andean orogenic Front (31°-33°, Argentina): A paleoseismological perspective. 4° International Symposium on Andean Geodynamics, Proceedings: 187-191, Paris.
- Costa, C., Machette, M., Dart, R., Bastias, H., Paredes, J., Perucca, L., Tello, G. y Haller, K. 2000. Map and Database of Quaternary Faults and Folds in Argentina. U.S. Geological Survey Open-File Report 00-0108, 75 p.
- INPRES 1982. Microzonificación sísmica del valle del Tulum, Provincia de San Juan. Resumen Ejecutivo, 120 p., San Juan.
- INPRES 1993. La verdadera dimensión del problema sísmico en la provincia de San Juan. Publicación Técnica 18, 46 p., San Juan.
- INPRES 2006. Listado de terremotos históricos, catálogo on-line ([www.inpres.gov.ar](http://www.inpres.gov.ar)).
- Jordan, T., Isacks, B., Allmendinger, R., Brewer, J., Ramos, V. y Ando, C. 1983. Andean tectonics related to geometry of subducted Nazca plate. *Geological Society of America Bulletin* 94: 341-361.
- Keefer, D.F. 1984. Landslides caused by earthquakes. *Geological Society of America Bulletin* 95: 406-21.
- Martos, L. 1995. Análisis morfo-estructural de la faja pedemontana oriental de las Sierras de Marquesado, Chica de Zonda y Pedernal. Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de San Juan, Tesis Doctoral, (inédito), 555 p. San Juan.
- Martos, L., 2002. Estimación de máximas magnitudes sísmicas probables del Sistema de Fallamiento Precordillera oriental, San Juan. Actas 15° Congreso Geológico Argentino, Actas 1: 218-223, Calafate.
- Mingorance, F. 2000a. Peligro de desplazamiento superficial de falla en el núcleo urbano del Gran Mendoza, Argentina. Actas 9° Congreso Geológico Chileno, 1: 81-85, Puerto Varas.
- Mingorance, F. 2000b. Caracterización de la geometría de la zona de fallamiento activo La Cal, Mendoza, Argentina. 9° Congreso Geológico Chileno, Actas 1: 800-804, Puerto Varas.
- Mingorance, F. 2006. Morfometría de la escarpa de falla histórica identificada al norte del cerro La Cal, zona de Falla La Cal, Mendoza. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 61(4): 620-638.
- Moreiras, S. 2004. Zonificación de peligrosidad y riesgo de procesos de remoción en masa en el valle del Río Mendoza. Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de San Juan, Tesis Doctoral (inédito), 135 p., San Juan.
- Ortiz, A. y Zambrano, J. 1981. La provincia geológica Precordillera oriental. 8° Congreso Geológico Argentino, Actas 3: 59-74, San Luis.
- Ortiz, A., Eder, J. y Vaca, A. 1975. Evaluación preliminar de las condiciones hidrogeológicas del área C° Valdivia-Ramblón, Departamento Sarmiento, Provincia de San Juan, Argentina. 2° Congreso Ibero-Americano de Geología Económica, Actas 3: 75-93, Buenos Aires.
- Paredes, J. y Perucca, L. 2000. Evidencias de paleolicuefacción en la quebrada del río Acequión, Sarmiento, San Juan. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 55(4): 394-397.
- Pegoraro, O. 1972. Application de la microtectonique à une étude de néotectonique. Le golfe Maliaque (Grèce Centrale). Thèse IIIème cycle. U.S.T.L. Montpellier, 41 p.
- Perucca, L. 1990. Sistema de Fallamiento La Dehesa - Maradona - Acequión, San Juan, Argentina. 11° Congreso Geológico Argentino, Actas 2: 431-434, San Juan.
- Perucca, L. y Bastias H., 2004. El terremoto Argentino de 1894: Fenómenos de licuefacción asociados a sismos. Simposio Bodenbender. INSUGEO. Serie Correlación Geológica 19: 55-70, Tucumán.
- Perucca, L. y Moreiras, S. 2003a. Avalanchas de rocas holocenas y fenómenos de licuefacción asociados a paleoterremotos en el río Acequión, Provincia de San Juan, Argentina. 2° Congreso Nacional de Cuaternario y Geomorfología, Actas 1: 137-146, Tucumán.
- Perucca, L. y Moreiras, S. 2003b. Paleoseismicity evidenced by Holocene landslides and Liquefaction in the Acequión river, San Juan province. Argentina. IAG Regional Geomorphology Conference. Geomorphic hazard: Towards the prevention of disasters, Abstracts, 125, México.
- Perucca, L. y Paredes, J., 2004. Descripción del Fallamiento activo en la provincia de San Juan. Tópicos de Geociencias. En Miranda S. y Sisterna, J. (eds.) Un volumen de Estudios Sismológicos, Geodésicos y Geológicos en Homenaje al Ing. Fernando Séptimo Volponi: 269-309, San Juan.
- Perucca, L. y Moreiras, S. 2006. Liquefaction phenomena associated with historical earthquakes in San Juan and Mendoza provinces, Argentina. *Quaternary International* 158: 96-109.
- Perucca, L., Bracco, A. y Moreiras, S. (en prensa). Determination of seismogenic structures and earthquake magnitude from seismites in the Acequion river. Precordillera range, central-western Argentina. *Journal of Iberian Geology*.
- Pilger, H. 1984. Cenozoic plate cinematics, subduction and magmatism, South American Andes. *Journal of the Geological Society* 141: 793-802.
- Ramos, V.A., Cristallini, E. y Pérez, D. 2002. The Pampean flat-slab of the Central Andes. *Journal of South American Earth Sciences* 15: 59-78.
- Ramos, V., Jordan, T., Allmendinger, R., Mpodzois, C., Kay, S., Cortes, J. y Palma, M. 1986. Paleozoic terranes of the Central Argentine-Chilean Andes. *Tectonics* 5(6): 855-880.
- Ramos, V., Cegarra, M., Lo Forte, G. y Comín-guez A. 1997. El frente orogénico de la sierra de Pedernal (San Juan, Argentina): su migración a través de los depósitos sinorogénicos. 8° Congreso Geológico Chileno, Actas 3: 1709-1713, Antofagasta.
- Rivera, L.A. y Cisternas, A. 1990. Stress tensor and fault plane solutions for a population of earthquakes. *Bulletin of the Seismological Society of America* 80(3): 600-614.
- Smalley, R. F. e Isacks, B. 1990. Seismotectonics of thin and thick skinned deformation in the Andean foreland from local network data: evidence for a seismogenic lower crust. *Journal of Geophysical Research* 95: 12487-12498.
- Uyeda, S. y Kanamori, H. 1979. Back-arc opening and mode of subduction. *Journal Geophysical Research* 84:1049-1061.
- Vergés, J., Ramos, V., Bettini, F., Meigs, A., Cristallini, C., Cortés, J. y Dunai, T. 2002. Geometría y edad del anticlinal fallado del cerro Salinas. 15° Congreso Geológico Argentino, Actas 3: 290-294, Calafate.
- Zapata, T. 1998. Crustal structure of the Andean thrust front at 30°S latitude from shallow and deep seismic reflection profiles, Argentina. *Journal of South American Earth Sciences* 11(2):131-151.

Recibido: 2 de noviembre, 2007

Aceptado: 25 de abril, 2008