

ACTUALIZACION DE LA PERCEPCION DEL RIESGO SISMICO EN EL VALLE LONGITUDINAL DE LAS SIERRAS DE CORDOBA

Ricardo J. Rocca^a

^aDepartamento de Construcciones Civiles, F.C.E.F.y N., Universidad Nacional de Cordoba, Av. Velez Sarsfield 1611, (X5016GCA) Córdoba, Argentina ,rjrocca@efn.uncor.edu, <http://www.efn.uncor.edu>

Palabras claves: sismicidad, riesgo sísmico, Córdoba, valle longitudinal.

Resumen. El Valle Longitudinal de las Sierras de Córdoba es un importante rasgo geomorfológico que abarca los valles de Punilla, Los Reartes y Calamuchita.

En el mismo se encuentran importantes obras de infraestructura. Aquellas construidas en los últimos 25 años cuentan con estudios de riesgo sísmico que reflejan el conocimiento que existía en el momento de su construcción.

Las condiciones sismotectónica no han cambiado, pero si existen nuevas interpretaciones y mejor conocimiento del problema.

Se conoce mejor la historia tectónica del centro del país y se han podido determinar nuevas fuentes neotectónicas. Existen mejores mediciones de las sollicitaciones sísmicas a nivel mundial, nuevas leyes de atenuación y se han realizado mediciones instrumentales en algunos de los sitios donde están implantadas obras de importancia.

El trabajo analiza el riesgo sísmico de algunas obras significativas y compara retrospectivamente algunos de los criterios que se emplearon al momento de su formulación. Actualiza una contribución realizada con los Prof. L.D. Decanini y C. A. Prato a fines de la década de 1980.

Los valores de las aceleraciones máximas se han incrementado en forma general, debido a los cambios en las leyes de atenuación. En forma específica, en algunos sitios próximos a las fuentes sismogénicas locales, hay una mayor participación de efectos propios de éstas.

1 INTRODUCTION

El Valle Longitudinal de las Sierras de Córdoba es un importante rasgo geomorfológico que abarca los valles de Punilla, Los Reartes y Calamuchita (Figura 1).

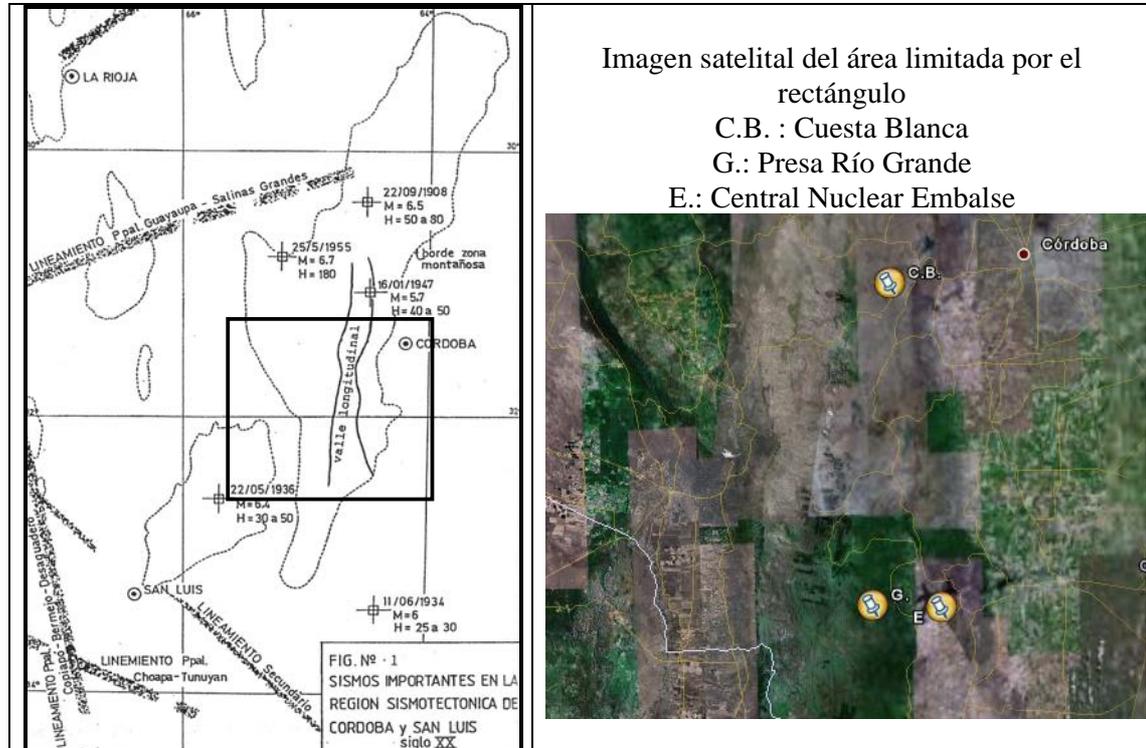


Figura 1: Ubicación del valle longitudinal, dentro del entorno sismotectónico (según Rocca et al 1991)

En el mismo se encuentran importantes obras de infraestructura. Aquellas construidas en los últimos 30 años cuentan con estudios de riesgo sísmico que reflejan el conocimiento que existía en el momento de su construcción. En ese grupo se encuentra el Complejo Hidroeléctrico Río Grande y la Central Nuclear Embalse. Asimismo, para otros proyectos no ejecutados como la Presa Cuesta Blanca y la Planta de Cobalto (CEPRACO) se realizaron estudios de riesgo sísmico.

En base a los resultados obtenidos se escribieron algunos artículos que se publicaron a principios de la década de 1990. Uno de ellos realizado por el autor, conjuntamente por los Prof. L.D. Decanini y C. A. Prato, (RDP), es el motivo de esta actualización.

Es de destacar que si bien las condiciones sismotectónicas no han cambiado, existen nuevas interpretaciones y mejor conocimiento del problema sísmico.

Se conoce mejor la historia tectónica del centro del país y se han podido determinar nuevas fuentes neotectónicas. Existen mejores mediciones de las sollicitaciones sísmicas a nivel mundial, nuevas leyes de atenuación y se han realizado mediciones instrumentales en algunos de los sitios donde están implantadas obras de importancia.

Los valores de las aceleraciones máximas se han incrementado en forma general, debido a los cambios en las leyes de atenuación. En forma específica, en algunos sitios próximos a las fuentes sismogénicas, hay una mayor participación de efectos propios de éstas.

2 VISION RETROSPECTIVA

Para poder interpretar la esencia del trabajo [RDP](#), es necesario resumir sucintamente los antecedentes con los que se contaba en el momento de su redacción.

2.1 Ambiente Tectónico

El esquema tectónico regional era primitivo, aunque existían grupos de investigadores con ideas próximas a las actuales.

El conocimiento de la actividad de las fallas, dentro de las Sierras Pampeanas, era muy incipiente y se consideraba que la actividad sísmica era moderada o residual.

Una síntesis de ello, fue planteada por [Amos et al 1981](#). Para toda la provincia de Córdoba, se describieron tres fallas, la Sierra Baja de San Marcos en el norte, la Falla de Potrero de Garay en el valle de los Reartes y una falla que causó el sismo de 1934, en Sampacho. También se encontraban descriptos en la literatura, un sobrecorrimiento en el Valle de Punilla y se acababa de abrir un corte frente a Santa Rosa donde se observa un cabalgamiento de basamento sobre sedimentos modernos.

2.2 Estudios de Riesgo Sísmicos

En la década de 1970 los procedimientos para determinar el riesgo sísmico para presas y para centrales nucleares tenían escaso desarrollo. Actualmente, distintas agencias internacionales como la ICOLD, USCOLD, FEMA y la IAEA han generado un cuerpo de procedimientos que se ha estandarizado.

La determinación del sismo de verificación del Complejo Hidroeléctrico Río Grande se realizó tomando un epicentro próximo, del 18/01/1961, donde se implantó el sismo de Caucete de 1977. Tomando la distancia al sitio y usando una ley de atenuación, se fijó una aceleración máxima de 0.22 g.

Es de destacar que el sismo de 1961, fue recalculado y relocalizado posteriormente por la Universidad de La Plata en 1982, quedando a unos 165 km de la anterior posición y de la presa. Esto fue publicado cuando el proyecto estaba ya finalizado y la construcción de la presa estaba muy avanzada. En otras palabras, la solución dada en ese momento perdió la principal relación casuística. No obstante ello, el valor adoptado no parece desacertado.

En el caso de Embalse, se realizaron distintos estudios con resultados diferentes, lo que fue motivo de importantes reuniones. [Tabla 1](#) resume algunos de ellos, para el sismo de operación (OBE) y el máximo creíble (MCE). Los primeros fueron ejecutados previos a las normativas de IAEA.

SISMO	IDIA (1974)	GNZ (1980)	D'Appolonia (1983)
MCE	0.5 g	0.35 g	0.26 g
OBE	0.2 g	0.18 g	0.14 g

Tabla 1: Aceleraciones de verificación de la Central Nuclear Embalse

Para los estudios de Cuesta Blanca y de CEPRACO, ya existían normativas y por ello se determinaron Terremotos Máximos Creíbles de una manera determinística y Terremotos de Operación Normal, en forma probabilística.

2.3 Planteo de la publicación de 1991

Dentro del contexto mencionado, se planteó la publicación [RDP](#) en 1991 que tuviera los antecedentes sismotectónicos, los antecedentes históricos e instrumentales, las leyes de

atenuación locales que se habían deducido (Decanini et al 1989) y los valores resultantes de los sismos de operación normal, definido para presas, y el sismo máximo creíble.

3 ENCUADRE SISMOTECTONICO DEL CENTRO DE ARGENTINA

3.1 Esquema General

La tectónica regional del centro de Argentina, tal como se la interpreta actualmente, involucra distintos Terrenos (Terranes) que se han adosados desde el oeste, al cratón original (Río de La Plata). En la Figura 2 se han graficado los límites de los Terrenos junto con los principales eventos sísmicos registrados.

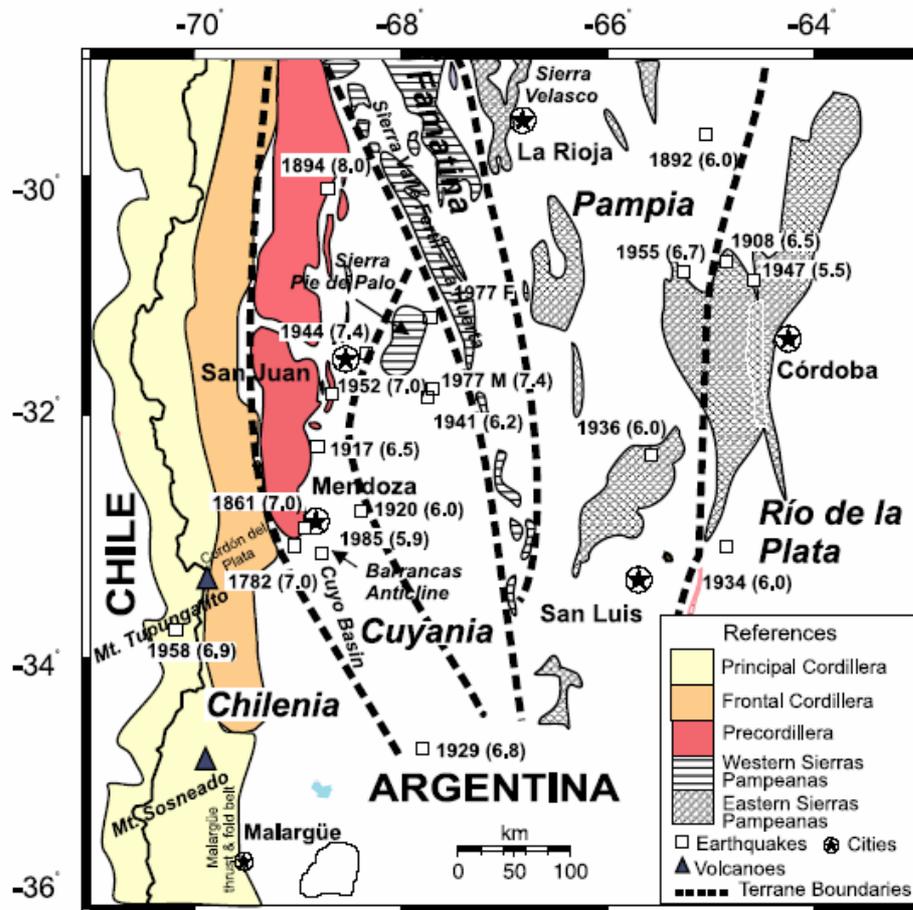


Figura 2: Distribución de los eventos sísmicos principales en los distintos Terrenos del centro de Argentina. El Valle longitudinal esta marcado en líneas blancas (según Alvarado et al 2005)

Toda la región ubicada entre 29 y 36° esta influenciada por la subducción de la placa de Nazca bajo la placa de Sudamérica, a una velocidad de aproximada a 6.3 mm por año y con un azimut de 79.5°.

Merece destacarse que entre 29 y 33° S, la placa de Nazca desciende a 100 km y luego se horizontaliza (a 5° aproximadamente) por centenares de km para terminar hundiéndose en el manto. Este comportamiento se correlaciona espacialmente con el alzamiento de las Sierras Pampeanas. Este conocimiento era muy incipiente en la década de 1980. Recién en la ultima

década se han realizado determinaciones mediante sísmica de reflexión profunda que permite determinar fehacientemente la posición de la placa de Nazca y sus características geométricas.

En un experimento realizado recientemente, se dispusieron instrumentos de medición en estaciones, durante 18 meses (Proyecto CHARGE) en los sitios marcados con rombos en la [Figura 3](#). En la región occidental se determinaron 14 sismos de fallas inversas, con hipocentros entre 14 y 25 km. mientras que en la región oriental se determinaron 4 eventos con mecanismos inversos ($h = 16-18$ km) y de rumbo (< 10 km).

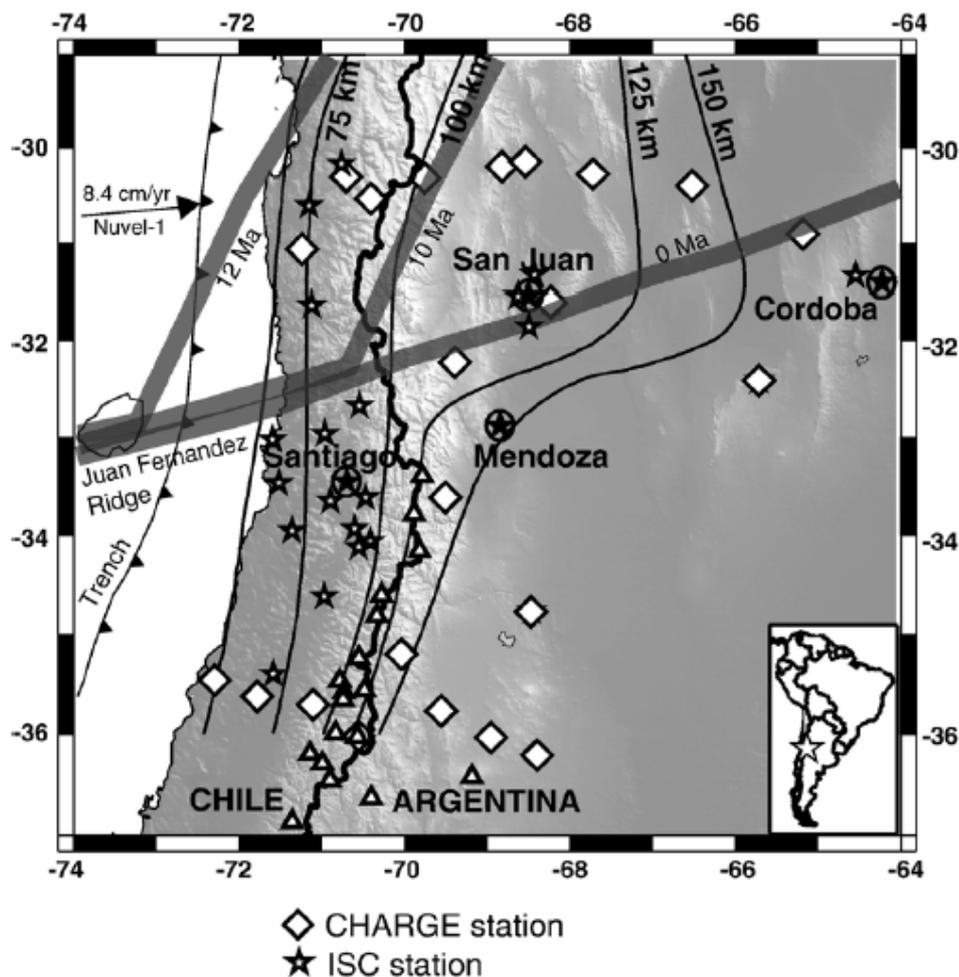


Figura 3: Variaciones de la posición de la dorsal Juan Fernandez en la subducción de la Placa de Nazca (delineadas con profundidades). Están marcadas las estaciones sísmicas temporarias (según [Wagner et al 2006](#))

La geometría de la placa de Nazca está originada en la subducción de la dorsal asísmica de Juan Fernandez que tiene el azimuth señalado en el párrafo anterior. El desarrollo comenzó hace 20-18 millones de años, y se incrementó entre 10-2 millones de años. La configuración actual ha sido estable desde hace unos 2 a 5 millones de años.

3.2 Sismotectónica cortical resultante

La Sierras Pampeanas (SP) están compuestas por rocas cristalinas precámbricas y paleozoicas que fueron levantadas y volcadas por compresión, durante la formación de los Andes.

La estructura presente de las SP está controlada por fallas inversas que tienden a horizontalizarse en una transición frágil-dúctil en profundidad.

El proceso que elevó los bloques del basamento ocurrió principalmente en el Mioceno temprano. Los primeros registros de alzamiento corresponden a Sierras Pampeanas Orientales (ESP) durante Eoceno, mostrando reactivación de fallas normales del cretácico. Las antiguas zonas de debilidad son tomadas por el fallamiento andino, el cual muchas veces muestra inversiones de estructuras previas. El estilo estructural está altamente controlado por la fábrica del basamento cristalino, y la vergencia es principalmente hacia el oeste, en fallas paralelas a la foliación.

La sutura entre los Terrenos Pampia y Cuyania (Figura 2) se encuentra al oeste de la Sierra Valle Fértil-La Huerta (Falla del Río Desaguadero), y muestra una zona de corte dúctil milonitizada, que presenta una estructura de reflexión sísmica importante. Constituye el límite entre las Sierras Pampeanas Occidentales (WSP) y las Sierras Pampeanas Orientales (ESP). Esta observación fue realizada por [Castano et al 1981](#), basada exclusivamente en la observación de la sismicidad en profundidad.

Las Sierras Pampeanas constituyen una región sísmicamente activa en la zona andina de trasarco, aunque existe una marcada diferencia entre las dos regiones diferenciadas (figura 4).

Las Sierras Pampeanas Occidentales son las más activas, con mecanismos focales inversos que alcanzan hasta 25 km. Las Sierras Pampeanas Orientales presentan mecanismos focales inversos y de desplazamiento de rumbo con profundidades focales menores de 10 km.

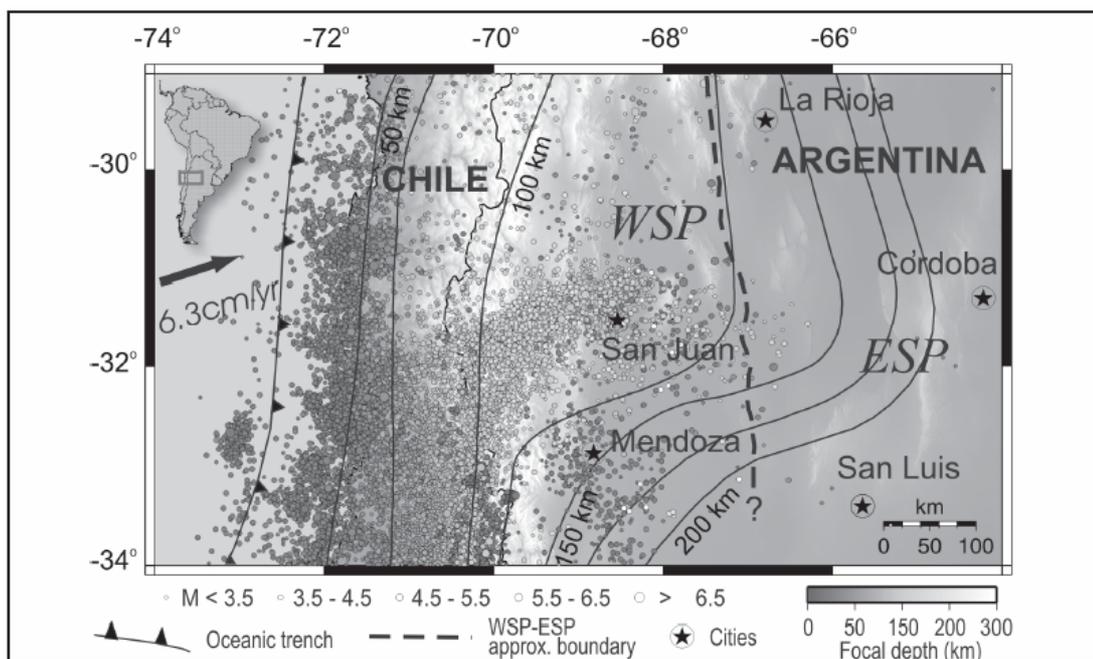


Figura 4: Distribución de epicentros registrados en los últimos 10 años, en las Sierras Pampeanas Occidentales y Orientales (según [Alvarado et al, 2005b](#))

3.3 Mediciones Geodésicas

Los vectores de velocidades medidos recientemente muestran claramente un importante decaimiento entre WSP e ESP. La falla de Valle Fértil, sutura entre Cuyania y los terrenos orientales, juega un importante control estructural en la compresión de la región trasarco

(Figura 5).

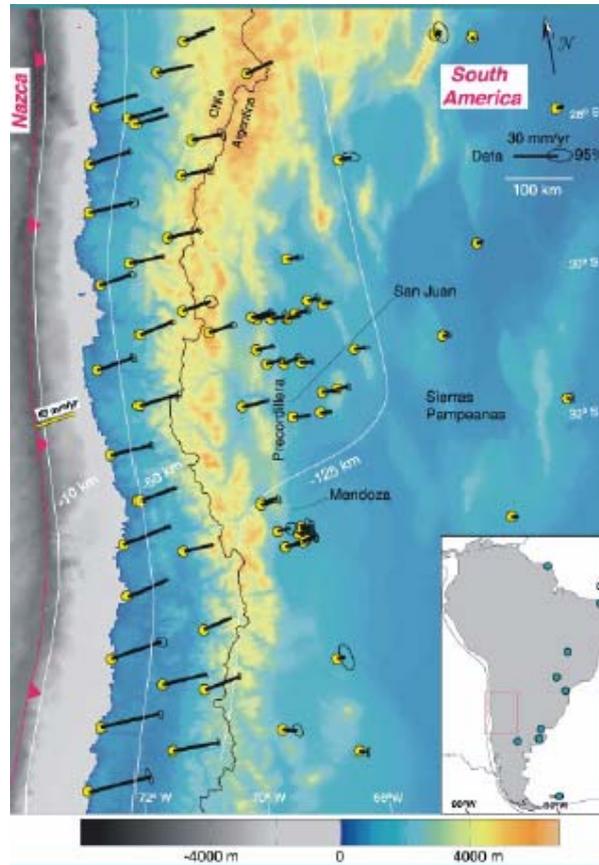


Figura 5: Vectores de velocidad medidos con GPS (según Brooks et al 2003)

En observaciones sísmicas efectuadas durante un período de 1.5 años, se aprecian pequeños terremotos señalados en el corte en la [Figura 6](#).

Su posición es coincidente con la de los GPS. La deformación cortical observada lejos de la trinchera oceánica (donde se subducta la placa de Nazca) contribuye a recuperar la componente elástica de la subducción (línea verde de [Figura 6](#)). Los estudios indican que la interacción en la convergencia Nazca-Sud América a una distancia de 600 km genera una componente elástica.

Estos resultados han llevado a postular la existencia de una trabazón importante entre la placa de Nazca y la Sudamericana. Consecuentemente el frente de deformación se traslada hacia el este hasta la zona de la falla del Valle Fértil (Río Desaguadero), señalado con una flecha vertical en la [Figura 6a](#).

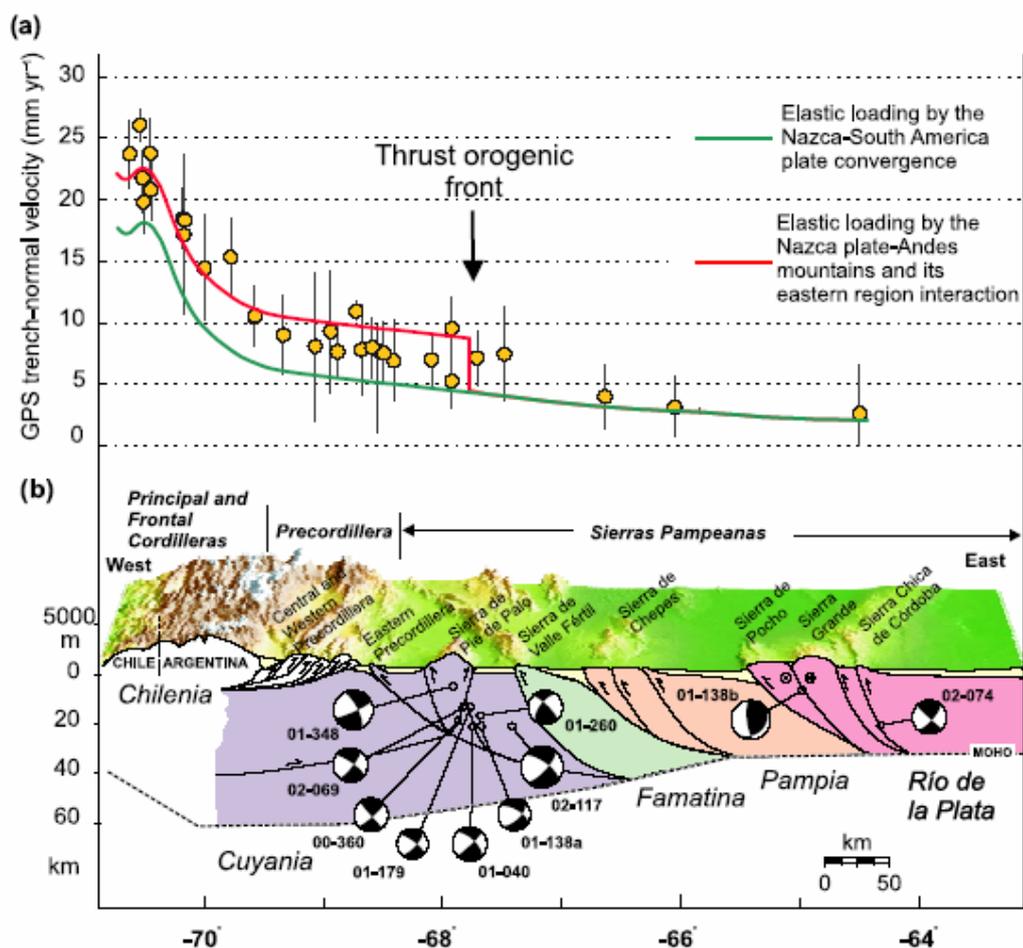


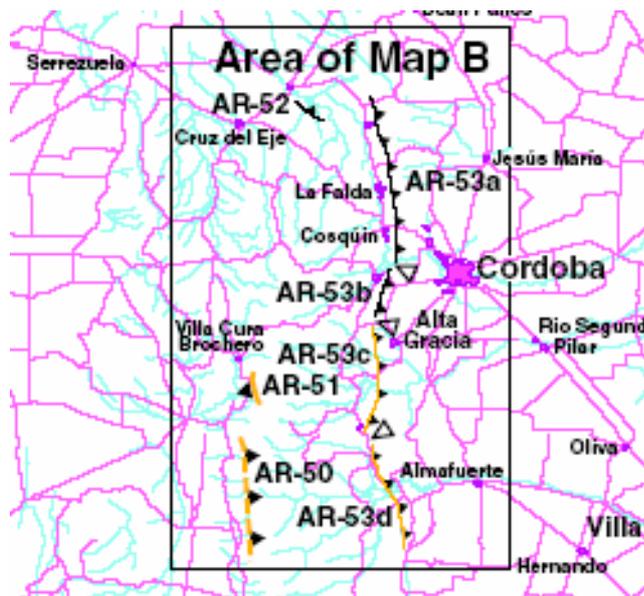
Figura 6: Variación de la velocidad de deformación y su relación con la Falla del Río Desaguadero y los eventos registrados con el experimento CHARGE (Alvarado et al 2005)

3.4 Fallamiento activo local

El ambiente tectónico donde se encuentra emplazado el Valle Longitudinal es el de las Sierras Pampeanas orientales. El sector al este de la Falla de Valle Fértil (Río Desaguadero) se lo conoce como Región Sismotectónica de Córdoba y San Luis (Figura 1) (Castano et al 1981, Decanini et al 1989).

Si bien es cierto que las rocas que constituyen las Sierras Pampeanas son mayormente pre-a Paleozoicas, los movimientos tectónicos andinos han modelado el relieve mediante movimientos de bloques. Este alzamiento se ha producido por medio de sismos, cuya frecuencia ha sido variable, tal como se manifestó previamente. La actividad actual, algo reducida, se manifiesta a través de rasgos neotectónicos. El principal rasgo es la Falla de la Sierra Chica (FSC) que constituye el límite este del Valle Longitudinal.

El conocimiento desde la década de 1970 ha progresado considerablemente, y Argentina ha sido incluida dentro de un proyecto global de mapeo neotectónico (Costa et al 2000). La zona de las Sierras Pampeanas es una de las mejor ilustradas (Figura 7). Se han realizado algunas dataciones geocronológicas en la Sierra de San Marcos y en la Falla de Comenchigones. Ambas corroboran actividad en los últimos 5000 años.



AR-48	San Luis fault zone (Zona falla San Luis)		
AR-48a	La Higuera fault (Falla La Higuera)	Reverse	<15 ka
AR-48b	Lorenzillo fault (Falla Lorenzillo)	Reverse	<1.6 Ma
AR-48c	Las Cuevas fault (Falla Las Cuevas)	Reverse	<1.6 Ma
AR-49	Potrero Sur fault (Falla Potrero Sur)	Normal/strike slip?	<1.6 Ma
AR-50	El Molino branch of Comechingones fault (Ramo Los Molinos de falla Comechingones)	Reverse	<15 ka
AR-51	Nono fault (Falla Nono)	Reverse	<15 ka
AR-52	Sierra Baja de San Marcos fault (Falla Sierra Baja de San Marcos)	Reverse	<1.6 Ma
AR-53	Sierra Chica fault zone (Zona falla Sierra Chica)		
AR-53a	Cosquin fault (Falla Cosquin)	Reverse	<1.6 Ma
AR-53b	Carlos Paz fault (Falla Carlos Paz)	Reverse	<1.6 Ma, <15 ka?
AR-53c	Potrero de Garay-San Pedro fault (Falla Potrero de Garay-San Pedro)	Reverse	<15 ka
AR-53d	Santa Rosa fault (Falla Santa Rosa)	Reverse	<15 ka
AR-54	Sampacho fault zone (Zona falla Sampacho)	Reverse?	<15 ka

Figura 7: Principales lineamientos presentes en las Sierras Pampeanas. Se destacan las relacionadas con la falla de la Sierra Chica, que es el limite este del Valle Longitudinal. (según Costa et al 2000).

4 ASPECTOS SISMOLOGICOS

4.1 Sismicidad Histórica

La sismicidad de la región se completa con los antecedentes históricos no registrados instrumentalmente, pero que han sido cronicados desde la época colonial. Si bien se ha realizado una revisión desde el siglo XVII, solamente se ha encontrado información en el siglo XIX. Es de destacar que estos antecedentes no han cambiado en los últimos 30 años, debido a que no se ha encontrado nueva información.

- Según el Profesor E. Bischoff (Historia de la Provincia de Córdoba, Tomo I, p 210) el 1 de febrero de 1826 se produjo un fuerte movimiento que afectó a la población de Río Cuarto, produciendo daños en la Iglesia Principal, construida en 1820. Hoy se conoce que el sismo que lo generó es lejano.

- Darwin señaló la existencia de indicios sobre un terremoto en Córdoba que modificó la morfología de un lago, sin poder precisar la fecha, pero ocurrido antes de su viaje (1831-1836) (The Red Notebook of Charles Darwin. Ed. con Introducción y Notas de S. Herbert. British Museum (Natural History). Cornell Univ. Press, 1980)
- En 1849 se produjo un sismo en la Provincia de San Luis, indicado como fuerte terremoto (citado en la Gran Enciclopedia Argentina. Ed. Ediar 1963)
- En la ciudad de Córdoba se produjo alarma por un temblor el 27 de Marzo de 1877 (Ob.cit.)
- El 12 de Febrero de 1880 se produjo un sismo que afectó a la ciudad de San Luis y que habría producido cambios topográficos en la zona. (Ob.cit)

Otros antecedentes no instrumentales, ya en el Siglo XX son los siguientes:

- El 24 de Noviembre de 1906. Según información periodística de la época, en las poblaciones de San Ignacio y la Cruz se percibió un movimiento sísmico con una duración de alrededor de 5 segundos y probablemente con dirección S-W. Es probable que el epicentro se haya ubicado en esa área. Su intensidad puede estimarse entre 3 y 4 la IMM en IV.
- El 1 de Julio de 1908.- Según información periodística de entonces (Diario La Nación) en la Cruz se sintió fuerte temblor con una duración de 15 segundos y probablemente con dirección SW. Por lo indicado es posible que su Magnitud haya estado comprendida entre 3 y 4. Se estima una Intensidad MM de IV.
- El 22 de Setiembre de 1908.- Sismo de Deán Funes. Se produjo fuerte movimiento en la población del mismo nombre, alcanzando IMM VII.-
- En 1910 se produjo un movimiento sísmico que fue sentido en Sampacho, referido por informaciones periodísticas del año 1934 luego del terremoto de Sampacho.
- Década 1910-1920.- Según relatos de pobladores en la zona de Deán Funes se produjeron varios movimientos sísmicos, probablemente de escasa magnitud. También se mencionan referencias sobre movimientos percibidos en las localidades de Avellaneda y Macha en el norte de la Provincia de Córdoba.

4.2 Sismos importantes ocurridos en la Región de Córdoba y San Luis

De la recopilación de sismos instrumentales, se han seleccionado a los sismos más importantes ocurridos en el siglo XX en la región oriental de las Sierras Pampeanas cuyas características están dadas en la [Figura 1 y 2](#).

4.3 Sismos medidos instrumentalmente. El caso del sismo de 2003.

El 5 de marzo de 2003 se produjo un pequeño sismo ($m_b= 4.1$ (USGS), $m_b= 4.3$ (ISCCD), $M = 5$ (INPRES)) en las inmediaciones de Embalse, que fue captado por los instrumentos de la Central Nuclear, tanto en campo libre como en la estructura.

El USGS lo localizó a 6 km al noroeste de la CNE, casi sobre la costa del lago, desconociendo la profundidad ($h = 33$ km). El INPRES lo colocó provisoriamente al este de Santa Rosa, sin precisar la profundidad ($h = 33$ km), mientras que ISCCD lo ubicó sobre Arroyo Corto, a unos 12 km de la CNE y habiendo calculado su foco a 47 km de profundidad.

Este evento sirve para evaluar distintas leyes de atenuación con la distancia. El único juego de datos completo corresponde al ISCCD. Para considerar los otros cálculos se adoptó una

profundidad de 47 km. La [Tabla 2](#) señala los valores obtenidos.

CARACTERISTICAS	Bufaliza (1989)	Toro (1997)	Campbell (2006)	Idriss (2007)
ISCCD M =4.3, R = 48.5 km	0.0099 g	0.0147 g	0.0073 g	0.0105 g
USGS M =4.1, R = 47.3 km	0.0087 g	0.0128 g	0.0060 g	0.0157 g
INPRES M =5.0, R = 50.5 km	0.0168 g	0.0266 g	0.0157 g	0.0194 g

Tabla 2: Estimación de la aceleración del sismo 2003 en CNE

Las relaciones desarrolladas por [Campbell \(2006\)](#) e [Idriss \(2007\)](#) han sido desarrolladas mediante regresiones, con datos del oeste de Estados Unidos. La relación de [Toro et al. \(1997\)](#) se ha generado con datos del centro de Estados Unidos. La expresión de Bufaliza ha sido desarrollada para el oeste de Argentina.

Los valores de aceleración máxima registrados fueron: $a = 0.0125$ g para la componente longitudinal y $a = 0.0145$ g para la componente transversal. Ambos valores son muy pequeños y son difíciles de evaluar con las leyes de atenuación.

En función de estos registros se puede concluir que la ley de atenuación de Toro es la que mejor reflejaría el estado actual del conocimiento en lo relativo al sitio y a las leyes de atenuación en general. Esto es particularmente válido para la consideración del juego de datos más completo, el del ISCCD.

5 RIESGO SISMICO

La determinación actual del Riesgo Sísmico implica la formulación de al menos dos tipos de sismo. El Terremoto Máximo Creíble (MCE) requiere identificar las fuentes sísmicas que pueden tener influencia sobre el sitio. A ellas se les asigna la magnitud del evento de acuerdo con los antecedentes, y en base a la distancia al sitio, se calcula las sollicitaciones en roca.

De acuerdo a los antecedentes, existen fuentes locales con mediana capacidad situados dentro de la provincia Sismotectónica y fuentes lejanas en el oeste de Argentina con mayor capacidad de generación de sismos destructivos.

5.1 Terremotos Lejanos

Los Terremotos lejanos registrados en la región al oeste de la provincia Sismotectónica están graficados en la [Figura 2](#).

La falla sismogénica más cercana es la de Valle Fértil (Río Desaguadero), que está situada a unos 240 km del Valle longitudinal y es capaz de generar un sismo de Magnitud 7.8. Es de destacar que esta falla ha sido señalada como un umbral sísmico, debido a que hacia el este de ella la actividad sísmica instrumental decae notoriamente ([Castano et al 1981](#), [Alvarado et al 2005](#)).

En la región de Cuyo existe un pormenorizado estudio de las fallas activas, con sus períodos de recurrencia probables. Del examen de sus ubicaciones, se infiere que las influencias de estas fallas es menor que la del Desaguadero, que es la más próxima al Valle longitudinal.

5.2 Terremotos Locales

Las [Figuras 1](#) y [2](#) contienen los principales eventos instrumentales registrados en las Sierras Pampeanas. Es de destacar que, cuando se registraron estos eventos, la disponibilidad

de registros no era lo suficientemente grande como para tener absoluta certeza de sus posiciones epicentrales. Por lo tanto, puede haber variaciones significativas en la ubicación de los hipocentros.

En casos de incertidumbre, existe una tendencia natural a atribuir un evento sísmico a la falla cercana más importante. Si bien esto puede ser impreciso e incluso erróneo para un evento pequeño, el criterio suele ser cierto para los eventos extremos, ya que hay una relación directa entre el tamaño de la falla y la magnitud del sismo que puede generar.

Cuando se trata de asignar determinísticamente un evento sísmico a una falla activa, hay que tener en cuenta distintos factores, los que tienen cierto grado de arbitrariedad. A ello se le suma las incertidumbres propias de la determinación de la actividad de la falla.

En el caso de la FSC si bien se extiende unos 180 km, está claro que es una superficie compuesta de varios tramos, de 40 a 50 km cada uno, con características diferentes, debido a las inclinaciones (buzamientos) y sus rumbos de los distintos tramos que presentan diferentes convexidades en un mapa. Esto hace que la longitud de ruptura en un evento sísmico tenga barreras geométricas dentro de la longitud total de la FSC. Asimismo, se pueden hacer hipótesis de la longitud de ruptura dentro de cada tramo relativamente homogéneo.

En la región centro-sur del Valle Longitudinal, existen otras fallas tanto al oeste como al este de la FSC que tienen asignadas distinto grado de actividad. En la falla de Soconcho, la longitud de ruptura puede estimarse en 12 km y en la falla Elevación Pampeana EP en 30 km. Esta última puede ser considerada como una hipótesis muy conservadora, debido al poco conocimiento que se tiene de ella, y a su juventud respecto a la FSC. Finalmente, a la rama El Molino de la falla Comechingones, que ha sido datada con una edad de fallamiento de 800 a 1200 años, se le puede atribuir una longitud de ruptura del orden de 25 km de longitud.

Cuando se analizan las magnitudes relacionándolas con el tamaño de las fallas, se usan regresiones empíricas (Wells et al 1994). En el caso de la FSC, la magnitud es $M = 6.6$. Algunos autores están postulando la hipótesis de sismos en las Sierras Pampeanas, con magnitudes $M > 7.0$ (Costa 2004) y aún de $M > 7.5$ (Costa et al 2005). El principal argumento está basado en las mediciones de corrimientos superficiales observados en trincheras y en otras manifestaciones de actividad sísmica como paleo-avalanchas y paleo-licuación. Esos indicadores son menos robustos que la longitud de ruptura, para la determinación de la capacidad sismogénica, lo que es evidente desde el punto de vista de la cantidad de observaciones, de la tendencia estadística y de la variabilidad del fenómeno en si mismo. Así por ejemplo, los desplazamientos superficiales aflorantes generados por un sismo varían a lo largo de la traza, y la paleolicuación de suelos y los deslizamientos tienen una complejidad geotécnica no caracterizable solamente por la sollicitación sísmica.

En la [Tabla 3](#) se presentan los resultados de aplicar las regresiones de Wells et al (1994) en base a la longitud de ruptura superficial.

Falla	Tipo	Longitud traza	Longitud Ruptura	MAGNITUD
FSC	Inversa	42 km	21 km	6.6
EP	Inversa	60 km	30 km	6.8
Soconcho	Rumbo	25 km	12 km	6.3
EL Molino	Inversa	51 km	25 km	6.7

Tabla 3: Estimación de capacidad sismogénica de fallas del Centro-Sur del Valle Longitudinal

El mapa de rasgos neotectónicos ([Figura 7](#)) indica para la FSC, como antigüedad del movimiento: Holoceno y Pos-glacial (< 15000 años). Esta edad no tiene como fundamento

una datación absoluta y es una estimación estratigráfica que no es compartida por otros tectonistas que ubican el último movimiento en alrededor de 800.000 años.

5.3 Aceleraciones esperables para el MCE

Para valorar las aceleraciones en un sitio dentro del Valle longitudinal, importa conocer cual es la distancia a la fuente sismogénica, y en base a ello emplear distintas leyes de atenuación. La fuente más próxima es la Falla de la Sierra Chica FSC. A modo de ejemplo se puede analizar el caso de la presa de Río Grande, situada a unos 18 km de la FSC. La [Tabla 4](#) presenta los valores que se alcanzan en base a distintas leyes de atenuación. Comparativamente se ha colocado una fuente lejana, situándola en el borde de la provincia sismotectónica (Valle Fértil VF).

SISMO	FALLA	MAG	DISTANCIA km	CAMPBELL (2006)	TORO (1997)	IDRISS (2007)
Local	FSC	6.6	18	0.19g	0.30 g	0.17 g
Lejano	V.F.	7.8	240	0.024g	0.024 g	0.04 g

Tabla 4: Aceleraciones máximas para Sismos locales y lejanos

Es de destacar que las expresiones de Campbell e Idriss pertenecen a la denominada nueva generación de leyes de atenuación, NGA, y han sido formuladas en base a bases de datos de aceleraciones de todo el mundo. La expresión de Toro pertenece al este de Estados Unidos.

Si se compara los valores obtenidos con los usados en el proyecto, $a = 0.22g$, se observa que las diferencias no son significativas, a pesar de haberse empleado en 1976, un método absolutamente diferente.

5.4 Períodos Dominantes

En la determinación del Período Predominante se pueden emplear las definiciones y expresiones dadas por Rathje et al. (1998). En ese trabajo se distingue entre el Periodo Medio T_m , el Período Predominante T_p y el Periodo Predominante Espectral suavizado T_o . La regresión derivada para el Período Predominante se expresa en las Figuras 12 del trabajo original que se transcribe en la [Figura 8](#).

Para un sismo local a la distancia considerada de 18 km, e interpolando en los resultados del modelo empírico más reciente, para un sismo de $M = 6.6$ el valor del Período Predominante T_p resulta aproximadamente igual a 0.23 s. Según la formula de Idriss para determinar los espectros de respuesta, el Período Predominante resulta aproximadamente igual a 0.20 s. Cuando se lo compara con otros sismos registrados en Sierras Pampeanas, estos valores resultan de un 25 a un 30% más elevados.

Para el caso del sismo lejano, a la distancia de 240 km, se obtiene un Período Predominante T_p aproximadamente igual a 0.45 s.

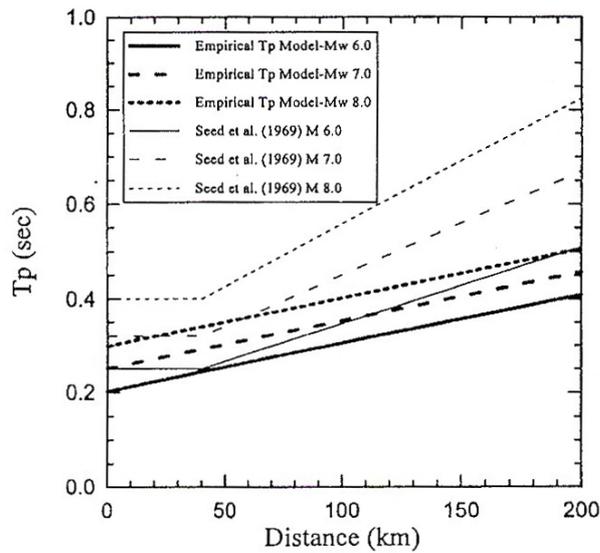


Figura 8: Período dominante según Rathje (1998)

6 ESPECTROS DE RESPUESTA

Se ha realizado una comparación de las formas espectrales del sismo de 2003, con relación a las formas de las zonas sísmicas activas del oeste de Estados Unidos (WUS) y las formas de zonas sísmicas estables del centro de Estados Unidos (CEUS), propuestas por Silva, Youngs and Idriss en 2001. La Figura 9 muestra que las componentes horizontales del sismo de 2003 tienen formas espectrales que tienen características intermedias entre las formas planteadas.

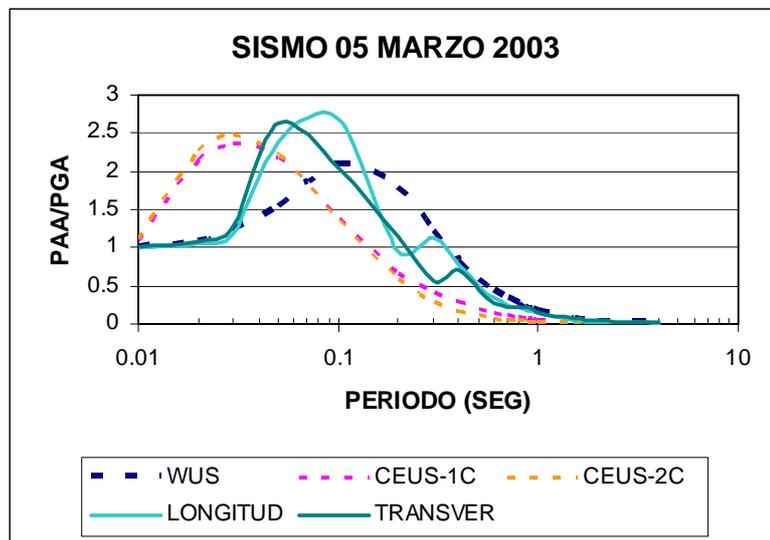


Figura 9: Comparación de los espectros de 2003 con las formas espectrales de zonas sísmicas activas (WUS) y estables (CEUS) (según Silva, Youngs and Idriss, 2001)

Una situación similar ha sido observada en sismos medidos en las Sierras Pampeanas de Tucumán. En base a ello se ha planteado una forma espectral intermedia para definir los

sismos de verificación, mostrada en la [Figura 10](#).

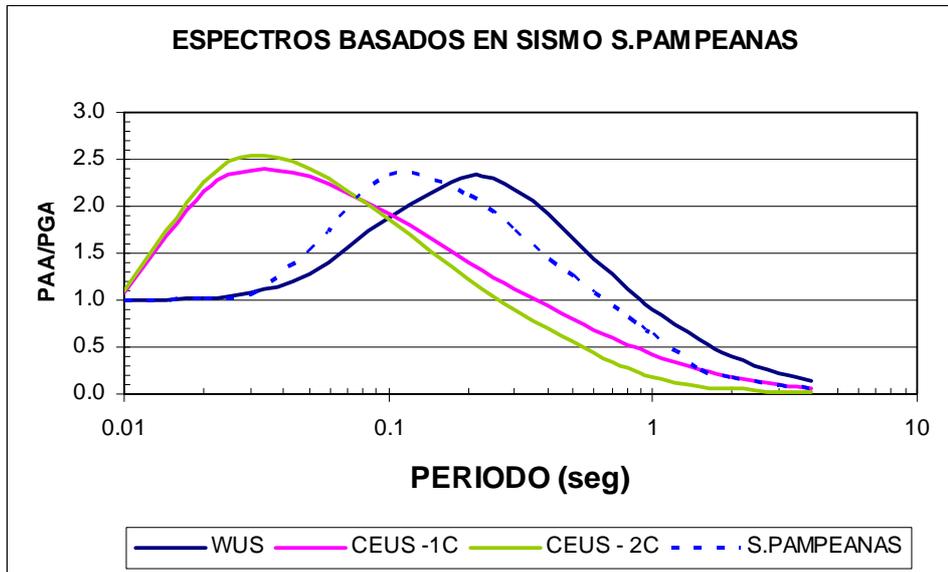


Figura 10: Forma Espectral planteada para las Sierras Pampeanas, comparada con las de zonas sísmicas activas (WUS) y estables (CEUS) (según [Silva, Youngs and Idriss, 2001](#))

7 MECANICA DEL FALLAMIENTO

La determinación de la recurrencia de los sismos relacionados con la falla FSC es una tarea difícil de cuantificar debido a la baja actividad sísmica. Como los períodos de registros instrumentales e históricos son breves, se recurre a las manifestaciones tectónicas. En este caso la ausencia de dataciones geocronológicas de los fallamientos observados impide una validación de las hipótesis que se puedan formular.

Los informes previos y antecedentes bibliográficos sólo especulan sobre la edad del último movimiento y los períodos que plantean van desde los 15.000 hasta los 2.000.000 de años.

Se tiene la certeza de que el alzamiento está relacionado con la subducción de la dorsal Juan Fernández. La curva de velocidad de alzamiento, tal como se mencionó previamente, presentaría un período de máxima actividad en la primera parte del intervalo considerado y actualmente la actividad es constante o decreciente.

7.1 Formulación de un modelo mecánico conceptual

Debido a las restricciones de información existente, la modelación temporal que se puede realizar es muy limitada. No obstante ello, se pueden plantear algunos escenarios que tengan racionalidad y un mínimo de validación.

Se sabe que la Sierra Chica se ha formado por movimiento de bloques a lo largo de planos de falla de FSC. En otras palabras por una sucesión de sismos de tamaño y espaciamiento temporal desconocido. El alzamiento ha sido recortado por procesos erosivos.

En el caso particular de la Falla FSC, el tramo de interés de este trabajo está limitado por las proximidades de Los Molinos al Norte y Santa Rosa al sur, en un total de unos 42 km.

El alzamiento medio a lo largo de ese tramo es de unos 270 metros aproximadamente.

Si se tiene en cuenta los procesos erosivos, se puede hipotetizar que el alzamiento vertical acumulado ha estado en el orden de 325 m.

El afloramiento de la Falla frente a Santa Rosa indica un buzamiento hacia el este de 30°. Considerando la altura media neta (alzamiento-erosión) alcanzada, se requiere un desplazamiento a lo largo del plano de falla de 650 m. Es decir que la sumatoria de desplazamientos provocados por sismos alcanza esa magnitud.

No se conoce la distribución de los sismos que lo provocaron, pero si se puede hipotetizar que el proceso se ha realizado en 10.000.000 de años.

Se puede estimar el desplazamiento medio provocado por un sismo en función de la magnitud. Existen algunas formulaciones empíricas que son regresiones de observaciones en distintas parte del mundo. Empleando la regresión de [Wells & Coppersmith](#), el desplazamiento promedio de un sismo responde a la ecuación:

$$M = 6.93 + 0.82 \text{ Log (AD)} \quad \text{donde AD esta medido en metros.}$$

Al desconocerse la distribución de los sismos, se puede plantear casos extremos para determinar el número de sismos capaces de ir sumando desplazamientos hasta alcanzar el alzamiento total.

7.1.1. Modelo de sismo único

Este modelo conceptual tiene como hipótesis extrema la existencia de un único tamaño de sismo causante de los desplazamientos. Es decir que la energía se manifiesta en forma constante y por lo tanto se producen sismos de una sola magnitud.

De ser este el caso, se puede aplicar la formula enunciada y computar cuantos sismos hace falta para llegar a sumar 650 m de desplazamiento. La [Tabla 5](#) presenta el cómputo y la [Figura 11](#) representa el intervalo medio entre sismos.

MAGNITUD	FRECUENCIA	TM
6.50	0.0002167	4615
6.60	0.0001625	6154
6.70	0.0001250	8000
6.80	0.0000929	10769
6.90	0.0000699	14308
7.00	0.0000533	18769
7.10	0.0000406	24615
7.20	0.0000302	33077

Tabla 5: Intervalos medios de tiempo de sismos con magnitud única

7.1.2. Modelo de Energía distribuida uniformemente

Un escenario en las antípodas del anterior es considerar que la liberación de la energía se produce en forma tal se distribuye en forma uniforme. Esto significaría que en el intervalo considerado, la sumatoria de toda la energía de cada rango de magnitud es constante.

Para poder cuantificar la distribución es necesario considerar la relación existente entre magnitud de sismos y energía E. En este caso se ha optado por la tradicional fórmula de Gutenberg y Richter:

$$\text{Log E (ergios)} = 11.8 + 1.5 M_s.$$

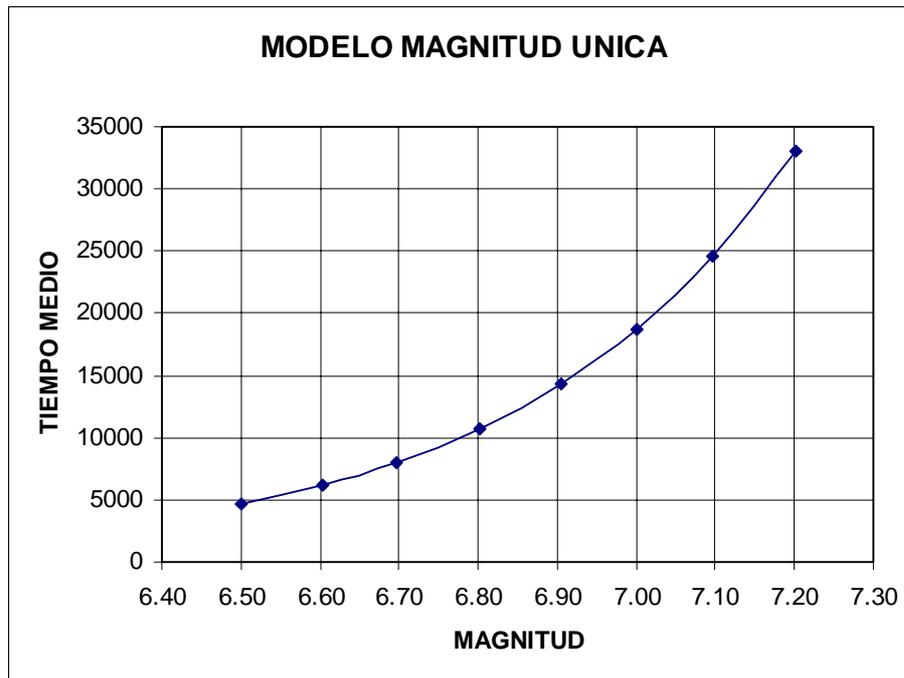


Figura 11: Espaciamiento medio de sismos con magnitud única.

Aplicando esta expresión conjuntamente con la de desplazamiento de un sismo en función de la magnitud, se puede computar el número de sismos necesarios de cada magnitud, de manera tal que la sumatoria de desplazamientos sea igual a 650 m (Tabla 6). Es de destacar que los valores de la Tabla comienzan en una magnitud superior a 6 debido a que estos sismos son los que pueden producir callamiento superficial.

Asimismo, el significado de la Frecuencia y TM no es comparable con el de la Tabla 5, debido a que en este caso se requieren todos los sismos de la Tabla 6 para producir el alzamiento de 650 m, mientras que en la Tabla 5, se necesitan los de un solo renglón.

MAGNITUD	# SISMOS	FRECUENCIA	TM
6.1	2888	0.0002888	3463
6.2	2045	0.0002045	4891
6.3	1447	0.0001447	6909
6.4	1025	0.0001025	9759
6.5	725	0.0000725	13785
6.6	514	0.0000514	19472
6.7	364	0.0000364	27505
6.8	257	0.0000257	38852
6.9	182	0.0000182	54880
7.0	129	0.0000129	77519

Tabla 6: Distribución de sismos necesarios para producir el alzamiento

7.2 Ensamble de datos instrumentales y modelos mecánicos

Para definir el sismo con una recurrencia por ej. de 10000 años se puede plantear una

curva de recurrencia donde se grafiquen los resultados de los modelos conceptuales descriptos y la información instrumental.

Al respecto, es de destacar que para el caso del Modelo de Magnitud Única, al existir un único sismo, su valor es referencial y en la Figura 12 sólo se ha colocado el valor del sismo de $M = 6.6$. La curva para el Modelo de Energía Uniforme está definida a partir de los números de sismos de la Tabla 6.

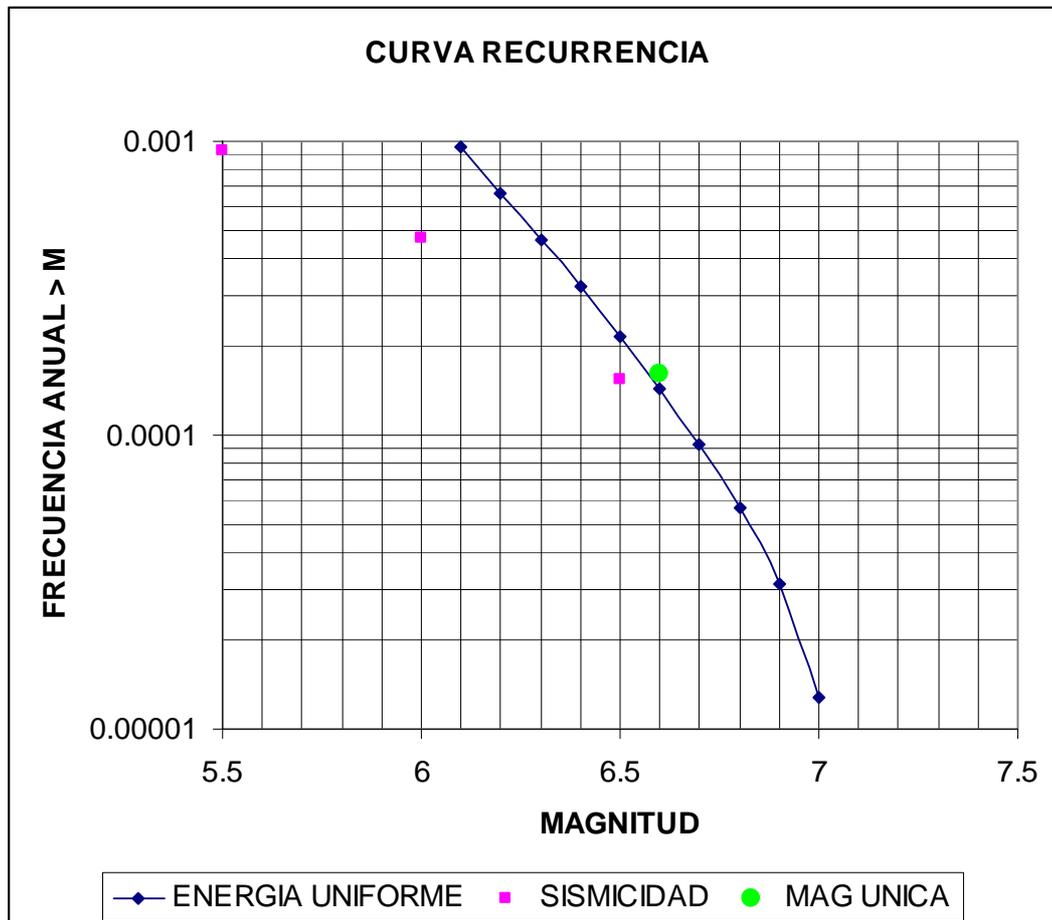


Figura 12: Frecuencia Media Anual de la Falla de la Sierra Chica

La diferencia entre la curva del Modelo de Energía Uniforme y el punto del Modelo de Magnitud Única señala el hecho de que en el primero parte de la energía fue adjudicada a magnitudes superiores, en este caso $M > 6.6$.

Los puntos de las observaciones instrumentales indican menor actividad sísmica que los del modelo mecánico. Esto estaría indicando que al menos en los períodos instrumental (últimos 100 años) e histórico (últimos 500 años), la actividad tectónica ha sido inferior a la media. Las observaciones tectónicas también indican que en el último millón de años, la actividad habría sido inferior a la de los millones de años precedentes.

La definición del sismo de recurrencia de 10.000 años, puede leerse de la curva y su valor dependerá de cómo se realice el empalme entre la actividad instrumental y el modelo mecánico. Si se toma el punto de Magnitud = 7 que es un buen anclaje y se une con el dato instrumental de Magnitud = 6.5, se obtiene para el cruce correspondiente a 10.000 años, una

M = 6.6. Si se realizan otro tipo de empalme, la Magnitud puede subir un poco pero dentro del intervalo M = 6.6 – 6.7.

Dentro de las limitaciones e incertidumbres de esta propuesta cualquiera de estos valores tiene el mismo significado estadístico.

Desde el punto de vista mecánico un sismo de M = 6.6 corresponde a una rotura de la falla FSC del 50% de la longitud, mientras que un sismo de M = 6.7 corresponde a una rotura de 2/3 de la longitud total. En el análisis determinístico se toma ese entorno para definir el Sismo Máximo Creíble. Por lo tanto es posible afirmar que el Sismo Máximo Creíble coincide con el de una recurrencia de 10.000 años.

8 CONCLUSIONES

El conocimiento actual de la tectónica regional del centro de Argentina indica que toda la Sierras de Córdoba están controladas por la horizontalización de la placa de Nazca, motivada por la subducción de la dorsal Juan Fernandez.

La región donde se encuentra el Valle Longitudinal presenta rasgos neotectónicos mejor definidos que los publicados en la década de 1980. La falla de la Sierra Chica FSC es la más importante, aunque no la única, que presenta esos rasgos. A pesar de su importante desarrollo longitudinal, se encuentra segmentada, lo que motiva una reducción de su capacidad sismogénica.

Se ha postulado un modelo de alzamiento mecánico que es compatible con la información tectónica y topográfica existente en el valle. Esto podría dar indicios ciertos de la recurrencia de los sismos de M = 6.6, que son los que predominan en el Valle Longitudinal para el diseño de obras de infraestructura.

Con la información de registros en la zona, se ha podido precisar las leyes de atenuación que pueden ser empleadas en los análisis. Asimismo, se han podido determinar formas espectrales cuando se las compara con el Oeste y Centro-Este de Estados Unidos.

9 AGRADECIMIENTOS

Se agradece al Centro de Vinculación de Ensayos No Destructivos y de Evaluación de Obras de Infraestructura Civil de la FCEF, la disposición de información relacionadas con estudios de sismicidad en el Valle de Calamuchita.

REFERENCIAS

- Alvarado P., S Beck, G. Zandt, M. Araujo and E. Triep. Crustal deformation in the south-central Andes backarc terranes as viewed from regional broad-band seismic waveform modelling. *Geophy. J. Intl.* 163:580-598, 2005.
- Alvarado P., B.G. Machuca and S.Beck. Comparative seismic and petrographic crustal study between the Western and Eastern Sierras Pampeanas region (31°S). *Rev. Asoc. Geol. Argentina.* 60 (4):787-796, 2005b
- Amos, A.J, R.H. Caligari, y C. Siches. Las fallas activas en la República Argentina. Asociación Argentina de Geología Aplicada a la Ingeniería. Actas I: 235-242 , 1981.
- Brooks B. , Bevis M, Kendrick E., Manceda R, Lauria E., Maturana R. and Araujo M. Crustal motion in the Southern Andes (26°-36°): Do Andes behave like a microplate?. *Geoch. Geophy. Geosystems.* G3, 4, 10, 2003.
- Campbell and Bozorgnia (2006) Empirical Ground Motion Model for the Average Horizontal Component of PGA, PGV and SA at Selected Spectral Periods Ranging from 0.01-10.0 Seconds. *Interim Report for USGS Review.*

- Castano J.C. y H.E.Bastias. Análisis sismotectónico y su aplicación a la estimación del peligro sísmico. *INPRES Pub* 10, 1981.
- Costa C H. Neotectónica en Peligrosidad Geológica en Argentina. Metodología de análisis y mapeo. Estudio de Casos. *ASAGAI. Pub. Esp.* 4, 2004
- Costa C, Machette M.N., Dart R.L, Bastias H.E, Paredes J.D., Perucca L.P, Tello G.E and Haller K.M. Map and Database of Quaternary Faults and Folds in Argentina. *USGS Open-File Report 00-0108*, 2000.
- Costa C.H, and G.L.Sagripanti.Large Holocene earthquakes in the Sierras Pampeanas and surrounding plains: more likely than once thought. *ICSU-IGCP 490 Meeting. Holocene environmental catastrophes in South America: From the lowlands to the Andes.* Pp 22, 2005
- Decanini L. y R.J. Rocca. Estudio sobre Leyes de atenuación para la región central de Argentina. *Actas ASAGAI*, IV:130-147, 1989.
- Idriss I.M. Empirical model for estimating the average horizontal values of pseudo-absolute spectral accelerations generated by crustal earthquakes. *Vol.1. Interim Report Issued for USGS Review*, 2007
- Rathje E.M., Abrahamson N.A. and Bray J.D. Simplified frequency content estimates of Earthquake Ground Motions. *J. Geot and Geoenv. Eng. ASCE*, 124 No2:150-159, 1998.
- Rocca, R.J, L.D. Decanini y C.A.Prato. Riesgo sísmico en el valle Longitudinal de las Sierras de Córdoba. *Actas ASAGAI*, VI: 136-153, 1991.
- Silva W.J., R.R. Youngs, and I.M. Idriss “Development of Design Response Spectral Shapes for Central and Eastern U.S. (CEUS) and Western U.S. (WUS) Rock Site Conditions”. *Proc. Of the OECE-NEA Workshop on Engineering Characterization of Seismic Input. Nov. 15-17, 1999. NEA/CSNI/R (2000) 2*, Vol.1. pp. 185-268, 2001.
- Toro G.R., Abrahamson N. and Schneider J.F. Model of strong ground motions from earthquakes in central and eastern North America: best estimates and uncertainties. *Seismological Research letters*, 68:58-73, 1997.
- Wagner L.S., Beck S., Zandt G. and Ducea M.N. Depleted lithosphere, cold, trapped asthenosphere, and frozen melt puddles above the flat slab in central Chile and Argentina. *Earth and Planetary Science Letters* 245: 289-301, 2006.
- Wells D.L. and K.J. Coppersmith. New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area and surface displacement. *Bull. of Seismol. Soc. America*, 84 :974-1002, 1994.