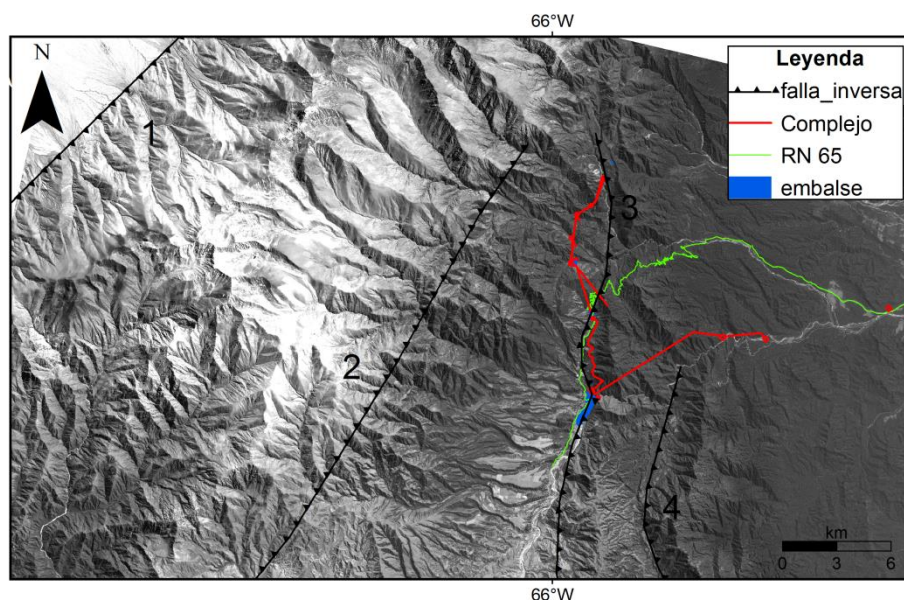


Evaluación de la amenaza sísmica en el área de la proyectada presa Potrero del Clavillo, Catamarca-Tucumán



Preparó

Liliana del Valle Abascal
Dra. en Geología Estructural
Universidad Nacional de Tucumán

Gustavo González Bonorino
M.Sc., Ph.D. Geología
CONICET

Agosto 2014

Indice

Resumen ejecutivo

PARTE I - INTRODUCCIÓN

1. Ubicación
2. Objetivos
3. Metodología básica empleada
 - i. Fuentes de información
 - a. Geología
 - b. Fallas
 - c. Epicentros sísmicos
 - ii. Programas de computación

PARTE II - ANÁLISIS SISMOLÓGICO-ESTRUCTURAL REGIONAL

4. Marco geológico-estructural regional
5. Marco sismológico regional
 - i. Distribución espacial de sismos
 - ii. Deformación en el basamento de Sierras Pampeanas
6. Parámetros sísmicos regionales

PARTE III - ANÁLISIS SISMOLÓGICO-ESTRUCTURAL EN EL AREA DE INTERÉS (ADI)

7. Fallas posiblemente activas
 - i. Correlación epicentros-fallas
8. Selección de ecuaciones de predicción de movimiento del suelo ('Ground Motion Prediction Equations')
 - i. Definición de parámetros
 - ii. Cálculo de magnitudes posibles en fallas
 - iii. Profundidad sismogénica

PARTE IV – MODELIZACIÓN DE LA AMENAZA SÍSMICA EN EL ADI

9. Modelización determinística
 - i. Propiedades del sitio de la presa
 - ii. Modelo determinístico
 - iii. Efecto por falla cercana ('near fault')
 - iv. Componente vertical de la aceleración
 - v. Discusión
10. Modelización probabilística
 - i. Zonificación sísmica
 - ii. Modelo probabilístico

Conclusiones

Bibliografía mencionada en el texto

Listado de abreviaturas

COMPLEJO HIDROELÉCTRICO POTRERO DEL CLAVILLO

Resumen ejecutivo

El presente documento es un resumen ejecutivo de los estudios desarrollados para dar cumplimiento a los requerimientos de la Actividad 11 del pliego: “ESTUDIOS REGIONALES DE SISMICIDAD Y ANTECEDENTES SÍSMICOS DEL ÁREA”. El desarrollo de la metodología utilizada y los cálculos específicos componen el Informe Final.

El Complejo Hidroeléctrico Potrero del Clavillo estará emplazado en el ámbito geológico y geográfico de las Sierras Pampeanas, en el sector centro-occidental de la provincia de Tucumán. Esta región es tectónicamente activa, a juzgar por magnitudes sísmicas registradas e históricas de $M=6-7$. Las estructuras geológicas que gobiernan la sismicidad son dos conjuntos divergentes de fallas inversas, un conjunto con vergencia hacia el este y otro conjunto con vergencia hacia el oeste, y ambos tienen orientación dominante norte-sur.

El análisis sismológico-estructural regional permitió caracterizar la naturaleza de las fuentes sismogénicas utilizadas en la determinación de los parámetros sísmicos. Este conocimiento es relevante para ajustar la selección de las relaciones de atenuación sísmica aplicables.

El análisis sismológico-estructural en el área de interés (ADI) permitió identificar las fallas probablemente activas (“capable faults”) y ajustar los parámetros utilizados en la modelización.

El Informe Final presenta una exhaustiva evaluación de la amenaza sísmica esperable en el área de emplazamiento del Complejo, y provee la información geológica y sismológica necesaria para elaborar los pertinentes espectros de diseño de las obras. El estudio es específico para el sitio (‘site specific’) y aborda (i) la cuantificación de la amenaza o peligrosidad sísmica en el área del complejo, (ii) el cálculo de la Aceleración Máxima del Terreno ($AMT=PGA$, ‘Peak Ground Acceleration’) y (iii) las aceleraciones espectrales para períodos, corto ($Sa_{0,2}$) y largo ($Sa_{1,0}$).

La evaluación de la amenaza sísmica requirió la integración de información geológica y sismológica a la escala regional del NOA y a la escala local del ADI, y, en particular, del área del futuro Complejo. El análisis se apoyó sobre un minucioso relevamiento de información existente en bibliografía nacional y extranjera. El estudio sismológico integró catálogos de registros instrumentales del Instituto Nacional de Prevención Sísmica (INPRES), para sismos de $M<5$, y de la Advanced National Seismic System (ANSS), para sismos de $M\geq 5$, con un total de más de 5000 eventos. Ambos catálogos fueron depurados previamente a la integración, y luego el catálogo integrado fue reducido para asegurar la completitud (‘completeness’) utilizando los programas de computación Zmap y Mmax. Adicionalmente se tomaron en cuenta los datos de 25 sismos históricos (pre-1977) tomados del INPRES.

El análisis regional mostró que los focos sísmicos forman dos conjuntos netamente diferenciados, uno con origen en la interfase y en el interior de la placa de Nazca, distribuidos en un plano que se profundiza hacia el este de 0 a 630 km, y otro conjunto relacionado con fallamiento en la faja plegada y corrida de los Andes, a profundidades menores a 60 km (20 km en promedio). En el subsuelo del ADI, los hipocentros en el interior de la placa Nazca ocurren a más de 150 km de profundidad, por lo que se consideró que no contribuirían una amenaza significativa para el Complejo y se trabajó con los sismos originados en profundidades someras.

El análisis de las fallas geológicas comprendidas en el ADI incluyó 65 fallas: 54 fallas inversas, 8 fallas normales y 3 fallas sin sentido de rechazo definido. Los lineamientos no fueron considerados por falta de datos y ausencia de evidencia de actividad. Varias de estas fallas, particularmente las de rechazo inverso, podrían corresponder a segmentos de falla y actuar conjuntamente en caso de ruptura (caso de la falla de Guasayán).

Utilizando ArcGis (licencia habilitada a favor de los autores del presente informe) se correlacionaron los epicentros y las fallas geológicas para determinar las zonas de entorno (buffer) de 20 km, las que toman en consideración el posible error en la ubicación de los epicentros y el desfase entre foco y epicentro, consecuencia de la inclinación del plano de falla. Esta asociación espacial de epicentros sísmicos con fallas expuestas en superficie permitió reconocer 38 fallas probablemente activas ('capable faults') en el Área de Interés (ADI) del estudio. El ADI se definió por una semiesfera de 150 km de radio con centro en el Complejo; en un recorrido de 150 km, aun sismos de $M=8$ ven atenuada la energía a niveles que no comprometen estructuras ingenieriles.

La amenaza derivada de la sismicidad somera se analizó por métodos determinístico y probabilístico, siguiendo el protocolo actualmente vigente internacionalmente.

En el análisis determinístico primero se estimó el potencial sismogénico de las fallas probablemente activas en función del largo de las fallas en superficie. Luego se priorizaron nueve de esas fallas en base a la magnitud estimada y distancia al Complejo. Una modelización expeditiva indicó que cinco de esas fallas contribuirían aceleraciones inferiores a 0,1g al sitio del Complejo, por lo que fueron descartadas. Las cuatro fallas restantes fueron procesadas con cuatro relaciones de atenuación de última generación para corteza somera tectónicamente activa, y calculados los valores de aceleración para $T=0,01, 0,2$ y $1,0$ segundos. Este cálculo se hizo considerando dos profundidades hipocentrales medias, 10 km, típica en orógenos con buena información geológico-sismológica, y común en los Andes, y 20 km, apoyada en el promedio de los focos en el ADI. De este grupo de cuatro fallas, dos dominan el escenario sísmico para una Zhip (profundidad hipocentral) de 10 km en las tres frecuencias, mientras que una de ellas es determinante en el movimiento del suelo para un Zhip de 20 km.

Tres de las cuatro fallas se encuentran a menos de 15 km del sitio de interés y reúnen las condiciones para generar efectos de directividad sobre el sitio de la presa y el impulso resulta en una amplificación de la aceleración del 20%, razón por la cual las aceleraciones para $T=1$ segundo fueron modificadas por el efecto de falla cercana ('near-fault').

En el análisis probabilístico se utilizó el programa CRISIS2014 y se confeccionó un mapa de distribución del valor del parámetro "b" de la distribución de Gutenberg-Richter. El mapa muestra con claridad la concentración de valores de "b" elevados al oeste de Potrero del Clavillo, lo que relacionamos con una corteza más caliente localmente. Reconocemos una zonificación en función de la distribución de la tasa de actividad sísmica. Los cálculos permitieron definir el Sismo Máximo Considerado (MCE; recurrencia 2475 años); el Sismo Operacional Básico (OBE; recurrencia 72 años), el Sismo Máximo de Diseño (recurrencia 475 años), y el sismo excepcional con recurrencia 10.000 años.

PARTE I INTRODUCCIÓN

1. Ubicación

El Complejo Hidroeléctrico Potrero del Clavillo estará ubicado en la provincia geológico-estructural Sierras Pampeanas septentrional, cerca del contacto con las provincias Sierras Subandinas y Cordillera Oriental, sobre el faldeo oriental del Nevado del Aconquija, en el sector centro-occidental de la provincia de Tucumán (Figura 1.1).

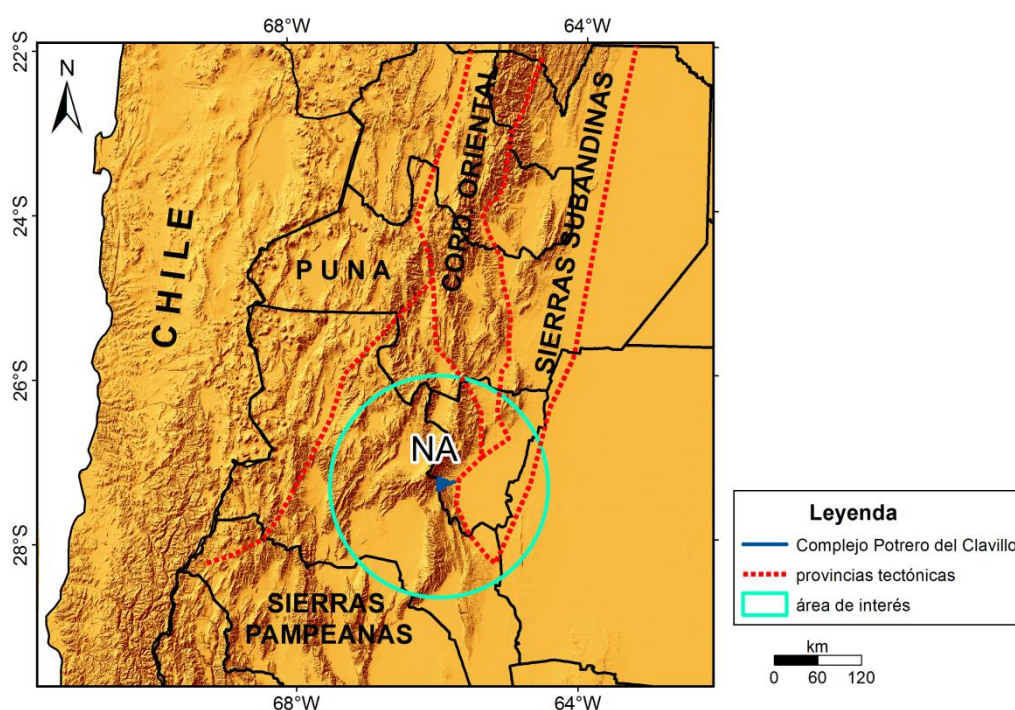


Figura 1.1 Contexto geográfico y geológico del complejo Potrero del Clavillo en el Noroeste Argentino (NOA). La circunferencia, con centro en el futuro emplazamiento de la presa Potrero del Clavillo (triángulo azul), indica el área considerada para la zonificación sísmica. NA – Nevados del Aconquija.

El relieve local es abrupto, con crestas que superan 2300 m s.n.m. y diferencias de nivel de más de 800 m. El embalse principal estará a unos 1.500 m s.n.m., y el resto de las obras se extenderán hacia el norte y el este hasta cotas de 700 m s.n.m. El complejo ocupa las altas cuencas de los ríos Gastona y Medina, que desaguan en el río Salí.

El Complejo comprende una presa, diques derivadores y compensadores, y varias centrales hidroeléctricas, abarcando un área entre las coordenadas 27°17'S y 27°23'S, y 65°45'O y 66°O, aproximadamente. El acceso vehicular es por la ruta nacional 65, desde Concepción (Figura 1.2).

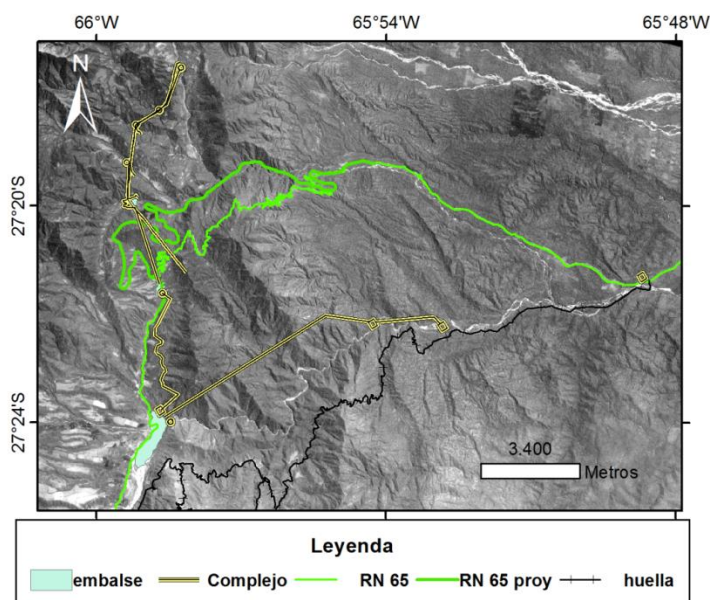


Figura 1.2 Futuro emplazamiento de las obras del Complejo Potrero del Clavillo. La ubicación del embalse principal se muestra en el ángulo inferior izquierdo. Las líneas verdes oliva representan los canales derivadores. El acceso vehicular es por la ruta nacional 65 (líneas en tonos verdes).

2. Objetivos

El objetivo primordial de este estudio es proveer información geológica y sísmológica que permita elaborar los espectros de diseño requeridos para la construcción de la presa y obras complementarias. El estudio es específico para el sitio ('site specific').

Objetivos parciales que contribuyen al objetivo primordial son: (a) cuantificar la amenaza, o peligrosidad, sísmica en el área del complejo, y (b) calcular la aceleración máxima del terreno ($AMT=PGA$, 'Peak Ground Acceleration'), y las aceleraciones espectrales para períodos corto ($Sa_{0,2}$) y largo ($Sa_{1,0}$), puntualmente en el sitio de la presa. La amenaza se calcula por métodos determinístico y probabilístico.

Las probabilidades de interés corresponden a períodos de recurrencia para dos niveles de exigencia estructural: (a) Terremoto Máximo Considerado (probabilidad de excedencia de 2% en 50 años; período de recurrencia = 2450 años), la construcción no colapsa. (b) Terremoto Operativo (probabilidad de excedencia de 10% en 50 años; período de recurrencia = 475 años), la construcción no pierde funcionalidad.

3. Metodología básica empleada

Se describe aquí la metodología general, de base, empleada en la elaboración de este informe. Las metodologías específicas, que incluyen las ecuaciones utilizadas, las inferencias y aproximaciones hechas, y la bibliografía pertinente, se detallan en el cuerpo principal del informe. La metodología general sigue los lineamientos en FEMA (2005).

La metodología básica comprende tres rubros: (a) la compilación de información geológica y sísmológica existente, (b) la obtención de información geológico-estructural en el terreno, y (c) la aplicación de programas de computación para el análisis de dicha información. Se recopiló información geológica y sísmológica, tanto a escalas regional, para el Noroeste Argentino (NOA), como local, alrededor del emplazamiento de las obras, pertinente al problema a resolver. El propósito de la información regional es

definir el marco geotectónico que controla el comportamiento estructural en el área de emplazamiento. El análisis estructural-sismogénico a escala local se limitó a la región delimitada por una semiesfera de 150 km de radio, con centro en la presa proyectada. Esta región es designada aquí como Área de Interés (ADI). La energía sísmica decae exponencialmente con la distancia a la fuente y, en la mayor parte de los casos, a más de unos 100 km es insuficiente para inducir aceleraciones del suelo dañinas para estructuras ingenieriles fundadas en roca, como será el caso del Complejo. En base a esta observación, FEMA (2005) sugiere que la evaluación de la amenaza sísmica comprenda un área no inferior a la de un círculo de 100 km de radio. Para este estudio el radio es un 50% mayor que este valor mínimo.

3.i Fuentes de información

Se enumeran las principales fuentes de información geológica y sismológica básicas utilizadas en este estudio.

3.i.a Geología

Mapas a escala 1:200.000 (Publicados por el SEGEMAR (Servicio Geológico-Minero Argentino)).

- Ruiz Huidobro, Oscar J., 1972. Descripción geológica de la Hoja 11e Santa María. Dirección Nacional de Geología y Minería, Boletín 74, 50 p., Buenos Aires.
- González Bonorino, F. 1950a. Descripción geológica de la Hoja 13e Villa Alberdi (Tucumán- Catamarca). Dirección Nacional de Geología y Minería, Boletín 74, 50 p., Buenos Aires.
- González Bonorino, F., 1950b. Geología y petrografía de las Hojas 12d (Capillitas) y 13d (Andalgalá). Boletín del Servicio Nacional Minero Geológico 70, 100 p., Buenos Aires.
- González Bonorino, F. 1951. Descripción geológica de la Hoja 12e, Aconquija Catamarca-Tucumán. Dirección Nacional de Minería, Boletín 75. Buenos Aires.
- González Bonorino, F. 1972. Descripción geológica de la Hoja 13c, Fiambalá, Prov. de Catamarca. Boletín de la Dirección Nacional de Geología y Minería 127, 76 p., Buenos Aires.
- González Bonorino, F. 1978. Descripción geológica de la Hoja 14f, San Fernando del Valle de Catamarca, Prov. de Catamarca y Tucumán. Boletín del Servicio Geológico Nacional 160, 85 p., Buenos Aires.

Mapas a escala 1:250.000 (Publicados por el SEGEMAR (Servicio Geológico-Minero Argentino)).

- González Bonorino, G., 1998. Mapa y Memoria de la Hoja Geológica 2363-I TARTAGAL. Publicada en CD.
- Hoja geológica 2566-II Salta
- González, O., Viruel, M., Mon, R., Tchilinguirian, P. y Barber, E., 2000. Hoja Geológica 2766-II San Miguel de Tucumán. Servicio Geológico Minero Argentino, Boletín 245, 124p., Buenos Aires.
- Dal Molin, C., Fernández, D.S., Escosteguy, L. y Villegas, D., 2003. Hoja Geológica 2766-IV Concepción, provincias de Tucumán, Santiago del Estero y Catamarca. Servicio Geológico Minero Argentino, Boletín 341, 41 p., Buenos Aires.

- Blasco, G., Caminos, R.L., Lapido, O., Lizuain, A., Martinez H, Nullo F, Panza, J.L., y Sacomani, L., 1994. Hoja Geológica 2966-II San Fernando del Valle de Catamarca. Dirección Nacional de Minería y Geología, Buenos Aires.
- Blasco G, Zappettini E, Hongn F., 1996. Hoja Geológica 2566-I San Antonio de los Cobres, provincias de Salta y Jujuy. Dirección Nacional del Servicio Minería y Geológico, Buenos Aires, Boletín 217.
- Mapa geológico de la provincia de Catamarca, 1:500.000.
- Mapa geológico de la Argentina, escala 1:5.000.000. .
- Mapa geológico-estructural escala 1:500 de Agua y Energía del área del arco de la presa proyectada. Estudio geológico de la quebrada del río Las Cañas (Garganta del Diablo). Departamento Andalgalá - Catamarca. G. Turazzini, 1971. Sistema Potrero del Clavillo. Aprovechamiento integral de los ríos Gastona y Medina. Provincias de Tucumán y Catamarca. JEPZN. Agua y Energía Eléctrica, tomo E.I.1. Estudios Básicos.
- Mapa geológico-estructural. Sistema Potrero del Clavillo - Geología 1ra. Central. Junio 1981. Piseta, Turazzini, DiSalvo, y Casajus.
- Trabajos de detalle incluidos en el Relatorio del XIV Congreso Geológico Argentino de Geología, Salta, 1999.
- Estudios sobre el terreno.

3.i.b Fallas

A continuación se dan las principales fuentes de información para la compilación de fallas con potencial efecto sobre el complejo. La compilación cubre el NOA de modo expeditivo, excepto en el área de interés para este estudio, definida por un radio de 150 km con centro en la presa proyectada de Potrero del Clavillo. Las referencias citadas se dan al final de este informe.

1 - Map of Quaternary faults and folds of Argentina (2000).

De este catálogo se incluyeron los componentes:

AR-01, AR-02, AR-03, AR-04, AR-05, AR-09, AR-75, AR-76, AR-77, AR-78, AR-80, AR-81, AR-83, AR-84, correspondientes al NOA.

Todas estas fallas y conjuntos de fallas están clasificadas como de edad <1,6 m.a., sin otra precisión, es decir que no son necesariamente fallas activas ('falla activa', con actividad en los últimos 10 mil años; Glosario, U.S. Geological Survey, <http://earthquake.usgs.gov/learn/glossary/?term=active%20fault>). Excepto para la AR-02 y la AR-09, catalogadas como fallas inversas, se desconoce el sentido del rechazo. En todas se desconoce el período de recurrencia.

2 - Iaffa, et al. (2011).

Se distinguen, en superficie, aproximadamente 30 fallas inversas y 15 fallas sin sentido de rechazo conocido (lineamientos), y en subsuelo distinguen aproximadamente 6 fallas inversas y 9 fallas normales.

3 - Carrapa, et al. (2005, 2006, 2008).

Se describen aproximadamente 15 fallas inversas alrededor del bolson de Fiambalá, Puna, Catamarca.

4 – Hongn et al. (2010).

Se describen unas 12 fallas inversas y unas 15 fallas sin rechazo definido en la Puna oriental y valle Calchaquí.

5 – Rodríguez Fernández et al. (1998).

Se describen unas 20 fallas inversas y unas 5 fallas normales en los alrededores de la quebrada de Humahuaca.

6 – Mapas geológicos en la cartografía del SEGEMAR mencionados arriba.

3.i.c Epicentros sísmicos

Los datos sísmicos considerados en este estudio proceden de tres catálogos:

1 - Catálogo ANSS (Advanced National Seismic System), Comprehensive Catalog (ComCat).

*Se incluyeron 1029 eventos sísmicos, ocurridos entre 1970 y 2014, en el área limitada por las coordenadas 22°S-29,3°S y 76,2°O-71,8°O. Sólo se consideraron magnitudes $M \geq 5,0$ ($M_{min}=5$, $M_{max}=8,0$). Las magnitudes fueron convertidas a M_w según fórmulas: $M_w=1,104*M_b-0,194$ y $M_w=0,953*M_l+0,422$. Las variantes de M_w no fueron convertidas. Profundidades: mín. 1 km.,. máx. 627 km.*

2 – Catálogo INPRES (Instituto Nacional de Prevención Sísmica).

Se incluyeron 4315 eventos sísmicos de idéntica área, con magnitudes $M \leq 5,0$, ocurridos entre 1977 y 2013. El catálogo no explicita el tipo de magnitud empleada, por lo que no se hicieron cambios.

3 - Catálogo INPRES (Instituto Nacional de Prevención Sísmica).

Se tomaron los sismos históricos en la región NOA, hasta 1977, $n=25$.

3.ii *Programas de computación*

La preparación de la base geográfica y la correlación entre epicentros y fallas se llevaron a cabo en ArcGIS, versiones 9.2 y 10 (licencias habilitadas a favor del autor). La depuración de los catálogos de epicentros y el análisis de la distribución espacial de focos se llevó a cabo con el programa Zmap (Wiemer, 2001; descarga gratuita en http://www.seismo.ethz.ch/prod/software/zmap/index_EN). El cálculo de los parámetros de sismicidad se hizo con los programas Zmap y Mmax (Kijko y Singh, 2011; acceso gratuito con permiso de los autores). El modelado probabilístico se llevó a cabo aplicando el programa CRISIS2014 (Ordaz et al., 2001).

PARTE II

ANÁLISIS SISMOLÓGICO-ESTRUCTURAL REGIONAL

4. Marco geológico-estructural regional

Se hace aquí una muy escueta reseña de las características geológicas del NOA. Abundante información y una bibliografía exhaustiva se puede encontrar en González Bonorino et al. (1999) y en Caminos (1999). Otra bibliografía consultada es mencionada en el texto y en el acápite 3.1 *Fuentes de información*.

La región del NOA comprende el orógeno y parte del antepaís Andino. El desarrollo del Orógeno Andino propiamente dicho se inició en el Cretácico y continúa actualmente, expandiéndose progresivamente hacia el este, sobre el cratón Sudamericano que subyace el antepaís. Esta expansión dio origen a una faja plegada y corrida, caracterizada por un fallamiento inverso, imbricado, con vergencia oriental, que involucra principalmente estratos del Mesozoico y Cenozoico. La faja plegada y corrida corresponde a la provincia geológico-estructural Sierras Subandinas, y el frente activo de avance del orógeno coincide aproximadamente con el límite oriental de esta provincia.

El Complejo Potrero del Clavillo estará emplazado en rocas de basamento metamórfico cristalino del Precámbrico-Paleozoico inferior, fuertemente deformadas en pliegues, fallas y diaclasas. Este basamento forma parte del núcleo del Orógeno Andino, y es el resultado de numerosas fases de deformación ocurridas entre el Paleozoico y el Cenozoico. La orogénesis asociada con la elevación de los Andes, y la consecuente denudación, expusieron en superficie las rocas de origen profundo que conforman este núcleo.

En la región de Potrero del Clavillo, el fallamiento muestra una doble vergencia, hacia el este en el este y hacia el oeste en el oeste (Figura 4.1; Drozdewski y Mon, 1999).

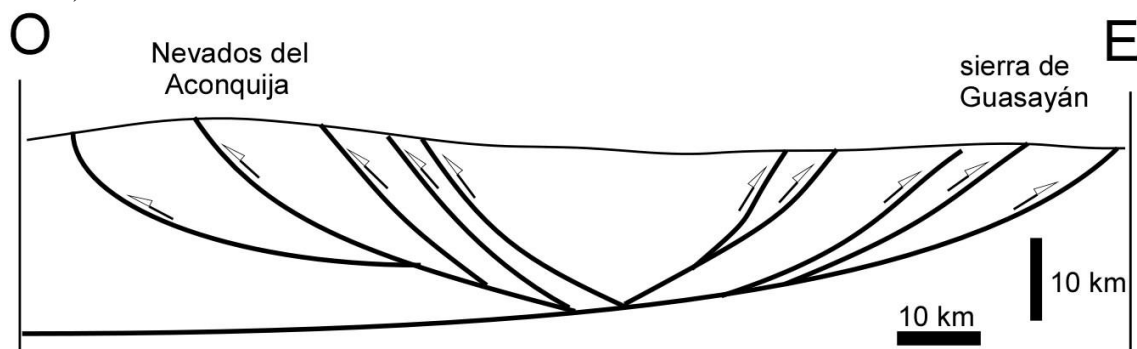


Figura 4.1 Corte estructural a la latitud 27°50'S mostrando la doble vergencia del fallamiento (tomado de Drozdewski y Mon, 1999).

En el sistema de esfuerzos tectónicos regionales actuales, las rocas de basamento que conforman la Puna, Cordillera Oriental y Sierras Pampeanas septentrionales, actúan como un bloque que empuja la cuña orogénica, donde se concentra el acortamiento estructural. De esto se podría inferir que las numerosas fallas que afectan el basamento son mayormente inactivas. La reseña sismológica en la siguiente sección muestra que esta inferencia es inapropiada.

5. Marco sísmológico regional

Discriminar la naturaleza regional de las fuentes sísmogénicas es relevante para el análisis específico del área de interés. En particular, este conocimiento es relevante para ajustar la selección de las relaciones de atenuación sísmica aplicables. El NOA está bajo la influencia sísmica directa e indirecta de la subducción de la placa de Nazca bajo el cratón Sudamericano. El movimiento relativo genera sismos en el interior de la placa, en la interfase placa-cratón y en la corteza por encima de la placa.

5.i Distribución espacial de sismos

En preparación para la determinación de los parámetros sísmicos, los catálogos fueron depurados de réplicas ('aftershocks') y de agrupamientos ('clusters') con Zmap, empleando el método Reasenberg. Del catálogo ANSS quedaron 909 eventos y del catálogo INPRES quedaron 4252 eventos.

Un histograma de distribución de profundidades revela una escasez relativa de sismos a profundidades de aproximadamente 60 km y 160 km (Figura 5.1). En base a este dato se construyó un mapa de sismicidad con los epicentros agrupados en tres intervalos de profundidad: 0-60 (someros), 60-140 (intermedios), y 140-627 km (profundos) (Figura 5.2).

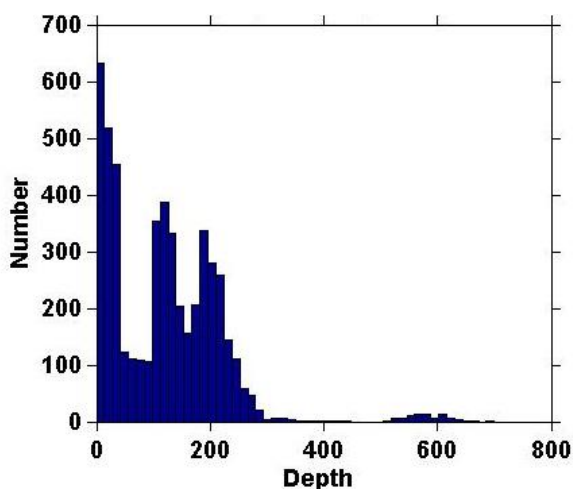


Figura 5.1 Histograma de número de sismos según profundidad del foco.

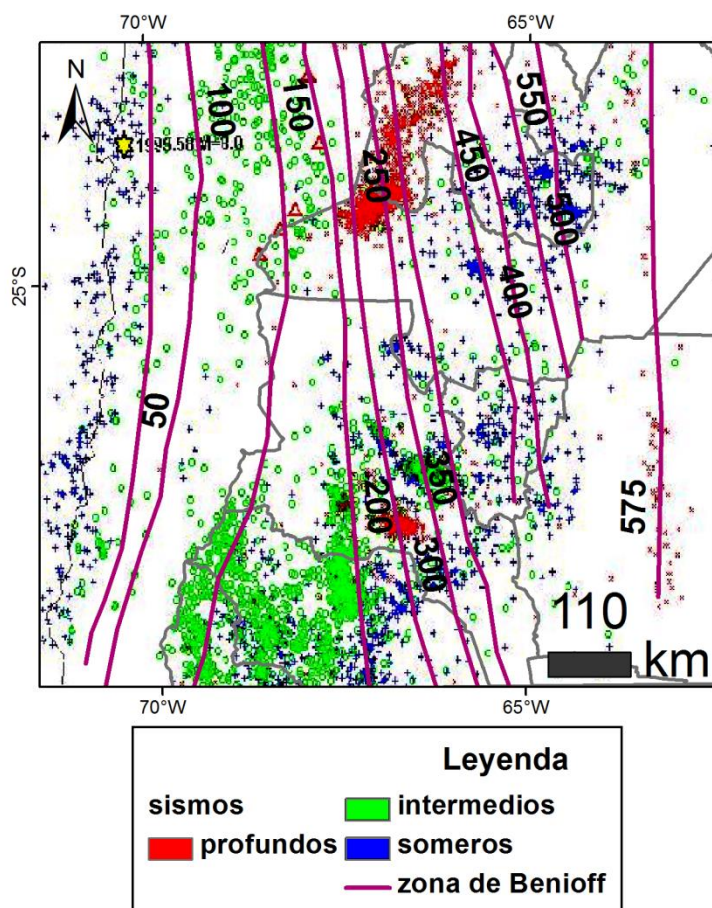


Figura 5.2 Distribución de epicentros sísmicos en el NOA, discriminados por profundidad de los focos. Las isobatas dan la profundidad al techo de la placa de Nazca.

Combinando ambos catálogos se obtuvo el mapa de sismicidad de la Figura 5.2. Se aprecia que los sismos con focos someros (en azul) ocurren al oeste, sobre el océano Pacífico, y también en la región central. Los de profundidad intermedia (en verde) ocupan la región central, y los más profundos (en rojo) están al este (Figura 5.2). Para analizar la distribución tridimensional de los focos se hicieron dos cortes ONO-ESE (Figura 5.3). Ambos cortes muestran dos zonas sismogénicas principales (Figuras 5.4 y 5.5). Una asociada con la subducción de la placa Nazca, que se profundiza hacia el este. La otra zona de sismicidad se da a profundidades menores de 60 km, aproximadamente, y abarca las provincias Cordillera Oriental y Sierras Subandinas. Los focos a profundidades someras (<60 km) arrojan un promedio de profundidad de 23 km. Este dato será útil al discutir la profundidad de la zona sismogénica en la corteza. La profundidad al techo de la placa de Nazca, o zona de Benioff, es de alrededor de 350 km bajo el límite Tucumán-Catamarca (Figura 5.2).

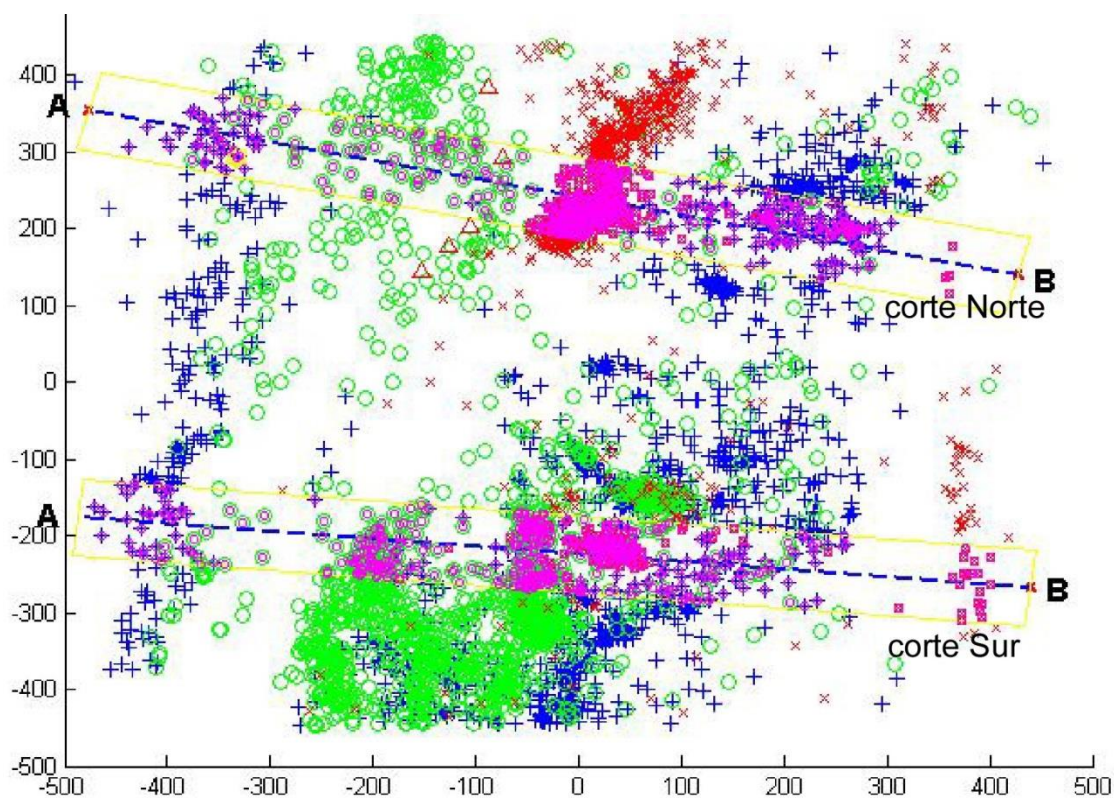


Figura 5.3. Mapa de sismicidad con ubicación de los cortes en las figuras 5.4 y 5.5.

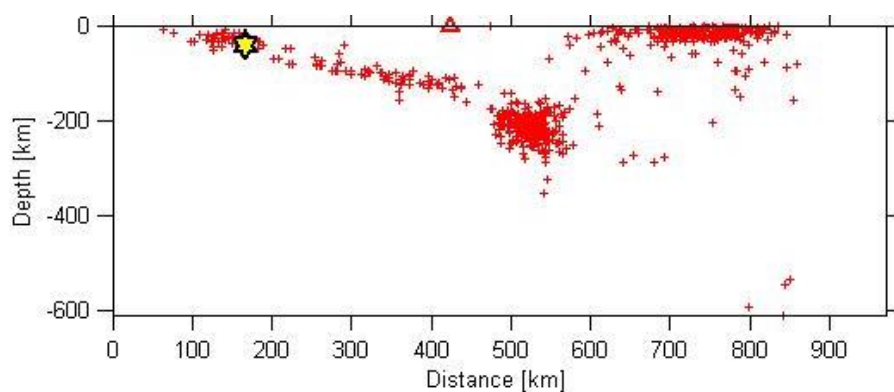


Figura 5.4. Corte Norte en la Figura 5.3.

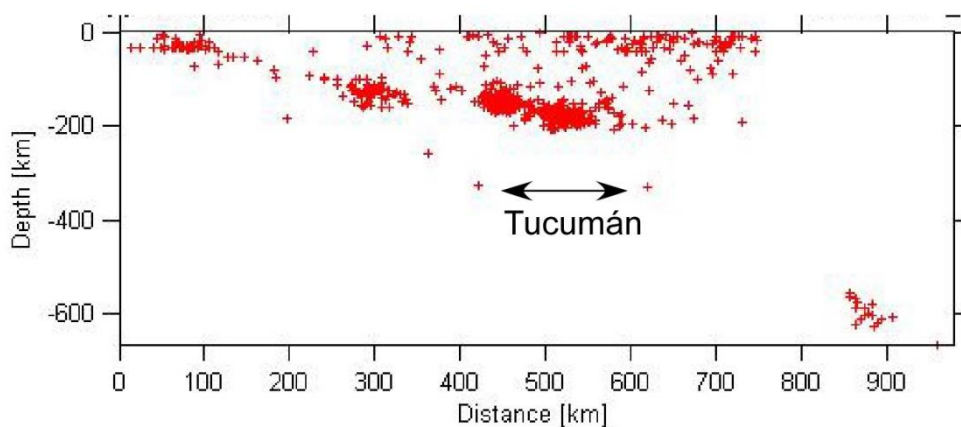


Figura 5.5. Corte Sur en la Figura 5.3. Se indica el sector que subyace a la provincia de Tucumán.

5.ii Deformación en el basamento de Sierras Pampeanas

La evolución del orógeno Andino permite inferir que el basamento de Sierras Pampeanas constituye un bloque rígido, que mayormente actúa como transmisor de esfuerzos hacia la cuña orogénica al este, y con débil actividad sísmica intrínseca.

La distribución de magnitudes de los sismos someros (<60 km de profundidad) registradas instrumentalmente no corrobora esta inferencia. Sismos con magnitudes instrumentales de hasta $M=6,1$ han ocurrido en Sierras Pampeanas, y sismos históricos han dado intensidades de hasta VIII, con magnitudes estimadas en $M>5$ (Figura 5.6 y Tabla 5.1). La deformación activa en el basamento tiene carácter regional. Richardson et al. (2012) documentaron con registros sísmicos instrumentales una deformación compresiva activa en las Sierras Pampeanas orientales de Cuyo. En conclusión, no se aprecia una debilidad sísmica en Sierras Pampeanas, y las fallas que han sido reconocidas en ella deben tomarse seriamente en cuenta como potencialmente activas.

Tabla 5.1 Sismos históricos en el ADI

Fecha	Intensidad	Magnitud estimada
19/I/1826	IX	5,9
5/II/1898	IX	5,9
17/XI/1906	VIII	5,5
11/VIII/1907	VII	VII
6/XI/1913	VII	5
12/II/1933	VI	5,5

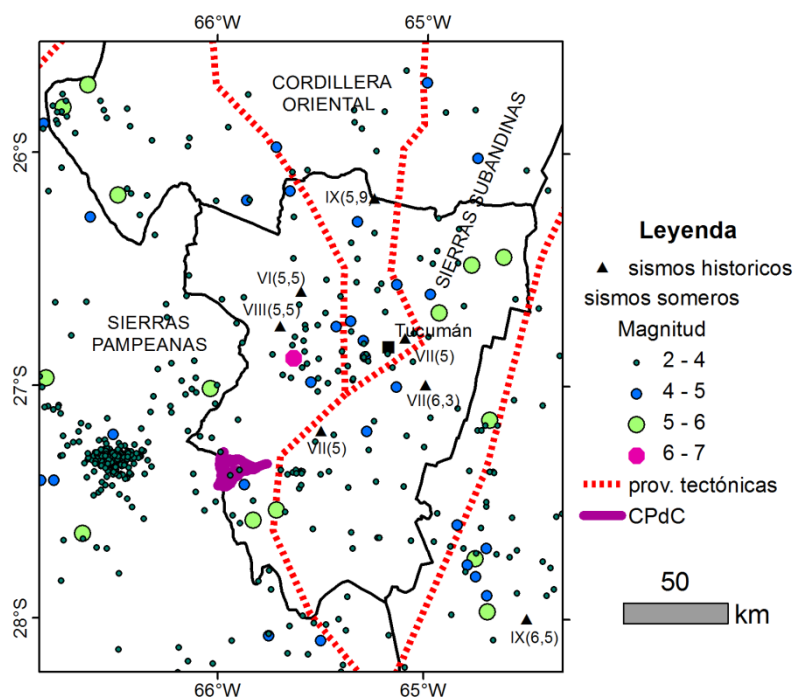


Figura 5.6 Distribución de los sismos someros según la magnitud en la región que rodea el Complejo Hidroeléctrico Potrero del Clavillo (CPdC). El sismo de mayor magnitud instrumentalmente medida se da en Sierras Pampeanas, con $M=6,1$. Para algunos sismos históricos se indica la intensidad en la escala de Mercalli Modificada y una estimación de la magnitud (tomado del INPRES).

6 Parámetros sísmicos regionales

El catálogo sísmico depurado fue analizado con los programas Zmap (Wiemer, 2001) y Mmax (Kijko y Singh, 2011) con el fin de determinar los valores de los parámetros sísmicos necesarios para las modelizaciones determinística y probabilística.

El paso siguiente a la depuración de los catálogos fue eliminar del análisis la porción del registro instrumental deficiente en datos para aproximar la completitud ('completeness'). La curva acumulativa de distribución de sismos en función del tiempo muestra un marcado quiebre en 2011,4 (Figura 6.1; aproximadamente abril 2011). El quiebre indica que el catálogo está incompleto para el período anterior a 2011,4. Se eliminó de toda consideración el tramo incompleto.

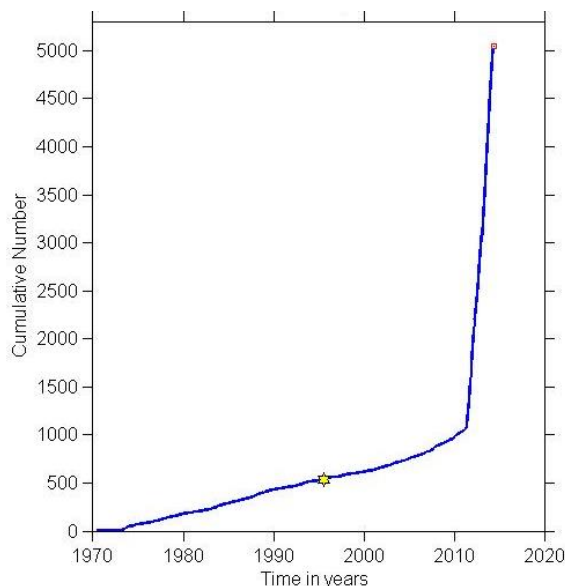


Figura 6.1 Distribución temporal de sismos. El catálogo compuesto (ANSS más INPRES) muestra deficiencias de registros antes de abril 2011, aproximadamente.

Sobre el tramo completo se calcularon los coeficientes de la distribución Gutenberg-Richter, distinguiendo las poblaciones de focos Profundos orientales, aislados en una faja sobre el borde oriental del NOA, los focos atribuibles a sismos de intraplaca o interplaca, es decir, directamente asociados a deformación en la placa de Nazca, pero excluyendo los Profundos orientales, y los focos Someros centrales, separables claramente de los focos someros occidentales que marginan la costa de Chile sobre el océano Pacífico (Tabla 6.1).

Tabla 6.1 Parámetros sísmicos regionales

Zona sísmica	N	b	desv. est. b	β	c.v. β	a	λ_M	Mmax-obs	Mmax
Profundos orientales	66	0,67	0,08	1,54	0,12	3,8	40	7,3	7,4
Intraplaca	672	1,21	0,05	2,8	0,04	7,6	89	8,0	8,2
Someros centrales	46	0,7	0,03	2,8	0,15	4,5	3,1	6,3	6,4

En la Tabla 6.1, a y b son los parámetros de la relación Gutenberg-Richter; $\beta = b \cdot \ln(10)$; c.v. $\beta = 1/(N-1)^{0.5}$ es el coeficiente de variación de β ; Mmax-obs corresponde a la magnitud máxima registrada instrumentalmente; y Mmax es el valor de

magnitud máxima obtenido aplicando el programa Mmax. λ_M es el valor de la actividad media para $M \geq 5,0$.

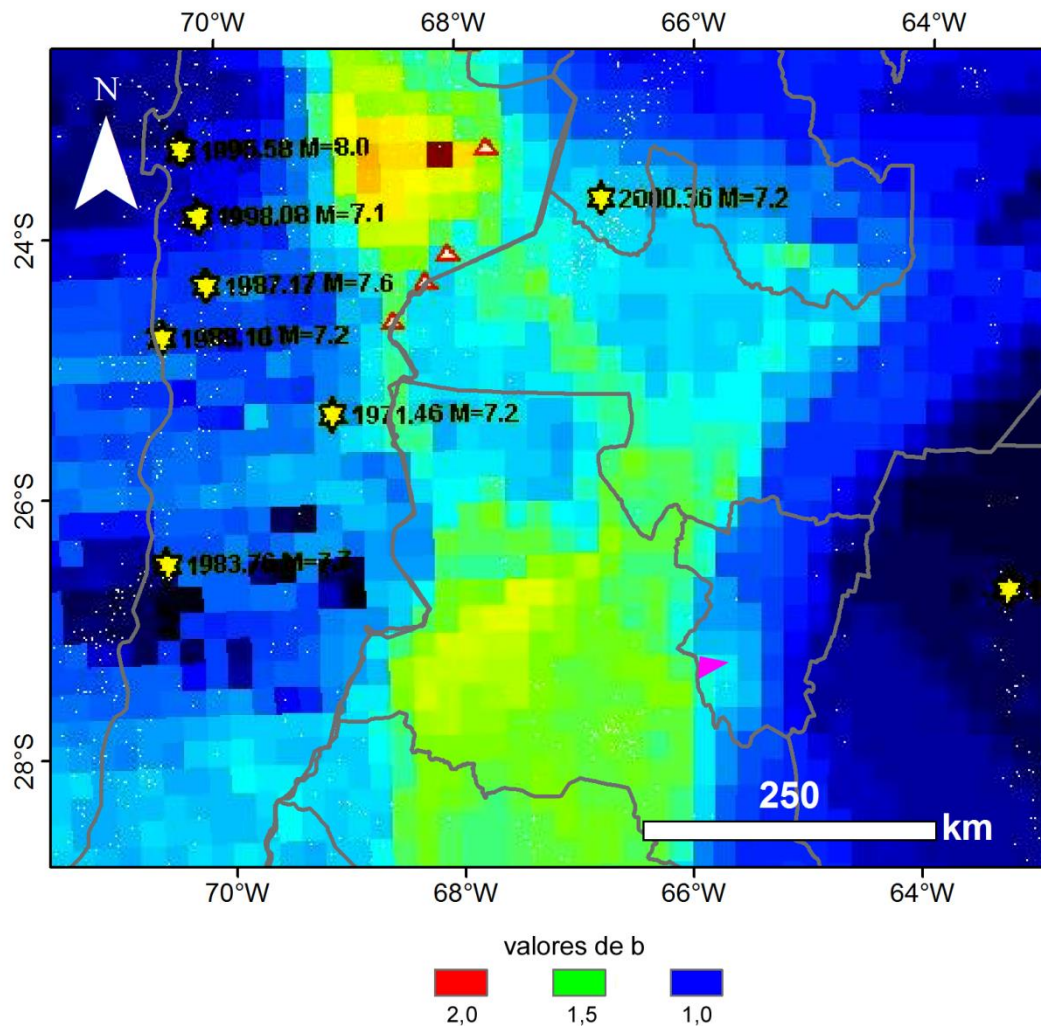


Figura 6.2 Distribución regional de valores del parámetro b de Gutenberg-Richter. El triángulo lila indica la futura posición del Complejo Hidroeléctrico Potrero del Clavillo.

Si bien a escala global el valor de b se aproxima a $b=1$, se dan variaciones temporales y espaciales. La Figura 6.2 muestra la variación en b considerando la totalidad de los sismos en los catálogos depurados. Se aprecia una zona de valores elevados ($b \geq 1,5$) centrada en la provincia de Catamarca. Valores de b elevados suelen estar asociados con corteza caliente o bolsones de magma en la corteza (Jacobs y McNutt, 2010).

PARTE III

ANÁLISIS SISMOLÓGICO-ESTRUCTURAL EN EL AREA DE INTERÉS (ADI)

El área de interés (ADI), desde el punto de vista del riesgo sísmico para el Complejo Potrero del Clavillo, se definió como aquella comprendida por una circunferencia de 150 km de radio, con centro en la futura presa. El texto que sigue se enfoca sobre el ADI, empleando como apoyo para las inferencias las conclusiones del análisis regional. El análisis sismológico-estructural en el ADI tiene tres propósitos: (a) identificar fallas probablemente activas, (b) establecer una zonificación sísmica y (c) determinar los parámetros sísmicos requeridos para la modelización

7. Fallas probablemente activas ('capable faults')

La clasificación como falla activa, estrictamente, se reserva para aquellas fallas que han tenido movimiento demostrable en el Holoceno (Glosario, U.S. Geological Survey, <http://earthquake.usgs.gov/learn/glossary/?term=active%20fault>). En el análisis del riesgo sísmico, sin embargo, esta limitación temporal suele relajarse en función de la relevancia socio-económica de la estructura. Para este estudio se adoptó la posición conservadora de suponer falla activa cualquiera que haya tenido actividad en el Cuaternario. Para este informe, falla activa es equivalente a 'capable fault', es decir, que tiene probabilidad de romper en superficie durante la vida útil de la estructura ingenieril (Galadini et al., 2012).

Para el análisis inicial se tomaron en cuenta todas las fallas parcial o totalmente comprendidas en el ADI, en superficie y en subsuelo, inventariadas en la literatura especializada. Así se incluyó un total de 65 fallas: 54 inversas, 8 normales, y 3 sin sentido de rechazo definido (Figura 7.1). Varias de estas fallas, particularmente las de rechazo inverso, podrían corresponder a segmentos de falla y actuar conjuntamente en caso de ruptura. Este podría ser el caso de la falla Guasayán. Dos lineamientos estructurales, identificados como probables zonas de fallamiento por varios autores (Mon, Abascal), intersectan el ADI. No obstante, debido a la falta de precisión acerca de la naturaleza de las estructuras y la ausencia de evidencia de actividad sísmica reciente asociada a ellos, no fueron tomados en cuenta para el cálculo de la amenaza.

Las fallas inversas muestran doble vergencia. Las que ocupan la mitad oriental del ADI mayormente inclinan al oeste, o sea tienen vergencia oriental, mientras que en las fallas occidentales predomina vergencia occidental (Figuras 4.1 y 7.1). El emplazamiento del Complejo se encuentra en la zona de divergencia. En la mayor parte de las fallas, tanto inversas como normales, se desconoce el ángulo de inclinación del plano de fractura. Ninguna de estas fallas tiene información sobre el comportamiento sísmico: período de recurrencia de la actividad, largo y ancho de ruptura, o tasa de rechazo ('slip rate').

El Dr. Carlos Costa (UNSL) compiló información sobre fallas con probable actividad en el Cuaternario (aproximadamente dentro de los últimos 1,6 m.a.; Map of Quaternary faults and folds of Argentina, 2000). Las fallas denominadas en ese trabajo AR-02 Aconquija, AR-09 Infiernillo y AR-83 La Angostura, caen en el ADI. Perucca (2008) presentó una revisión de la actividad neotectónica en los alrededores del embalse de Río Hondo. Analizó en particular 11 fallas: Tafí del Valle, Infiernillo, La Angostura, Aconquija, Pipanaco, Paclín, Ambato, Chumbicha, Ancastí, Guasayán y Rosario (ver también Vega Caro, 1999). Nueve de estas fallas están comprendidas en el ADI, sólo las de Rosario y Chumbicha caen fuera de ella. Perucca (2008) infiere que las fallas Paclín,

Ambato, Aconquija y Guasayán, han tenido actividad en el Holoceno. Las fallas Paclín y Ambato presentan evidencias directas de actividad reciente a juzgar por escarpas que afectan depósitos del Holoceno (Eremchuk y Papetti, 1999; Eremchuk et al., 1981). Para la falla Aconquija se postula actividad reciente en base a deslizamientos de rocas ocurridos en el Holoceno (Fauqué y Strecker, 1987). La actividad reciente en la falla Guasayán se infiere de la sismicidad asociada (Perucca, 2008).

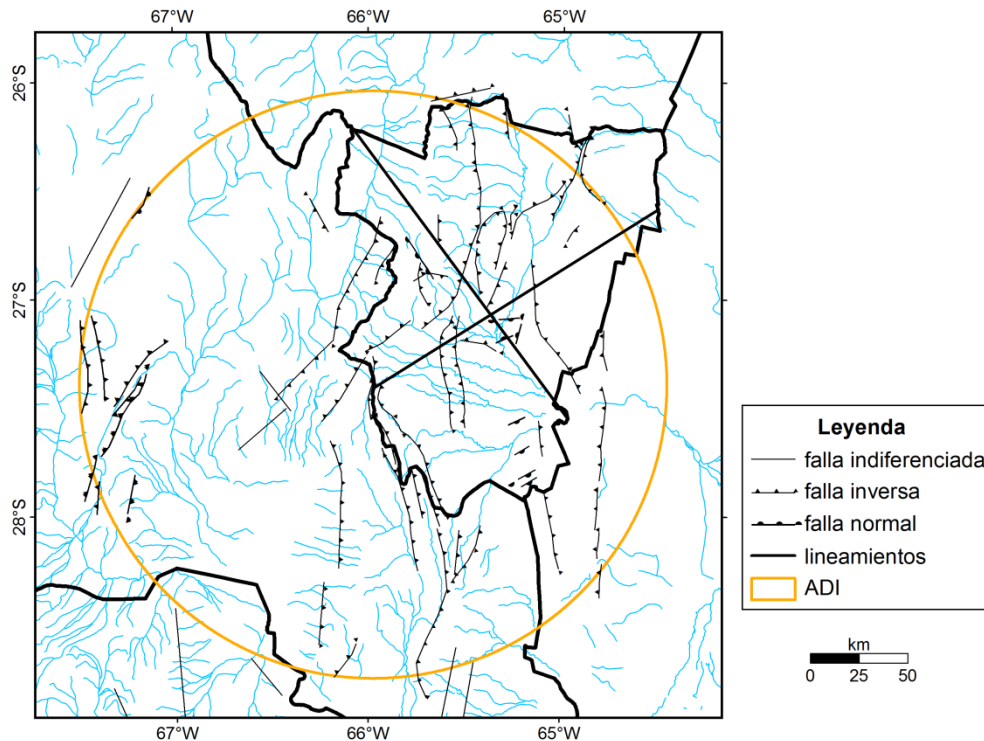


Figura 7.1 Principales fallas y lineamientos consideradas para evaluar la sismicidad en el ADI. La circunferencia tiene un radio de 150 km y centro en el futuro sitio de la presa.

7.i Correlación epicentros-fallas

Ante la ausencia general de información directa de actividad reciente en la mayoría de las fallas en el ADI, se recurrió a la correlación de epicentros con las trazas de las fallas en superficie para determinar cuáles podrían clasificar como ‘activas’. Sólo se tomaron en cuenta para la correlación los epicentros de sismos someros, es decir aquellos que pueden razonablemente atribuirse a actividad tectónica en la faja plegada y corrida. En ArcGIS se superpusieron las capas de epicentros y de fallas. Alrededor de cada falla se dibujó una zona de entorno (‘buffer’) de 20 km (Figura 7.2). El ancho del entorno toma en cuenta el posible error en la ubicación de los epicentros y el desfase entre foco y epicentro consecuencia de la inclinación del plano de falla. Se consideró que un epicentro es asignable a una determinada falla si el epicentro cae sobre la traza de la falla, o muy cerca de ella, y si 2 o más epicentros ocurren alineados con rumbo paralelo a la falla a menos de 20 km de la traza. En tales casos se supuso que esa falla es activa en sentido estricto (actividad en los últimos 10 mil años) y también capaz (‘capable’), por haber roto la superficie.

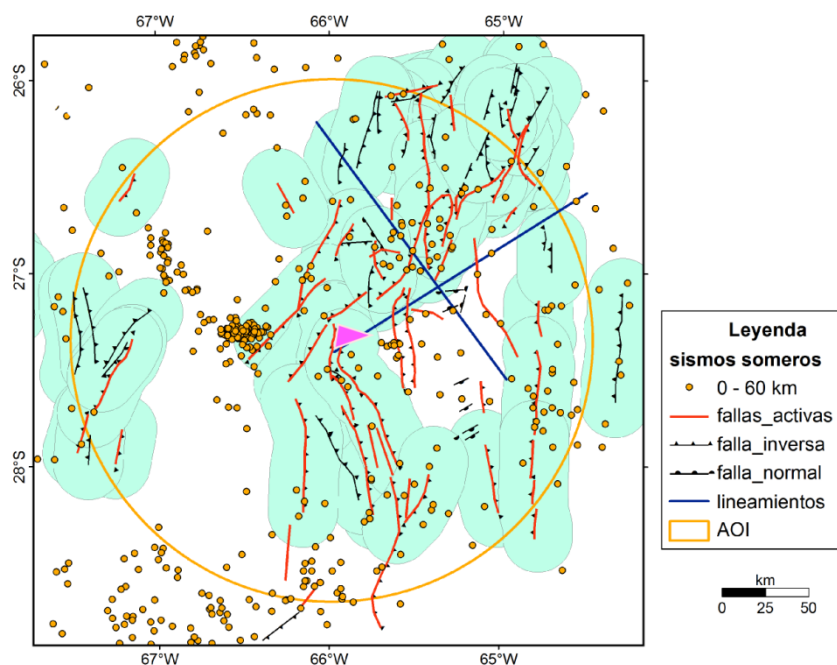


Figura 7.2 Fallas y epicentros en el ADI. Las zonas celestes rodean las fallas con radio de 20 km. El triángulo lila indica la posición del futuro Complejo Hidroeléctrico Potrero del Clavillo.

Mediante esta correlación se identificaron alrededor de 38 fallas probablemente activas en el área de interés, casi todas de rechazo inverso y la mayor parte de ellas concentradas en el sector central y oriental del ADI (Figura 7.2).

Complementando esta correlación, se determinó la densidad de agrupamiento de los epicentros de los sismos someros (Figura 7.3). Se aprecia que cinco polos de agrupamiento caen dentro del ADI, y que uno de ellos roza el sitio de la futura presa. La concentración de epicentros es evidencia de inestabilidad cortical en sitios próximos a la futura presa.

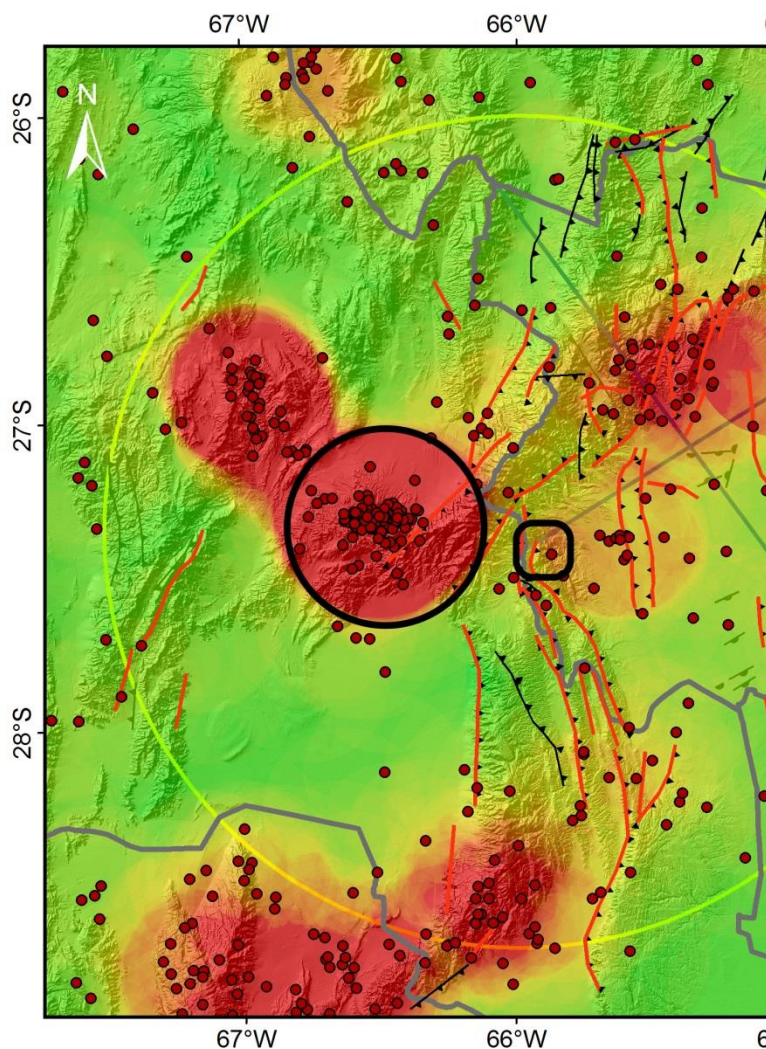


Figura 7.3. Densidad de epicentros de sismos someros (profundidad < 60 km). Un agrupamiento (resaltado por la circunferencia en negro) se encuentra muy cerca del futuro sitio del Complejo Potrero del Clavillo (indicado por el recuadro en negro).

Tabla 7.1. Magnitudes estimadas para las fallas inversas en el ADI empleando la fórmula en Wells y Coppersmith (1994). El asterisco denota las fallas incluidas en la modelización determinística, y el número refiere a la numeración dada en la Figura 9.1. LFS – Largo de la Falla en Superficie; ID – código interno de identificación

ID	LFS (m)	Magnitud	ID	LFS (m)	Magnitud
11	19067	6,6	42* ⁹	91741	7,4
13	25291	6,7	43	23076	6,7
14	28714	6,8	44* ²	39959	7,0
16	20907	6,6	45	31330	6,8
23	23513	6,7	46	20762	6,6
24	30859	6,8	47* ¹	70000	7,3
27	49022	7,1	48	13791	6,4
28	27969	6,8	50	39899	7,0
29	75329	7,3	51	23345	6,7
30	25226	6,7	52	37310	6,9
31* ⁶	58124	7,2	53* ³	32942	6,9
32* ⁵	60370	7,2	54	31775	6,8
33	29861	6,8	55	40118	7,0
35	42721	7,0	56	75000	7,3
36	10474	6,2	57	80000	7,3
37* ⁷	32000	6,8	58	18744	6,6
38* ⁸	51000	7,1	59	23369	6,7
39* ⁴	80343	7,3	60	49083	7,1
40	18308	6,5	61	20436	6,6
41	21434	6,6	62	66308	7,2

7.i Potencial sismogénico de las fallas en el ADI

Las fallas incluidas en el ADI carecen de una historia sísmica, o paleosísmica, que permita estimar las magnitudes de los terremotos que han generado. La correlación con los epicentros instrumentales sólo permite atribuir a esas fallas magnitudes muy bajas, seguramente muy inferiores a las potenciales. Por otra parte, la magnitud máxima observada entre los sismos históricos, estimada por el INPRES de una estimación de la intensidad, es $M=6,3$ (3/IV/1931, intensidad MMI=VII).

En vista de esta deficiencia, se optó por estimar la magnitud máxima probable en base a consideraciones geológicas. El cómputo empleó la ecuación en Wells y Coppersmith (1994) para fallas inversas: $M=5,16+1,12*\log(LFS)$, donde LFS es largo de la falla en superficie. Para este estudio se adoptó una posición conservadora, tomando LFS como igual al largo L de la zona de ruptura. La falla más larga mide 92 km Tabla 8.1, ID 42 (Figura 9.1, falla 9), una longitud aceptable para postular ruptura total. Además, esta falla, que da una magnitud $M=7,4$ es una falla inversa con curvatura en planta que sugiere una rampa de cabalgamiento, geometría que favorecería un rechazo en todo el largo. Las magnitudes calculadas se dan en la Tabla 7.1. Una comparación de estas magnitudes con las calculadas aplicando la relación entre

magnitud y largo de ruptura en Stirling et al. (2002) dio resultados que no difieren en más de un 10%.

Dada la relevancia de la magnitud en el cálculo del riesgo sísmico, es conveniente justificar el procedimiento empleado en este estudio para estimar las magnitudes que podrían generar las fallas relevadas. Bonilla et al. (1984) analizaron las relaciones entre magnitud sísmica y características de las fallas asociadas y arribaron a varias conclusiones relevantes para este estudio. Primero, concluyeron que la longitud de la ruptura en subsuelo está aproximadamente bien representada por la ruptura en superficie. Segundo, puntualizan que una estimación de M basado en una regresión sobre LFS, no da el valor máximo de M si no el valor de M que es esperable que sea excedido en el 50% de los sismos con igual LFS. Tercero, sostuvieron que mientras el ancho de la zona de ruptura, medido en el sentido de la pendiente del plano de falla, no supere unos 20 km, la magnitud está igualmente bien representada por el largo de ruptura que utilizando el área de ruptura, más difícil de obtener.

8. Selección de ecuaciones de predicción de movimiento del suelo ('Ground Motion Prediction Equations')

Allen y Wald (2009) publicaron una revisión crítica de los modelos de predicción de movimiento de suelo por efecto sísmico. Concluyeron que la influencia de las variaciones en la composición del sustrato en el modelado de la atenuación sísmica es moderada, y que para distancias epicentrales inferiores a unos 100 km es preferible emplear una relación bien documentada y basada en una base de datos completa, aun cuando ésta no incluya la región de interés, antes que elegir una base con datos locales escasos e imprecisos. Kaklamanos et al. (2011) y Ambraseys et al. (2005) llegaron a una conclusión similar.

La práctica moderna discrimina tres ambientes sismotectónicos: continental estable, subducción y corteza somera tectónicamente activa. La región de Potrero del Clavillo es tectónicamente activa, con sismos corticales y someros; la influencia de la sismicidad de la placa Nazca es indirecta. Los sismos originados en la placa de Nazca tienen focos a profundidades de varios cientos de kilómetros bajo el ADI, por lo cual no son tenidos en cuenta en el análisis que sigue (ver Figura 5.1).

Para el ambiente cortical tectónicamente activo se recomiendan las siguientes relaciones: Abrahamson y Silva (2008), Boore y Atkinson (2008), Campbell y Bozorgnia (2008), Chiou y Youngs (2008). Estas cuatro relaciones emplean como base de datos el catálogo compilado por el proyecto Pacific Earthquake Engineering Research (PEER) Center's Next Generation Attenuation (NGA), con más de 3500 registros instrumentales de sismos someros corticales en regiones tectónicamente activas. Estos cuatro modelos tienen óptima validez a distancias epicentrales menores de 200 km y magnitudes entre 5 y 8, y permiten calcular la AMT y aceleraciones espectrales para períodos entre 0 y 10 segundos.

8.i Definición de parámetros

Las relaciones de atenuación NGA describen mejor muchas situaciones pero a costa de un número mayor de parámetros. En regiones donde el conocimiento acerca de la geometría y el comportamiento de las fallas es limitado, suele no ser sencillo dar valores reales a esos parámetros. Una alternativa es ignorar las ecuaciones NGA y recurrir a aquellas anteriores a 2008, más sencillas y con menos requerimientos de datos. La otra alternativa es aprovechar la optimización de las ecuaciones NGA y estimar valores para aquellos parámetros para los que no se tienen valores reales. La segunda alternativa es preferible. Kaklamanos et al. (2011) y Caltrans (2012)

presentaron modos de computar muchos de los parámetros necesarios, a partir de ciertas mediciones básicas, como magnitud, tipo de falla y posición del sitio respecto de la falla. A continuación se describen escuetamente los procedimientos que se emplean en este estudio para estimar valores de los parámetros necesarios. Se hace notar que en este estudio el largo de la zona de ruptura, L , es igual al largo de la falla en superficie.

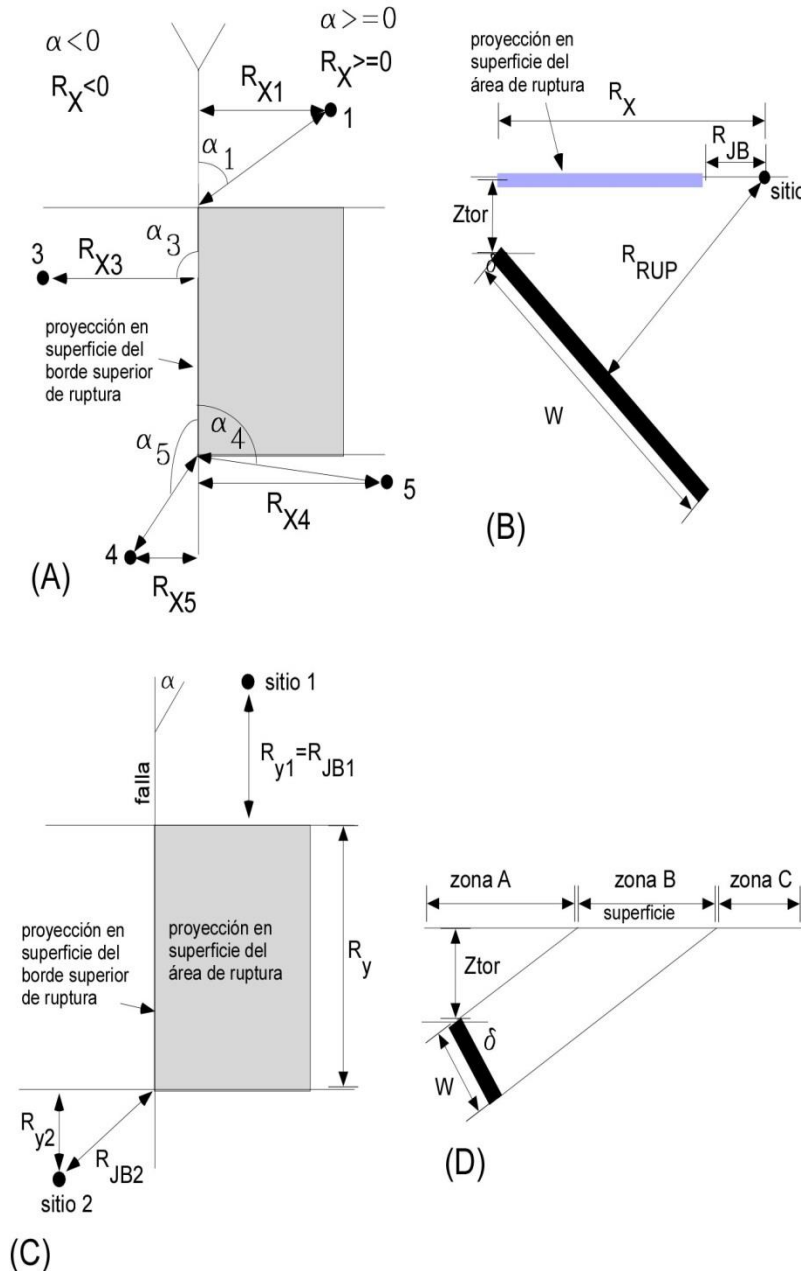


Figura 8.1 Guía para la definición de los parámetros empleados por las ecuaciones de movimiento de terreno. (A) Sección en planta de una falla proyectada en superficie. Se define el azimuth fuente-sitio, α , y las diversas distancias R_X . R_X y α son negativas en el bloque bajo y positivas en el bloque colgante de la falla. (B) Sección perpendicular a una falla. Definición de las medidas de distancia fuente-sitio, R_{RUP} y R_{JB} . (C) Vista en planta de una falla proyectada en superficie para definir R_Y , empleado en el cálculo de R_{RUP} . Se dan ejemplos para dos sitios. (D) Corte vertical de una falla para ilustrar las tres posibles posiciones de un sitio respecto del plano de ruptura.

Los ángulos de inclinación de los planos de falla se desconocen, excepto para la falla Ambato (Perucca, 2008); se adoptó la recomendación en Kaklamano et al. (2011) de aproximarlos como $43,5^\circ$. El ancho del plano de ruptura, W , se estimó con:

$W=10^{-1,61+0,41M}$, relación derivada por regresión estadística para fallas inversas (Wells y Coppersmith, 1994; Papazachos et al., 2004); la profundidad al tope del plano de fractura, Z_{TOPE} , se estimó con:

$Z_{TOPE}=\max[(Z_{HIP}-0,6W \text{ sen } \delta),0]$, donde δ es la inclinación del plano de falla y Z_{HIP} se estimó con: $Z_{HIP}=11,24-0,2M$ (Kaklamanos et al., 2011; ver discusión de la profundidad sismogénica más abajo). La distancia Joyner-Boore, R_{JB} , da la distancia mínima entre el sitio y el borde del plano de ruptura proyectado en superficie. Cuando el sitio está ubicado sobre la proyección del plano de ruptura en superficie, $R_{JB}=0$. R_{JB} es un parámetro importante que se obtuvo por relaciones trigonométricas. La distancia entre el sitio y el plano de ruptura en profundidad, R_{RUP} , se calculó siguiendo los procedimientos expuestos en Kaklamanos et al. (2011) y Caltrans (2012). La hoja de cálculo en Excel empleada en los cálculos de parámetros está a disposición del auditor.

8.ii Profundidad sismogénica

Los valores del ancho de la zona de ruptura, W , y Z_{HIP} , la profundidad al hipocentro, se escalan con el espesor sismogénico de la corteza. Por este motivo es importante definir lo mejor posible este espesor en el ADI.

El espesor de la corteza susceptible de generar sismos está limitado por la profundidad del pasaje de condición frágil a dúctil, lo cual ocurre a la profundidad de la isoterma de 350°, aproximadamente (Watts y Burov, 2003). En varias regiones del globo, el espesor de la zona sismogénica raramente excede de 20 km; sismos corticales más profundos pueden ocurrir pero suelen ser más débiles (Watts y Burov, 2003). En California, las fallas suelen estar selladas a profundidades entre 6 y 22 km (Smith-Konter et al., 2011). Brooks et al. (2011) relevaron una transecta geofísica a través del retroarco de los Andes por el paralelo de 22°S. La transecta revela que la mayor parte de las fallas en la cuña orogénica están selladas a una profundidad de 10 km, aproximadamente. En las Sierras Pampeanas de San Juan (sierra Pie de Palo) la sismicidad somera tiene focos entre 0 y 30 km de profundidad, aproximadamente, con promedio alrededor de 20 km (Regnier et al., 1994). Los focos de los sismos someros en el ADI dan un promedio de profundidad de 23 km. Teniendo en cuenta la incertidumbre en el posicionamiento vertical de los focos, este resultado apoya la noción de una corteza superior sismogénica de unos 20 km de espesor en el ADI.

Del catálogo del INPRES se compilaron profundidades de sismos menores a 50 km ocurridos en 2013 y 2014 en el ADI. Se eligieron sismos recientes y revisados por un sismólogo para asegurar la mejor calidad posible del valor de profundidad. El promedio dio cercano a 20 km, similar al promedio de todos los sismos someros. Para la evaluación de la amenaza sísmica, este estudio presenta valores de aceleración para dos profundidades hipocentrales: 10 km y 20 km. El valor menor surge de ecuaciones calibradas para sismos en California, principalmente. Más abajo se discute la validez de estas dos opciones de profundidad hipocentral.

PARTE IV

MODELIZACIÓN DE LA AMENAZA SÍSMICA EN EL ADI

La modelización de la amenaza sísmica para Potrero del Clavillo se realizó según dos procedimientos: determinístico y probabilístico. El modelo determinístico se basó en la evaluación del potencial sismogénico de fallas expuestas en superficie, clasificadas como activas en este estudio por correlación con epicentros instrumentales. Numerosos epicentros, sin embargo, no pudieron correlacionarse con fallas; estos probablemente están relacionados con fallas ciegas, es decir, cuyos planos no intersectan la superficie. El efecto de estas fallas ciegas ha sido incorporado en el análisis probabilístico.

9. Modelización determinística

La modelización determinística permite cuantificar el máximo grado de amenaza en el sitio del Complejo y discriminar las principales estructuras de control del movimiento del suelo.

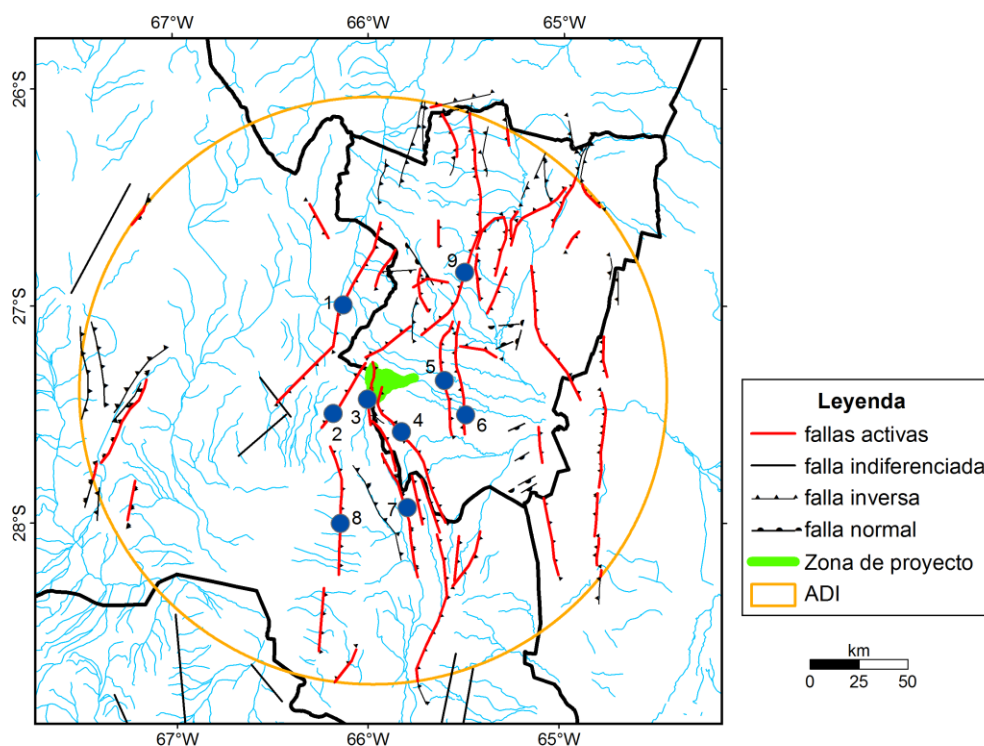


Figura 9.1 Fuentes sismogénicas en el ADI. El triángulo verde indica el área que abarcarán las obras del complejo Potrero del Clavillo. Las fallas indicadas con puntos celestes y numeradas 1 a 9, fueron seleccionadas para la modelización determinística.

9.i Preselección de fallas

Para el análisis determinístico se hizo una preselección de 9 fallas inversas, clasificadas previamente como activas (Figura 9.1). Las fallas se seleccionaron tomando en cuenta la proximidad a la zona de proyecto hidroeléctrico y la magnitud estimada del

sismo que la falla podría generar. La Tabla 9.1 da las características de estas fallas pertinentes para el análisis. La única información sismotectónica relevante referida a estas fallas es el potencial sismogénico calculado previamente, el largo de la traza en superficie, y la distancia horizontal que separa la traza del sitio de interés. Se puede determinar, además, si el sitio de interés se ubica sobre el bloque colgante o sobre el bloque yacente. Las restantes variables requeridas por las ecuaciones de movimiento del suelo deben ser estimadas por cálculo, siguiendo los procedimientos detallados arriba.

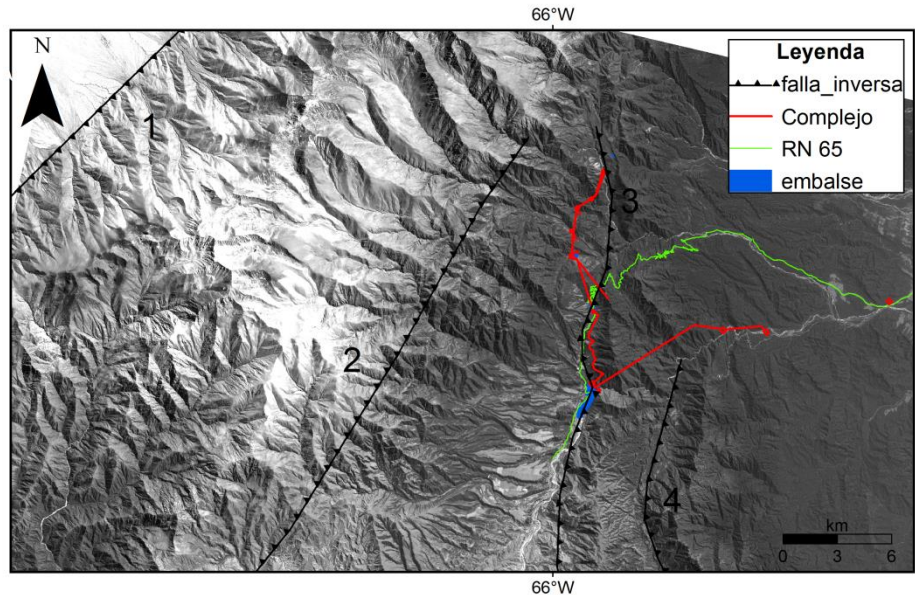


Figura 9.2 Fallas dominantes en relación con el Complejo Potrero del Clavillo. La numeración corresponde con la de la Figura 9.1.

Tabla 9.1 Propiedades de las fuentes sismogénicas consideradas

Falla	ID	Mmax	Buzamiento (°)	Largo (km)	W (km)	distX (km)	Nombre
1	57	7,3	43,5	70*	24,2	30	Aconquija
2	51	6,9	43,5	40	16,6	10	s/n
3	63	6,9	43,5	33	15,1	0	s/n
4	46	7,3	43,5	80	24,2	5	s/n
5	38	7,2	43,5	60	22	36	s/n
6	37	7,2	43,5	58	22	44	s/n
7	43	6,8	55,0*	32*	15,1	10	Ambato
8	45	7,1	43,5	51*	20	32	Pipanaco
9	49	7,4	43,5	92	27	10	s/n

s/n – sin nombre; Mmax – magnitud máxima calculada

*Datos tomados de Perucca (2008)

Tabla 9.2 Relaciones fuente-sitio

Falla	Z _{HIP} (km)	Z _{tope} (km)	R _y (km)	R _x (km)	R _{RUP} (km)	R _{JB} (km)	Posición
1	10	0,0	0	30	20,7	12,5	HW
2	10	3,2	0	13,3	13,7	13,3	FW
3	10	3,8	0	4	5,5	4	HW
4	10	0,0	0	5	5	5	FW

5	10	0,9	0	37	37	37	FW
6	10	0,9	0	43	31,5	27,1	HW
7	10	2,6	33	8,2	36,0	33	HW
8	10	1,6	18	28,8	29,3	24,6	HW
9	10	0,0	35	13,2	37,5	37,4	FW

FW – bloque yacente; HW- bloque colgante.

Tabla 9.3 Alternativa usando $Z_{hip}=20$ km (ver justificación en el texto)

Falla	Z_{HIP} (km)	Z_{tope} (km)	R_y (km)	R_x (km)	R_{RUP} (km)	R_{JB} (km)	Posición
1	20	9,8	0	19,6	20,7	2,1	HW
2	20	13,1	0	23,8	27,2	23,8	FW
3	20	13,8	0	14,5	20	14,5	HW
4	20	9,8	0	15,4	18,2	15,4	FW

La falla 3 podría coincidir con el escalón en el basamento detectado por geofísica (AyE, 1973, Lámina 21, Perfil longitudinal nº 4). Este escalón representa un rechazo de aproximadamente 8 m, con ascenso del bloque oriental (Figura 9.2). Aplicando la relación en Wells y Coppersmith (1994) que relaciona rechazo con magnitud, se obtiene $M=6,9$. La magnitud estimada tomando como parámetro el largo de la falla dio $M=6,9$ (Tabla 9.1). La falla 4, a su vez, podría coincidir con la falla Beatriz, mapeada por Piseta et al. (1981).

9.ii Propiedades del sitio de la presa

A efectos de la modelización sísmica es necesario conocer la naturaleza del sustrato sobre el que se fundará la presa y las obras complementarias. En el área de la futura presa el tipo de sustrato predominante es roca. Dos conos coluviales cubren parcialmente las laderas con detrito grueso. El mayor, con una superficie de aproximadamente 12.000 m^2 , está aguas arriba y al sudoeste del sitio originalmente proyectado para el muro de la presa y el otro cono, con una superficie de aproximadamente 8.000 m^2 , está a unos 100 m al este del muro proyectado, según el plano de Turazzini (1971). En conclusión, excepto localmente, el sustrato aflorante es roca en toda la zona de proyecto. En el anteproyecto elaborado por Agua y Energía, el arco de la presa está proyectado sobre roca (AyE, 1973).

En la modelización, la clasificación del sustrato sigue las recomendaciones en Building Seismic Safety Council (2003), donde se establecen seis clases de suelo: A a F. El suelo de clase A corresponde a roca, con velocidad de corte en los 30 metros superiores $V_{30}=1500$ m/seg; este valor se adoptó para el modelado. Las ecuaciones de movimiento del terreno de Abrahamson y Silva (2008), Campbell y Bozorgnia (2008) y Chiou y Youngs (2008) requieren conocer la profundidad a la que se alcanza $V_s=1.000$ m/seg ($Z_{1,0}$) y 2.500 m/seg ($Z_{2,5}$). Los valores de estos parámetros se obtuvieron aplicando las ecuaciones recomendadas por los autores de los modelos, y se muestran en la Tabla 9.4.

Tabla 9.4 Propiedades del sitio

$Z_{1,0}$	V_{s30}	$Z_{2,5}$
(m)	(m/s)	(m)
1,6	1500	525

9.iii Modelo determinístico

Se llevó a cabo una modelización preliminar sobre las nueve fallas preseleccionadas, aplicando la relación de Abrahamson y Silva (2008; 'A&S'). En base a estos resultados se desecharon las fallas 5 a 9 por ser sus efectos muy débiles sobre el sitio de la futura presa: $AMT < 0,1$. Las fallas 1 a 4 fueron procesadas aplicando las relaciones de Boore y Atkinson (2008; 'B&A'), Campbell y Bozorgnia (2008; 'C&B') y Chiou y Youngs (2008; 'C&Y'), para tener un total de cuatro valores de AMT, $Sa_{0,2}$ y $Sa_{1,0}$. Los cálculos se hicieron en lenguaje MATLAB, con códigos obtenidos en: <http://web.stanford.edu/~bakerjw/GMPes.html>.

Los valores de aceleración obtenidos se dan en la Tabla 9.5. Los cálculos iniciales que permitieron descartar las fallas 5 a 9 se dan en las columnas encabezadas con A&S. Las demás columnas sólo presentan los resultados obtenidos para las fallas 1 a 4. Los valores resaltados por un grisado corresponden a las desviaciones estándar de las aceleraciones. Para cada período y para cada relación de atenuación se dan dos valores de aceleración. El superior se obtuvo empleando una profundidad hipocentral, Z_{HIP} , aproximadamente igual a 10 km. El otro valor de aceleración, indicado entre paréntesis, se obtuvo con una profundidad hipocentral $Z_{HIP} = 20$ km, que toma en consideración datos locales de profundidades focales.

Tabla 9.5 Valores de aceleración para $T=0, 0,2$ y $1,0$ segundos. Los valores grisados indican las desviaciones estándar de las aceleraciones. Entre paréntesis se dan valores de aceleración para $Z_{HIP}=20$ km.

Falla	AMT				Sa _{0,2}				Sa _{1,0}			
	A&S	B&A	C&B	C&Y	A&S	B&A	C&B	C&Y	A&S	B&A	C&B	C&Y
1	0,18 (0,55)	0,18 (0,28)	0,16 (0,22)	0,23 (0,42)	0,40 (1,26)	0,41 (0,71)	0,38 (0,52)	0,50 (0,88)	0,20 (0,39)	0,11 (0,18)	0,11 (0,14)	0,11 (0,18)
	0,56	0,57	0,53	0,53	0,61	0,60	0,59	0,61	0,65	0,65	0,62	0,65
2	0,25 (0,20)	0,16 (0,11)	0,23 (0,13)	0,23 (0,20)	0,56 (0,44)	0,38 (0,26)	0,56 (0,31)	0,47 (0,38)	0,21 (0,14)	0,09 (0,06)	0,12 (0,07)	0,12 (0,08)
	0,57	0,57	0,53	0,54	0,62	0,60	0,59	0,61	0,65	0,65	0,62	0,66
3	0,49 (0,30)	0,26 (0,14)	0,46 (0,17)	0,42 (0,27)	1,10 (0,67)	0,70 (0,36)	1,05 (0,41)	0,87 (0,50)	0,35 (0,20)	0,18 (0,09)	0,27 (0,10)	0,22 (0,11)
	0,57	0,57	0,53	0,55	0,63	0,60	0,59	0,62	0,65	0,65	0,62	0,66
4	0,43 (0,41)	0,26 (0,16)	0,34 (0,20)	0,41 (0,31)	0,97 (0,92)	0,67 (0,37)	0,76 (0,48)	0,88 (0,61)	0,41 (0,30)	0,17 (0,10)	0,16 (0,09)	0,25 (0,09)
	0,56	0,57	0,53	0,53	0,61	0,60	0,59	0,61	0,65	0,65	0,62	0,65
5	0,07 (0,07)				0,15 (0,15)				0,09 (0,09)			
	0,56				0,61				0,65			
6	0,09 (0,09)				0,19 (0,19)				0,11 (0,11)			
	0,56				0,61				0,65			
7	0,06 (0,06)				0,14 (0,14)				0,07 (0,07)			
	0,57				0,63				0,65			
8	0,10 (0,10)				0,20 (0,20)				0,10 (0,10)			
	0,56				0,61				0,65			
9	0,07 (0,07)				0,17 (0,17)				0,10 (0,10)			
	0,56				0,61				0,65			

Nota: A&S - Abrahamson y Silva (2008), B&A - Boore y Atkinson (2008), C&B - Campbell y Bozorgnia (2008), C&Y - Chiou y Youngs (2008).

La incidencia de las fallas 1 a 4 sobre la amenaza a las obras varía según el período y la profundidad hipocentral. Para $Z_{HIP}=10$ km, las fallas 3 y 4 dominan el escenario sísmico, con los siguientes valores, promediados entre las cuatro relaciones de atenuación: $AMT=0,41$ y $0,36$, $Sa_{0,2}=0,93$ y $0,82$, y $Sa_{1,0}=0,26$ y $0,25$,

respectivamente (Tabla 9.6). Para $Z_{HIP}=20$ km, en cambio, es la falla 1 la que más contribuye al movimiento del suelo en las tres frecuencias, con $AMT=0,37$, $Sa_{0,2}=0,84$ y $Sa_{1,0}=0,22$ (Tabla 9.6). La razón de la preeminencia de la falla 1, cuya traza en superficie es la más alejada del sitio, es que con la mayor profundidad al foco el plano de ruptura, y por ende R_{JB} , disminuye a 2,1 km (Tabla 9.3).

Tabla 9.6 Valores de aceleración promediados entre las cuatro relaciones de atenuación. Los resultados para $Z_{HIP}=20$ km se dan entre paréntesis. En cada frecuencia, la columna Prom. da el promedio de los dos valores a la izquierda. Para $Sa_{1,0}$, Impulso da la amplificación aplicada por efecto de falla cercana y Final da el valor de la aceleración modificada por el impulso.

Falla	AMT		Sa _{0,2}		Sa _{1,0}			
	Z_{HIP}	Prom.	Z_{HIP}	Prom.	Z_{HIP}	Prom.	Impulso (%)	Final
1	0,19 (0,37)	0,28	0,42 (0,84)	0,63	0,13 (0,22)	0,17	0	0,17
2	0,22 (0,16)	0,19	0,49 (0,35)	0,42	0,13 (0,09)	0,11	20	0,13
3	0,41 (0,22)	0,31	0,93 (0,48)	0,70	0,26 (0,11)	0,19	20	0,23
4	0,36 (0,27)	0,31	0,82 (0,60)	0,71	0,25 (0,14)	0,18	20	0,22
Recom.		0,31		0,71		0,19		0,23

9.iii Efecto por falla cercana ('near-fault')

Durante el proceso de ruptura, la construcción positiva de las ondas emitidas desde distintos puntos en el plano de falla puede dar lugar a un impulso que se propaga pendiente arriba por la falla, en dirección perpendicular a su rumbo (Bozorgnia y Campbell, 2004; Somerville et al., 1997). Este fenómeno se da a períodos relativamente largos, mayores de 0,5 segundos, y afecta sitios que se encuentren a menos de unos 25 km del foco. El impulso resulta en una amplificación de la aceleración que puede alcanzar un 20% (Figura 9.3). Las fallas 2, 3 y 4 están a menos de 15 km del sitio de interés, y son particularmente candidatas para generar efectos de directividad sobre el sitio de la presa. Esto es así debido a que el futuro sitio de la presa estará pendiente arriba del plano de falla, en la dirección de propagación del impulso. Una estimación del valor de aceleración espectral $Sa_{1,0}$ para estas tres fallas, tomando en cuenta la posible amplificación, se da en la Tabla 9.6.

En caso que el sector ingenieril considere que la presa sería particularmente vulnerable a períodos de vibración largos, por ejemplo, $T=5$ segundos, se puede implementar un cálculo específico. No obstante, la escasez de información sísmológica sobre las fallas modeladas impone severos límites al análisis posible.

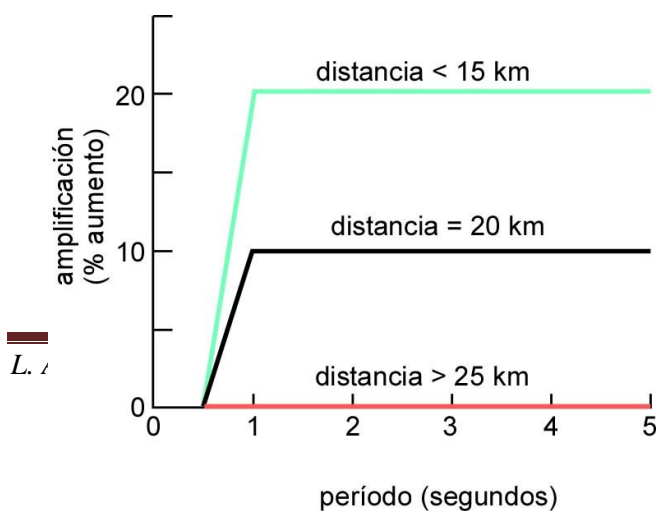


Figura 9.3 Efecto de falla cercana ('near fault'). Afecta principalmente períodos superiores a 1 segundo (tomado de Caltrans, 2012).

9.iv Componente vertical de la aceleración

El análisis previo sólo tomó en consideración el movimiento horizontal del suelo, práctica de rutina. La componente vertical puede, sin embargo, ser significativa y de interés ingenieril. Bozorgnia y Campbell (2004) indican que la relación entre componentes vertical y horizontal, V/H , varía con la distancia del sitio al plano de ruptura y con el período de la vibración. V/H puede alcanzar $V/H=1,7$ para períodos cortos ($T=0,1$ segundos, aproximadamente) y sitios muy cercanos a la falla. Para períodos largos ($T>0,2$ seg, aproximadamente, $V/H<1$).

9.v Discusión

Los cálculos de aceleración en el futuro sitio de la presa se realizaron con dos valores de profundidad hipocentral; 10 km y 20 km. El primer valor surge de un cálculo empírico basado en datos externos al ADI, aunque con sostén parcial en datos de los Andes del NOA. El segundo valor se apoya en datos del ADI. No obstante, una decisión acerca de la mejor opción no es sencilla.

Las fallas que se usaron en el cálculo determinístico tienen ruptura en superficie, es decir, son 'capable faults'. El ancho del plano de ruptura, W , guarda una relación moderadamente bien documentada con la magnitud de momento (Wells y Coppersmith, 1994; Papazachos et al., 2004). Un sismo de $M=7$ está relacionado con un $W=19$ km, y un sismo de $M=8$, con $W=35$ km, aproximadamente. Suponiendo que el hipocentro se ubica hacia la mitad del ancho del plano de ruptura (cf. Kaklamanos et al., 2011), con $W=19$ km el borde superior probablemente intersectaría la superficie si la profundidad hipocentral fuese $Z_{HIP}=10$ km, pero no lo haría si $Z_{HIP}=20$ km. A su vez, un sismo con $Z_{HIP}=20$ km debería tener $M>8$ para romper en superficie. El potencial sismogénico de las fallas mayores en el ADI alcanza $M=7,4$, correspondiente a $W=26,5$ km. Es razonable postular, entonces, que para una evaluación conservadora conviene tomar el promedio de los valores de aceleración calculados con las dos profundidades hipocentrales (Tabla 9.6, columna Prom.).

Los resultados resumidos en la Tabla 9.6 indican que el control mayor de la amenaza en el sitio del Complejo recae sobre las fallas 3 y 4, y en menor grado sobre la falla 1. El control ejercido por la falla 2 es relativamente débil.

La recomendación de este informe es adoptar el valor mayor de aceleración para cada frecuencia, tomando en cuenta sólo las fallas 3 y 4, como se indica en la última fila de la Tabla 9.6.

10. Modelización probabilística

La modelización probabilística complementa la determinística, agregando tasas de excedencia de aceleraciones críticas. El primer paso en el armado de un modelo probabilístico es identificar el tipo y la ubicación de las fuentes sismogénicas en que se basará. Dos clases dominantes de fuentes sismogénicas son la areal y la lineal. La fuente areal se basa en la distribución de los focos sísmicos; la fuente lineal está representada por las fallas. Debido a que se carece de información sismológica sobre la actividad de las fallas en el ADI en función del tiempo, no es posible emplearlas en el análisis de modo directo, empleando un modelo con fuentes lineales. Por este motivo, se optó en este informe por una zonificación sísmica basada en áreas-fuente.

10.i Zonificación sísmica

La subdivisión en zonas debe basarse en criterios tectónicos. Donde las fuentes sismogénicas están adecuadamente definidas, tanto en superficie como en subsuelo, es recomendable asociar los focos sísmicos con las estructuras correspondientes y así delimitar las zonas. En el ADI la información pertinente no alcanza para aplicar esta metodología de un modo excluyente. Para este informe se ha adoptado un criterio dual, considerando tanto la distribución de las fallas reconocidas como la sismicidad difusa, o distribuida, representada por los epicentros.

Segregando los sismos someros, y aplicando el programa Zmap se confeccionaron mapas de la distribución de los valores de los parámetros a y b de la distribución de Gutenberg-Richter (Figura 10.1). El mapa muestra una concentración de valores de b elevados (píxeles en tonos de amarillo a marrón) centrada en la provincia de Catamarca, al oeste de Potrero del Clavillo. Valores elevados de b sugieren una menor proporción de sismos fuertes, lo cual podría estar relacionado con una corteza más caliente localmente. Píxeles en celeste representan valores de b próximos a $b=1$, y píxeles azules a negros corresponden a $b<1$. La distribución de los valores de a es muy similar a la de b .

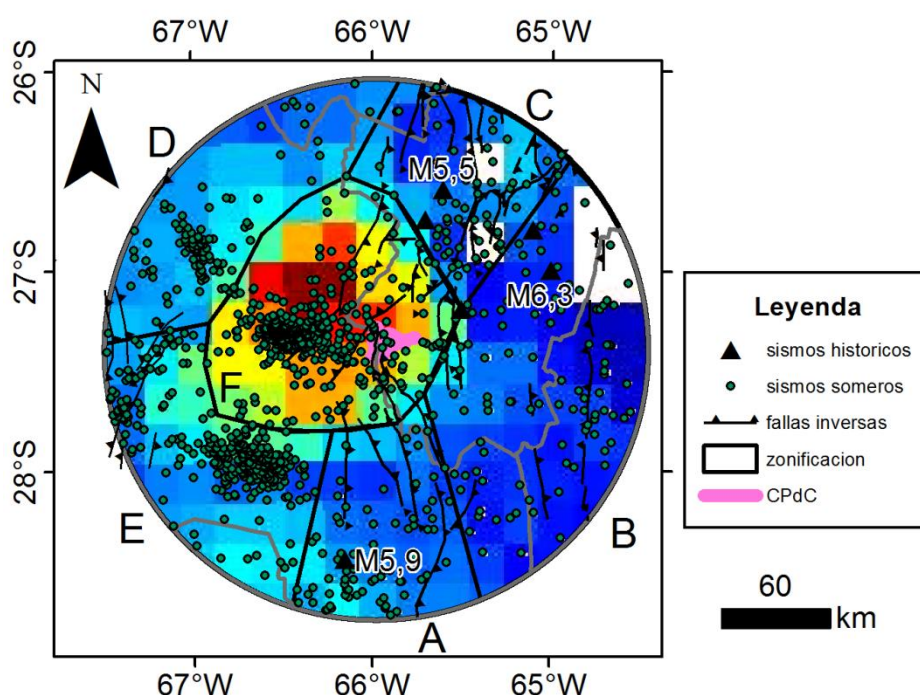


Figura 10.1 Distribución regional del valor del parámetro b de la relación Gutenberg-Richter para los sismos con focos someros (profundidad < 60 km). CPdC –Complejo Hidroeléctrico Potrero del Clavillo.

Las fallas activas, por su parte, se agrupan en tres conjuntos principales: uno al NNE de Potrero del Clavillo, otros al este del Complejo, y el tercero a directamente al sur del Complejo. Combinando valores de a y b y el agrupamiento de las fallas, se delimitaron seis zonas sísmicas, como se indica en la Figura 10.2. La Tabla 10.1 da los parámetros sísmicos que representan cada zona. La tasa de actividad sísmica, λ , se calculó por Gutenberg-Richter. La actividad sísmica promedio en cada zona, λ_{M0} , se da en la Tabla 10.1 para $M0=5,0$. La magnitud máxima observada se da para sismos

instrumentales; en las zonas A, B y C se dan también para sismos históricos. Nótese que en las zonas A y C las magnitudes instrumentales superan las históricas. La magnitud máxima estimada surge del largo de la falla. Para comparación se estima la magnitud máxima basada en datos instrumentales, siguiendo la práctica de sumar 0,5.

Tabla 10.1 Parámetros de las zonas sísmicas.

Zona	b	σ b	a	β	λ_{M0}	Mc	Mmax-obs	Tipo de magnitud-Fecha del sismo	Mmax
A	-0,46	0,05	3,06	-1,06	0,76	2,5	5,9 (6,1)	Hist. IX, 5/II/1898 (Instr, 7/IX/2004)	7,3 falla 6,1+0,5=6,6
B	-0,52	0,04	3,55	-1,20	0,95	2,5	6,3 (5,6)	Hist. VII, 4/III/1931 (Instr, 21/II/2011)	7,3 falla 5,6+0,5=6,1
C	-0,71	0,11	3,71	-1,64	0,16	2,5	5,5 (6,1)	Hist. VIII, 17/XI/1906 (Instr, 7/I/1974)	7,4 falla 6,1+0,5=6,6
D	-0,56	0,04	3,66	-1,29	0,86	2,5	5,3	Instr, 13/VII/2013	6,6 falla 5,3+0,5=5,8
E	-0,55	0,03	4,26	-1,27	1,51	2,5	6,3	Instr, 10/VI/1985	7,1 falla 6,3+0,5=6,8
F	-1,0	0,07	5,23	- 2,303	0,23	2,5	5,0 (6,1)	VII, hist. 11/VIII/1907 (Instr, 7/I/1974)	7,4 falla 6,1+0,5=6,6
Todo	-0,61	0,02	4,74	-1,40	1,69	2,5			

Referencias: a, b parámetros G-R, σ b desv. Estándar de b, $\beta = 2,303b$, λ_{M0} actividad para $M=5$, Mc magnitud de completitud, Mmax-obs magnitud máxima observada en sismos históricos e instrumentales, Mmax magnitud máxima estimada

La zona A incluye 6 fallas probablemente activas, una de las cuales alcanza $M=7,3$, 1 epicentro de sismo histórico de $M=5,9$, con intensidad $MMI=IX$, y una magnitud instrumental de $M=6,1$. La zona B incluye 7 fallas probablemente activas que alcanzan $M=7,3$, 3 epicentros de sismos históricos, uno de ellos con $M=6,3$, y una magnitud instrumental $M=5,6$. La zona C incluye 11 fallas probablemente activas, la mayor con $M=7,4$ (falla 9 en la Figura 9.1), 3 epicentros históricos, dos con $M=5,5$, y una magnitud instrumental de $M=6,1$. La zona D incluye 1 falla probablemente activa, de $M=6,6$, ningún epicentro histórico, y una magnitud instrumental de $M=5,3$. La zona E incluye 3 fallas probablemente activas, una con $M=7,1$, ningún epicentro histórico, y una magnitud instrumental de $M=6,3$. Finalmente, la zona F incluye 10 fallas probablemente activas, entre las cuales está la falla 9 (Figura 9.1), de $M=7,4$, un epicentro histórico con $M=5,0$, y un registro instrumental con $M=6,1$. Las zonas A, B, C y F, más próximas al Complejo, se caracterizan por magnitudes máximas elevadas.

10.ii Modelo probabilístico

El modelo probabilístico se calculó con el programa CRISIS2014 (Ordaz et al., 2001). Los valores de los parámetros de sismicidad empleados se dan en la Tabla 10.1. Los resultados, válidos para el futuro emplazamiento del Complejo Hidroeléctrico Potrero del Clavillo, se resumen en la Tabla 10.2. Se procesó un modelo para cada relación de atenuación, las mismas empleadas en el análisis determinístico y para tres tiempos de recurrencia, 72 años (probabilidad de excedencia de 50% en 50 años), 475 años (probabilidad de excedencia de 10% en 50 años) y 2475 años (probabilidad de excedencia de 2% en 50 años). La recurrencia de 72 años corresponde al Sismo Operacional Básico (OBE), o Sismo de Servicio, esperable durante el tiempo de vida útil de la obra, la de 475 años suele aplicarse al Sismo de Diseño, y la de 2475 años al Sismo Máximo Considerado (MCE).

Las aceleraciones son notoriamente fuertes para $Sa_{0,2}$ en todos los casos, superando por un factor superior a 2 a la AMT (Tabla 10.2). Para un Sismo de Servicio la única aceleración significativa se da para $Sa_{0,2}=0,40$. Las aceleraciones obtenidas para una recurrencia de 475 años son aproximadamente equivalentes a las calculadas por el método determinístico (ver Tabla 9.6). Para una recurrencia de 2475 años, los valores probabilísticos son netamente superiores a los determinísticos.

Tabla 10.2 Aceleraciones (como fracciones de g) probables en el futuro emplazamiento del Complejo Potrero del Clavillo, para tres frecuencias y cuatro períodos de retorno.

Recurrencia (años)	Período (segundos)	B&A (g)	C&B (g)	A&S (g)	C&Y (g)	Prom.
72	0,01	0,13	0,16	0,17	0,23	0,17
	0,2	0,33	0,41	0,43	0,44	0,40
	1,0	0,08	0,09	0,16	0,11	0,11
475	0,01	0,29	0,34	0,31	0,45	0,33
	0,2	0,69	0,85	0,81	0,93	0,78
	1,0	0,16	0,19	0,28	0,21	0,20
2475	0,01	0,51	0,56	0,55	0,73	0,55
	0,2	1,26	1,43	1,30	1,50	1,30
	1,0	0,30	0,33	0,50	0,35	0,35
10000	0,01	0,79	0,55	0,69	1,06	0,77
	0,2	1,84	1,51	1,93	2,00	1,82
	1,0	0,48	0,36	0,66	0,55	0,51

Nota: A&S - Abrahamson y Silva (2008), B&A - Boore y Atkinson (2008), C&B - Campbell y Bozorgnia (2008), C&Y - Chiou y Youngs (2008).

Se computaron las tasas de probabilidad de excedencia para un tiempo de referencia de 50 años (Figura 10.2). A modo de ejemplo se indica el nivel de excedencia para una intensidad de 0,5g. Los valores de AMT, $Sa_{0,2}$ y $Sa_{1,0}$ tienen probabilidades de exceder una intensidad de 0,5g, en 50 años, de aproximadamente 2%, 20% y 0,8%, respectivamente.

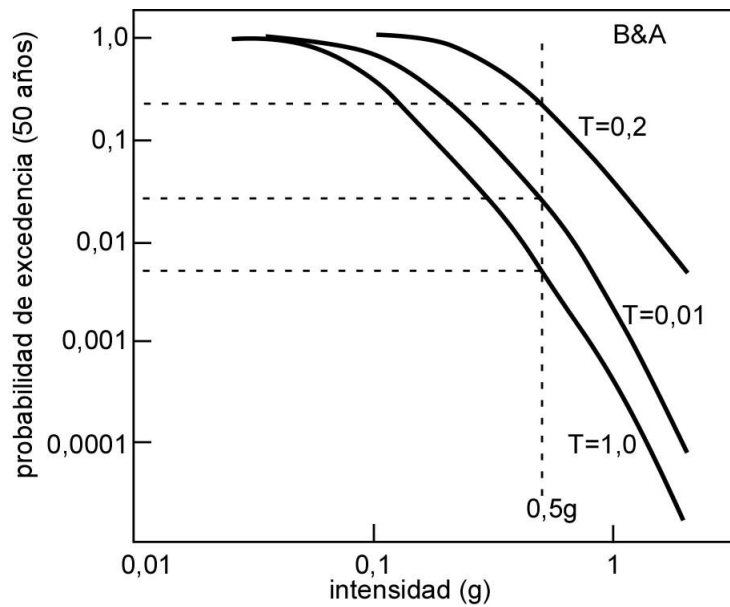


Figura 10.2 Curvas de excedencia en 50 años para $T=0,01$, $0,2$ y $1,0$. Se puntualizan valores para una intensidad de $0,5g$. Las curvas se basan en la relación de atenuación de Boore y Atkinson (2008).

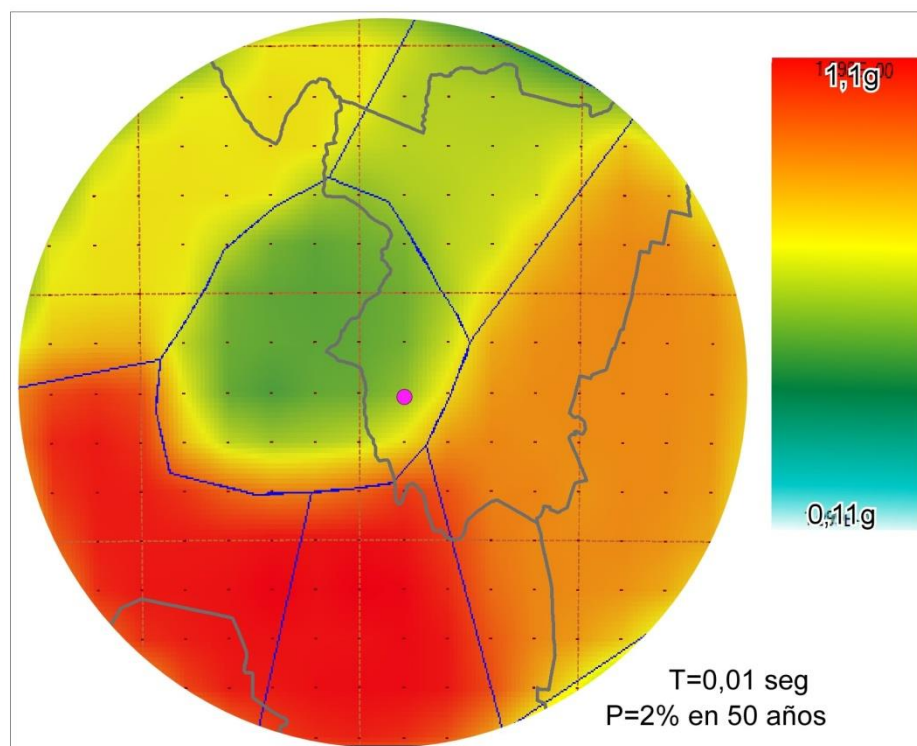


Figura 10.3 Distribución regional de la aceleración máxima del terreno (AMT) para una probabilidad de excedencia de 2% en 50 años. El pequeño círculo magenta indica la situación del Complejo Hidroeléctrico Potrero del Clavillo. Los valores fueron obtenidos con el programa CRISIS versión 2014, empleando un árbol lógico compuesto por las relaciones de atenuación de Campbell y Bozorgnia (2008), Boore y Atkinson (2008) y Chiou y Youngs (2008).

Conclusiones

Bibliografía mencionada en el texto

- Abrahamson, N. y Walter Silva, 2008. Summary of the Abrahamson & Silva NGA Ground-Motion Relations. *Earthquake Spectra*, Vol. 24, No. 1, pp. 67-97.
- Allen, T.I. y David J. Wald, 2009. Evaluation of Ground-Motion Modeling Techniques for Use in Global ShakeMap—A Critique of Instrumental Ground-Motion Prediction Equations, Peak Ground Motion to Macroseismic Intensity Conversions, and Macroseismic Intensity Predictions in Different Tectonic Settings. Open-File Report 2009–1047, U.S. Department of the Interior, U.S. Geological Survey, 114 p.
- Ambraseys, N.N., J. Douglas y S.K. Sarma, 2005. Equations for the estimation of strong ground motions from shallow crustal earthquakes using data from Europe and the Middle East: Horizontal peak ground acceleration and spectral acceleration. *Bulletin of Earthquake Engineering* 3, 1, 1-53.
- AyE, 1973. Sistema Potrero del Clavillo. Aprovechamiento integral de los ríos Gastona y Medina. Provincias de Tucumán y Catamarca. JEPZN. Agua y Energía Eléctrica, tomo E.I.1. Estudios Básicos.
- Bonilla, M.G., R.K. Mark y J.J. Lienkaemper, 1984. Statistical Relations Among Earthquake Magnitude, Surface rupture Length, and Surface Fault Displacement Open-File Report 84-256 Version 1.1, <http://pubs.usgs.gov/of/1984/of84-256/>, 46 p.
- Boore, D.M. y Gail M. Atkinson, 2008. Ground-Motion Prediction Equations for the Average Horizontal Component of PGA, PGV, and 5%-Damped PSA at Spectral Periods between 0.01 s and 10.0 s. *Earthquake Spectra*, Vol. 24, No. 1, pp. 99-138.
- Bozorgnia, Y. y K.W. Campbell, 2004. Engineering characterization of ground motion En: Bozorgnia, Y. y V.V. Bertero (eds.), *Earthquake Engineering: From Engineering Seismology to Performance-Based Engineering*, Chapter 5, CRC Press, New York.
- Brooks, B.A., Michael Bevis, Kelin Whipple, J. Ramon Arrowsmith, James Foster, Tomas Zapata, Eric Kendrick, Estella Minaya, Arturo Echalar, Mauro Blanco, Pablo Euillades, Mario Sandoval y Robert J. Smalley Jr., 2011. Orogenic-wedge deformation and potential for great earthquakes in the central Andean backarc. *Nature Geoscience Letters*, DOI: 10.1038/NGEO1143.
- Building Seismic Safety Council. 2003. NEHRP Recommended Provisions for seismic Regulations for New buildings and other Structures, Part1: Provisions, FEMA 368, Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C., 338 pp.
- Caltrans , 2012. Methodology for Developing Design Response Spectrum for Use in Seismic Design Recommendations. Division of Engineering Services, Geotechnical Services, 26 p.
- Camino, R. (ed.), 1999. Geología Argentina. SEGEMAR, Anales 29, 794 p.
- Campbell, K.W. y Yousef Bozorgnia, 2008. NGA Ground Motion Model for the Geometric Mean Horizontal Component of PGA, PGV, PGD and 5% Damped Linear Elastic Response Spectra for Periods Ranging from 0.01 to 10 s. *Earthquake Spectra*, Vol. 24, No. 1, pp. 139-171.
- Carrapa, B., M.R. Strecker, E.R. Sobel, 2006. Cenozoic orogenic growth in the Central Andes: Evidence from sedimentary rock provenance and apatite fission track thermochronology in the Fiambalá Basin, southernmost Puna Plateau margin (NW Argentina). *Earth and Planetary Science Letters* 247: 82–100.
- Carrapa, B., Jörn Hauer, Lindsay Schoenbohm, Manfred R. Strecker, Axel K. Schmitt, Arturo Villanueva, José Sosa Gomez, 2008. Dynamics of deformation and

- sedimentation in the northern Sierras Pampeanas: An integrated study of the Neogene Fiambalá basin, NW Argentina. *GSA Bulletin*; doi: 10.1130/B26111.1; 13.
- Carrapa, B., D. Adelmann, G. E. Hilley, E. Mortimer, E. R. Sobel, y M. R. Strecker, 2005. Oligocene range uplift and development of plateau morphology in the southern central Andes. *TECTONICS*, VOL. 24, TC4011, doi:10.1029/2004TC001762.
- Chiou, B. S. y Robert R. Youngs, 2008. An NGA Model for the Average Horizontal Component of Peak Ground Motion and Response Spectra. *Earthquake Spectra*, Vol. 24, No. 1, pp. 173-215.
- Cristallini, E.O., Cominquez, A.H., Ramos, V.A. y Mercerat, D.E. 2004. Basement double-wedge thrusting in the northern Sierras Pampeanas of Argentina (26°S): constraints from deep seismic reflection, en K.R. McClay, ed., *Thrust Tectonics and hydrocarbon system*. American Association of Petroleum Geologists, Memoir 82: 65-90.
- Drozdowski, G. y R. Mon, 1999. Oppositely-verging thrusting structures in the North Argentine Andes compared with the German Variscides. *ACTA GEOLOGICA HISPANICA*, v. 34, n° 2-3, p. 185-196.
- Eremchuk, J., Mon, R., Suayter, L. y Zossi, M.M., 1981. Sismicidad y tectónica en los Andes del norte argentino. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, v. 36(2), p. 197-203.
- Eremchuk, J. y Papetti, L., 1999. Neotectónica del tramo austral del valle de Paclín, Catamarca. XIV Congreso Geológico Argentino, Actas I, p. 257-259.
- Fauqué, L. y M. Strecker, 1987. Rasgos de neotectónica y avalanchas de roca producidas por terremotos en la vertiente occidental de los Nevados del Aconquija, Provincia de Catamarca, Argentina. X Congreso Geológico Argentino, Actas I, p. 219-222.
- FEMA, 2005. Federal Guidelines for Dam Safety. Earthquake analyses and design of dams. FEMA 65, 75 p.
- Galadini, F., E. Falcucci, P. Galli, B. Giaccio, S. Gori, P. Messina, M. Moro, M. Saroli, G. Scardia y A. Sposato, 2012. Time intervals to assess active and capable faults for engineering practices in Italy. *Engineering Geology*, doi: 10.1016/j.enggeo.2012.03.012.
- González Bonorino, G., R. Omarini y J. Viramonte (eds.), 1999. Geología del Noroeste Argentino. Relatorio del XIV Congreso Geológico Argentino de Geología, Salta.
- Hongn, F., Ricardo Mon, Iván Petrinovic, Cecilia del Papa y Jaime Powell, 2010. Inversión y reactivación tectónicas cretácico-cenozoicas en el noroeste argentino: influencia de las heterogeneidades del basamento neoproterozoico-paleozoico inferior. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 66 (1): 38 – 53.
- Hu, J.J. y L.L. Xie, 2008. Directivity of near-fault ground motion generated by thrust-fault earthquake: a case study of the 1999 Mw7.6 Chi-Chi earthquake. The 14th World Conference on Earthquake Engineering October 12-17, 2008, Beijing, China.
- Iaffa, D.N., F. Sàbat, D. Bello, O. Ferrer, R. Mon, A.A. Gutiérrez, 2011. Tectonic inversion in a segmented foreland basin from extensional to piggy back settings: The Tucumán basin in NW Argentina. *Journal of South American Earth Sciences* 31: 457-474.
- IDIA, 2008. Evaluación de la amenaza sísmica para la presa Río Hondo. Instituto de Investigaciones Antisísmicas “Ing. Aldo Bruschi”, UNSJ, San Juan. Informe inédito.

- Idriss, I.M., 2008. An NGA Empirical Model for Estimating the Horizontal Spectral Values Generated By Shallow Crustal Earthquakes. *Earthquake Spectra*, Vol. 24, No. 1, pp. 217-242.
- Jacobs, K.M. y Stephen R. McNutt, 2010. The 2006 Eruption of Augustine Volcano, Alaska. En: Power, J.A., Coombs, M.L., y Freymueller, J.T., editors, U.S. Geological Survey Professional Paper 1769, Chapter 3. Using Seismic b-Values to Interpret Seismicity Rates and Physical Processes During the Preeruptive Earthquake Swarm at Augustine Volcano 2005–2006, p. 59-83.
- Kaklamanos, J., Baise, L.G. y Boore, D.M., 2011. Estimating Unknown Input Parameters when Implementing the NGA Ground-Motion Prediction Equations in Engineering Practice. TECHNICAL NOTE. *Earthquake Spectra*, Volume 27, No. 4, pages 1219–1235.
- Kijko, A. y Mayshee Singh, 2011. Acta Statistical Tools for Maximum Possible Earthquake Magnitude Estimation. *Acta Geophysica*, vol. 59, no. 4, pp. 674-700.
- Map of Quaternary faults and folds of Argentina. Catálogo de fallas del Cuaternario publicado por el U.S. Geological Survey, compilado por Carlos Costa (UNSL), escala 1:4.000.000, año 2000.
- Ordaz, M., Aguilar, A. y Arboleda, J., 2001. CRISIS 99-18 ver. 1.018. Program for Computing Seismic Risk. Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Papazachos, B.C., Scordilis E.M., Panagiotopoulos, D.G., Papazachos, C.B. y Karakaisis, G.F., 2004. Global relations between seismic fault parameters and Moment magnitude of earthquakes *Bulletin of the Geological Society of Greece* vol. XXXVI, 1482-1489.
- Perucca, L., 2008. Análisis neotectónico en el área del embalse de Río Hondo. Provincia de Santiago del Estero, Argentina. Informe inédito.
- Piseta, J.L., G.E. Turazzini, C.A. DiSalvo, y J.A. Casajus, 1981. Mapa geológico-estructural. Sistema Potrero del Clavillo - Geología 1ra. Central. Sistema Potrero del Clavillo. Aprovechamiento integral de los ríos Gastona y Medina. Provincias de Tucumán y Catamarca. JEPZN. Agua y Energía Eléctrica, tomo E.I.1. Estudios Básicos.
- Regnier, M., J-M. Chiu, R. Smalley, Jr., B. Isacks y M. Araujo, 1994. Crustal thickness variation in the Andean foreland, Argentina, from converted waves. *Bulletin of the Seismological Society of America*, v. 84, p. 1097-1111.
- Richardson, T., Hersh Gilbert, Megan Anderson y Kenneth D. Ridgway, 2012. Seismicity within the actively deforming Eastern Sierras Pampeanas, Argentina. *Geophys. J. Int.*, 188 (2): 408-420.
- Rodríguez Fernández et al., 1998. Estructura andina de la Cordillera Oriental en el área de la Quebrada de Humahuaca, provincia de Jujuy, NO de Argentina.
- Smith-Konter, B.R., D.T. Sandwell y P. Shearer, 2011. Locking depths estimated from geodesy and seismology along the San Andreas Fault System: Implications for seismic moment release. *Journal of Geophysical Research*, v. 116, B06401.
- Somerville, P.G., Smith, N.F., Graves, R.W., y Abrahamson, N.A., 1997. Modification of empirical strong ground motion attenuation relations to include the amplitude and duration effects of rupture directivity. *Seismological Res. Let.* 68:1, 199-222.
- Stirling, M., D. Rhoades y K. Berryman, 2002. Comparison of earthquake scaling relations derived from data of the instrumental and preinstrumental era, *Bull. Seismol. Soc. Am.* 92, no. 2, 812–830.
- Turazzini, G., 1973. Estudio geológico de la quebrada del río Las Cañas (Garganta del Diablo). Departamento Andalgalá - Catamarca. Sistema Potrero del Clavillo.

- Aprovechamiento integral de los ríos Gastona y Medina. Provincias de Tucumán y Catamarca. JEPZN. Agua y Energía Eléctrica, tomo E.I.1. Estudios Básicos.
- Vega Caro, A.C., 1999. Rasgos neotectónicos en las sierras del noreste de Tucumán. Departamento Burruyacu, Tucumán. Tesis, Universidad Nacional de Tucumán, 49 p.
- Watts, A.B. y E.B. Burov, 2003. Lithospheric strength and its relationship to the elastic and seismogenic layer thickness. *Earth and Planetary Science Letters* 213, p. 113-131.
- Wells, D.L. y Kevin J. Coppersmith, 1994. New Empirical Relationships among Magnitude, Rupture Length, Rupture Width, Rupture Area, and Surface Displacement. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 84, No. 4, pp. 974-1002.
- Wiemer, S., 2001. A software package to analyze seismicity: *ZMAP*. *Seismological Research Letters*, Volume 72, Number 2.

Listado de abreviaturas

AMT – Aceleración Máxima del Terreno

ANSS – Advanced National Seismic System

CRISIS -

FEMA – Federal Emergency Management Agency

GMPE – Ground Motion Prediction Equation

INPRES – Instituto Nacional de Prevención Sísmica

LFS – Largo de la Falla en Superficie

NGA - Next Generation Attenuation

NOA – Noroeste Argentino

PEER - Pacific Earthquake Engineering Research Center

PGA – Peak Ground Acceleration