



Evaluación del riesgo sísmico para Tolhuin, Tierra del Fuego, Argentina, aplicando el programa Selena

Seismic risk evaluation for Tolhuin, Tierra del Fuego, Argentina, applying the Selena software

Abascal, Liliana del Valle ✉ - González Bonorino, Gustavo

Recibido: 19 de octubre de 2014 • Aceptado: 30 de diciembre de 2014

Resumen

La población de Tolhuin (2.500 habitantes) está situada en la cabecera del lago Fagnano, a 1 km de la traza de la falla Magallanes-Fagnano (M-F), la principal fuente sismogénica en el sector argentino de Tierra del Fuego. La falla M-F ha generado varios eventos sísmicos de magnitud cercana a $M=8$, de los cuales el más reciente ocurrió en 1949, cuando la urbanización de Tolhuin era incipiente. Desde entonces, Tolhuin ha crecido rápidamente en población y en superficie edificada. Es objeto de este trabajo evaluar el efecto que hoy tendría un sismo de magnitud similar al de 1949. La simulación aplica el programa de computación SELENA (Seismic Loss Estimation using a logic tree Approach), en modos determinístico y probabilístico, postulando sendos epicentros localizados sobre la falla M-F, distantes 120 km y 30 km de Tolhuin. La ubicación de los epicentros intenta modelar el comportamiento del tramo curvo ('restraining bend') de la falla. La caracterización geotécnica del sustrato se basa en datos de la literatura y observaciones de campo, y se hace una evaluación expeditiva de la sismorresistencia de la tipología edilicia dominante. Los resultados de las simulaciones indican daños materiales leves para el sismo lejano, y daños severos para el caso de sismo cercano. La simulación probabilística dio resultados intermedios. La conclusión es que es conveniente tomar medidas preventivas, pausadas pero rigurosas, para mitigar las consecuencias de un posible sismo destructivo. Asimismo se concluye que la zonificación sísmica del INPRES para Tierra del Fuego debiera ser modificada.

Palabras clave: falla Magallanes-Fagnano, sismicidad, sismorresistencia.

Abstract

The town of Tolhuin (population 2500) is located at the head of Lake Fagnano, 1 km from the trace of the Magallanes-Fagnano (M-F) fault, the major seismogenic source in the Argentine sector of Tierra del Fuego. The M-F fault has generated several seismic events with magnitude around $M=8$, the most recent in 1949, when the urbanization of Tolhuin was incipient. Since then, Tolhuin has grown rapidly in

Facultad Regional Río Grande, Universidad Tecnológica Nacional, Islas Malvinas 1650, Tierra del Fuego,

✉ liliana_abascal@hotmail.com

Facultad Regional Río Grande, Universidad Tecnológica Nacional, Islas Malvinas 1650, Tierra del Fuego, y CONICET

population and in built surface. It is the object of this study to evaluate the effect a seismic event of magnitude similar to that of 1949 would have today. The simulation applies the SELENA (Seismic Loss Estimation using a logic tree Approach) computer program, in deterministic and probabilistic modes, postulating epicenters on the M-F fault, distant 120 and 30 km from Tolhuin. The position of the epicenters intends to model the behavior of the restraining bend on the M-F fault. A geotechnical characterization of the substrate is presented, based on data from the literature and field observations, and a cursory evaluation is made of the seismic resistance of the major building types. The results of the simulations indicate slight material damage for the distant earthquake, and extensive damage in the case of the nearby earthquake. The probabilistic simulation yielded intermediate results. The conclusion of this study is that it is convenient to implement preventive measures, calmly but rigorously, to mitigate the consequences of a possible destructive earthquake. It is additionally concluded that the seismic zoning by the INPRES for Tierra del Fuego should be modified.

Keywords: Magallanes-Fagnano fault, seismicity, seismic resistance.

INTRODUCCIÓN

El riesgo sísmico describe la probabilidad de pérdidas personales y materiales como consecuencia de un terremoto (Reiter, 1990). Unas pocas décadas atrás, la noción de riesgo sísmico estaba apenas difundida y las normas sismorresistentes no habían sido incorporadas a los códigos de edificación. El terremoto de 1906 en California, Estados Unidos, marcó el inicio de una búsqueda sistemática de modos de garantizar la integridad de edificios sometidos a esfuerzos sísmicos, sobre todo evitando el colapso. En la Argentina, fue el terremoto de 1944 en San Juan el evento que motivó el inicio de esta práctica, con la creación del Consejo de Construcciones Antisísmicas y Reconstrucción de San Juan (CONCAR), que en 1972 derivó en el actual Instituto Nacional de Prevención Sísmica (INPRES). El INPRES publicó el primer conjunto de normas de sismorresistencia en 1983, las cuales, actualizadas en 1991, tienen vigencia nacional (INPRES-CIRSOC 103, 2013). Las edificaciones anteriores a la entrada en vigencia de esas normas, claro está, conforman un conjunto sísmicamente vulnerable. Es cierto que la mayor parte de las urbanizaciones sujetas a amenaza sísmica aplican normas de construcción sismorresistente a las construcciones nuevas, pero aun en urbanizaciones jóvenes se puede dar que la premura en resolver la necesidad de vivienda derive en la omisión de una correcta adecuación a las normas existentes. Agrava esta situación que el control último en la aplicación de la normativa INPRES-CIRSOC reside en los municipios, los cuales suelen carecer de suficiente personal idóneo para esa tarea.

El riesgo sísmico resulta de la combinación de *amenaza + exposición + vulnerabilidad*. La amenaza resulta del fenómeno natural, el evento sísmico. Una evaluación de la amenaza requiere la cuantificación del movimiento de suelo en un sitio, o región, por efecto de un terremoto. La exposición está dada por la densidad de población, el tipo y valor de las construcciones, el lucro cesante potencial, y otros factores socio-económicos. La vulnerabilidad mide la susceptibilidad del inventario edilicio, y de la población, a sufrir daños durante un terremoto. La vulnerabilidad responde a la sismorresistencia de las construcciones, a la naturaleza geotécnica del sustrato, y también a la preparación en prevención sísmica de la población en general y de los cuadros de intervención post-desastre.

Reducir el riesgo implica disminuir el peso de uno o más de sus componentes. Ahora bien, ninguna acción humana puede limitar la amenaza natural, y restringir la exposición implicaría restringir el crecimiento integral de una ciudad, ya que la

exposición crece impulsada por la presión que ejercen el aumento de la población y la necesidad siempre presente de desarrollo económico. En cambio sí es factible limitar la vulnerabilidad. Para reducir la vulnerabilidad de una población se requieren dos acciones. Por un lado, cuantificar la distribución geográfica del riesgo sísmico tomando en consideración la adecuación sismorresistente de las construcciones y las propiedades geotécnicas del sustrato sobre el cual apoyan. Y por otro lado, elaborar un eficiente programa de acciones preventivas que incluyan la aplicación de normas de edificación sismorresistente, la concientización de la población acerca de la amenaza, y el diseño de un plan de contingencia post-terremoto en función del análisis previo de vulnerabilidad.

La isla de Tierra del Fuego está situada en el extremo austral del continente Sudamericano, en un entorno de elevada sismicidad dado por la interacción de las placas tectónicas Sudamericana, Scotia y Antártica (Figura 1A). Una fractura transforme separa las placas Scotia y Sudamericana, uniendo la dorsal centro-oceánica de las islas Sandwich del Sur con la zona de subducción frente a Chile (Figura 1A). El tramo continental de esta fractura, donde atraviesa la isla de Tierra del Fuego, se conoce como falla Magallanes-Fagnano, debido a que su traza sigue la cuenca del lago Fagnano y el abra occidental del estrecho de Magallanes. La falla Magallanes-Fagnano ha tenido una importante actividad sísmica en tiempos históricos, generando varios sismos con magnitudes entre 7 y 8. Tolhuin dista apenas 1 km de la traza principal de esta falla.

En el sector argentino de Tierra del Fuego, una población de 200 mil habitantes se agrupa mayormente en tres núcleos urbanos: Río Grande (100 mil habitantes), Ushuaia (90 mil habitantes) y Tolhuin (2.500 habitantes). Tolhuin, principal objeto de este estudio, se ubica en la cabecera del lago Fagnano (Figura 1B). El crecimiento reciente de Tolhuin ha sido acelerado; el número de viviendas pasó de 245 en 1991 a unas 1.240 en la actualidad, y la población aumentó en 42% en los últimos 10 años.

Lo expuesto indica que Tolhuin está bajo una amenaza sísmica cierta (Abascal y González Bonorino, 2008; González Bonorino et al., 2012; Abascal et al., 2012). Abascal y González Bonorino (2008) presentaron una evaluación expeditiva del riesgo sísmico para Tolhuin, aplicando un programa de computación apadrinado por las Naciones Unidas, denominado Risk Assessment tools for Diagnosis of Urban areas against Seismic disasters (RADIUS). RADIUS es una herramienta diseñada para

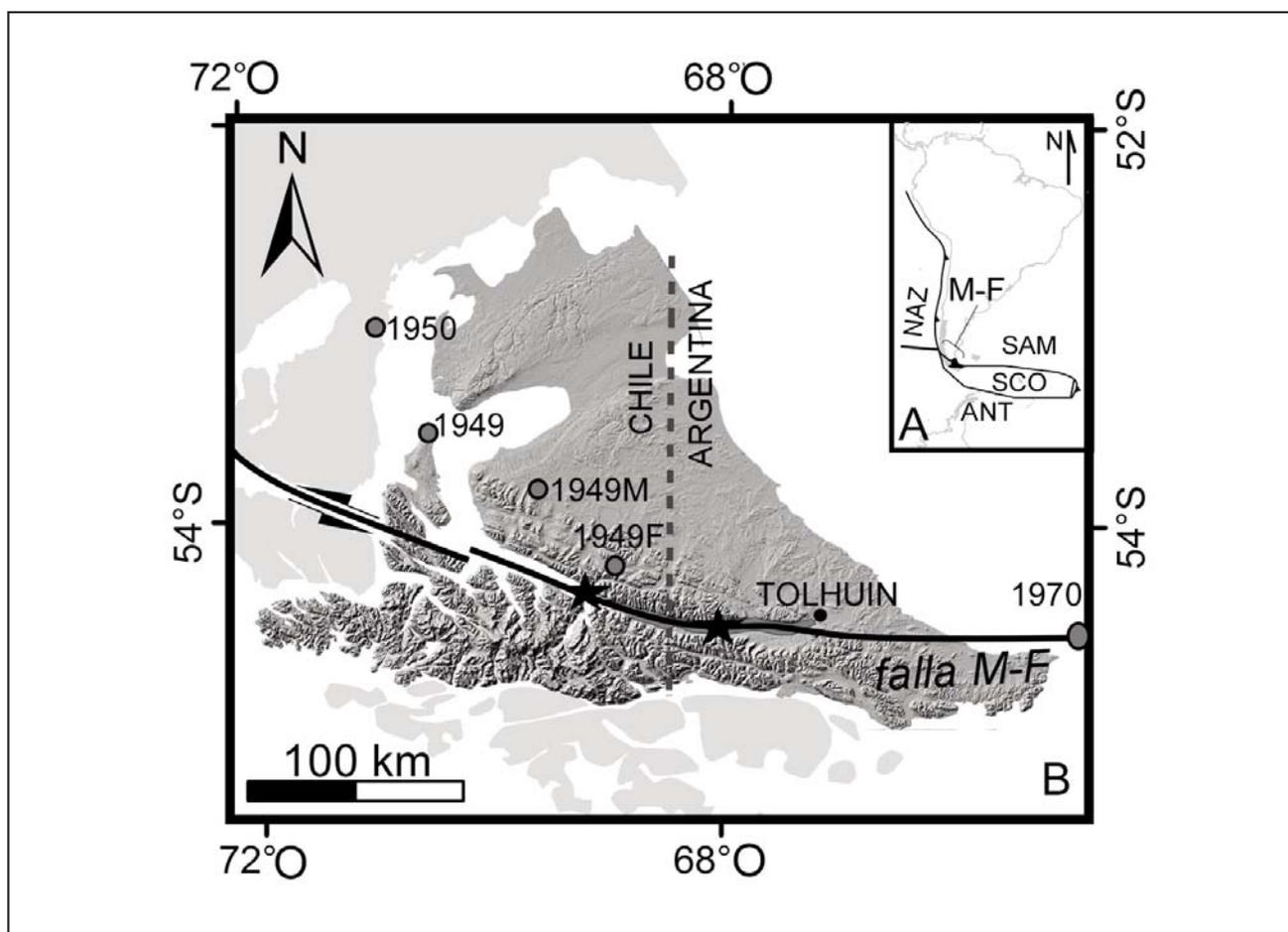


Figura 1. A. Ubicación de Tierra del Fuego en el contexto de Sudamérica. Las líneas negras representan los bordes de las placas tectónicas SCO - Scotia, SAM - Sudamericana, NAZ - Nazca, ANT - Antártica. Los triángulos negros dan la dirección de subducción. Se indica la traza de la falla Magallanes-Fagnano (M-F). B. Representación del relieve de Tierra del Fuego en base a un modelo digital de elevación ASTER GDEM 30 m. Se muestra la traza de la falla Magallanes-Fagnano; las flechas al oeste indican rechazo levógiro. Las estrellas dan la ubicación de los epicentros simulados. Los círculos corresponden a epicentros de los sismos mayores registrados y los años cuando ocurrieron. El lago Fagnano está indicado con rastra de puntos.

brindar una evaluación expeditiva, útil para ciudades con muy escasa información sobre la geología y la tipología edilicia. El análisis puso de manifiesto el potencial incremento de la amenaza por efecto del sustrato blando sobre el cual está construido Tolhuin, la condición de insuficiente sismorresistencia de muchas construcciones, y la conveniencia de una evaluación del riesgo más elaborada.

El presente trabajo actualiza y mejora el análisis con RADIIUS, incorporando información geotécnica y edilicia nueva y aplicando un moderno programa de cálculo del riesgo sísmico: Seismic Loss Estimation using a logic tree Approach (SELENA), versión 6.0 (Molina et al., 2010, 2014; descarga gratuita en <http://www.norsar.org>). SELENA estima el riesgo de daño a estructuras y personas en el caso de un evento sísmico, permitiendo anticipar las consecuencias de futuros terremotos y desarrollar estrategias para reducir el riesgo. Esta evaluación del riesgo sísmico para Tolhuin habrá de ser útil para la planificación de la expansión de la planta urbana, necesaria para acomodar el acelerado incremento poblacional. Adicionalmente, este estudio pone de manifiesto la conveniencia de revisar la zonificación sísmica para Tierra del Fuego, adecuándola a un modelo sismotectónico basado en la falla Magallanes-Fagnano.

MARCO GEOGRÁFICO Y GEOLÓGICO

La isla de Tierra del Fuego alberga el extremo austral de la Cordillera de los Andes, cuyo núcleo ocupa el sector occidental y austral de la isla, dando una topografía abrupta con crestas que superan los 2500 msnm. Hacia el norte y este las alturas descienden rápidamente hacia una llanura disectada que alcanza la costa sobre el océano Atlántico (Figura 1B).

El orógeno está constituido por un basamento metamórfico de edad Paleozoico superior a Cretácico inferior, recubierto en discordancia rocas sedimentarias y volcánicas de edad entre Cretácico superior y Terciario inferior (Caminos, 1980). Este sustrato fue deformado por compresión norte-sur entre el Cretácico tardío y el Terciario temprano, dando lugar a una estructura de corrimientos imbricados con vergencia septentrional (Menichetti et al., 2008). La compresión montó el orógeno sobre el cratón Sudamericano, generando una cuenca de antepaís en la cual se acumularon sedimentos marinos y continentales del Terciario superior (Menichetti et al., 2008). Aproximadamente a partir del Oligoceno, una vez concluida la fase principal de orogénesis, la isla fue afectada por esfuerzos transcurrentes asociados con el desarrollo del arco de Scotia; este campo de

esfuerzos se tradujo en una serie de fallas levóginas de rumbo aproximadamente este-oeste (*Diraison et al., 2000*). Aparentemente el sitio de fracturación migró de sur (canal Beagle) a norte (lago Fagnano), localizándose en el Holoceno en la falla Magallanes-Fagnano (*Klepeis, 1994*).

La falla Magallanes-Fagnano

La falla Magallanes-Fagnano es una fractura transcurrente, levógina, de unos 600 km de largo, cuya traza coincide parcialmente con la cuenca del lago Fagnano (*Menichetti et al., 2008; Waldmann et al., 2011*). Monitoreo con GPS indica que las placas Scotia y Sudamericana se desplazan relativamente a una velocidad de 0,67 a 0,96 cm/año (*DeMets et al., 1990; Smalley et al., 2003*). La falla es vertical, sellada a unos 15 km de profundidad, y genera sismos con focos mayormente entre 5 y 10 km de profundidad (*Smalley et al., 2003; Buffoni et al., 2009*). La corteza en Tierra del Fuego mide aproximadamente 28 a 34 km (*Lawrence y Wiens, 2004*), por lo cual los hipocentros son intracorticales. La actividad sísmica a lo largo de esta falla ha sido intensa en tiempos históricos. El 1 de febrero de 1879 ocurrió un sismo de magnitud cercana a $M=8$, estimada por el método de isosistas (*Martinic, 2008*). El 17 de diciembre de 1949, un sismo se manifestó con un 'foreshock' de $M=7,8$, la mayor magnitud registrada instrumentalmente en el sur de Sudamérica, seguido pocas horas después por un 'mainshock' de $M=7,8$; una réplica de $M=7$ ocurrió 40 días más tarde (*Pelayo y Wiens, 1989; Jaschek et al., 1982*). Otro evento sísmico de magnitud $M=7$ asociado a esta falla ocurrió el 15 de junio de 1970 (*Pelayo y Wiens, 1989*). Estrictamente la falla Magallanes-Fagnano constituye un conjunto de fallas escalonadas estrechamente agrupadas alrededor de una traza principal (*Lodolo et al., 2003*). La dispersión de las réplicas principales es de unos 130 km, de lo cual se puede inferir que éste es el largo aproximado de uno de los segmentos (*cf., Kanamori y Allen, 1986*). La marcada curvatura del tramo central de la falla define un segmento transpresivo ('restraining bend'), con mayor probabilidad de una ruptura sismogénica de magnitud elevada (*cf., Gómez et al., 2007*). En base a la tasa de deslizamiento ('slip rate'), *Smalley et al. (2003)* estimaron un período de recurrencia de 750 años para un sismo de $M=7,5$, equivalente a una probabilidad de ocurrencia de 7% en 50 años.

La falla Magallanes-Fagnano es la única fuente sismogénica que representa una amenaza seria para la población del sector argentino de Tierra del Fuego. Esto es así porque la zona de subducción entre las placas Antártica y Sudamericana, que bordea la isla por el oeste y sudoeste, es de baja sismicidad y está lejos (*González Bonorino et al., 2012*).

Geotecnia

La urbanización de Tolhuin se extiende desde la ruta nacional N° 3, a unos 120 msnm, hasta la costa del lago Fagnano, a cotas de 22 msnm, apoyando mayormente sobre depósitos de origen glacial que cierran parcialmente por el este la cuenca del lago Fagnano (*Coronato et al., 2009; Esteban et al., 2014*). Un relevamiento geológico superficial distinguió diamictita proglacial, con clastos dispersos en una matriz arcillosa compacta y maciza, arenas y limos glaciales con estructuras tractivas, y arcillas glaciales laminadas (Figura 2A). La estratigrafía local se estableció merced a una perforación hasta 120 m de profundidad, acompañada un sondeo eléctrico vertical, gestionada por el Consejo Federal de Inversiones (Figura 2B; *CFI, 1996*). El casco céntrico se desarrolla sobre capas arcillosas, glaciales, cubiertas por un delgado manto de derrubio de falda.

Ensayos CBR (California Bearing Ratio) relevados por la Dirección Nacional de Vialidad durante la construcción de la ruta nacional N° 3 (*DNV, 2004*), en pozos de hasta 7 m de profundidad, dieron un valor medio CBR = 20%, correspondiendo a una velocidad de corte $V_s = 200$ m/seg, aproximadamente (*Rosyidi et al., 2006*). Esta velocidad corresponde a suelo blando de clase D en la clasificación NEHRP (*National Earthquake Hazards Reduction Program; FEMA, 2003*). Por debajo

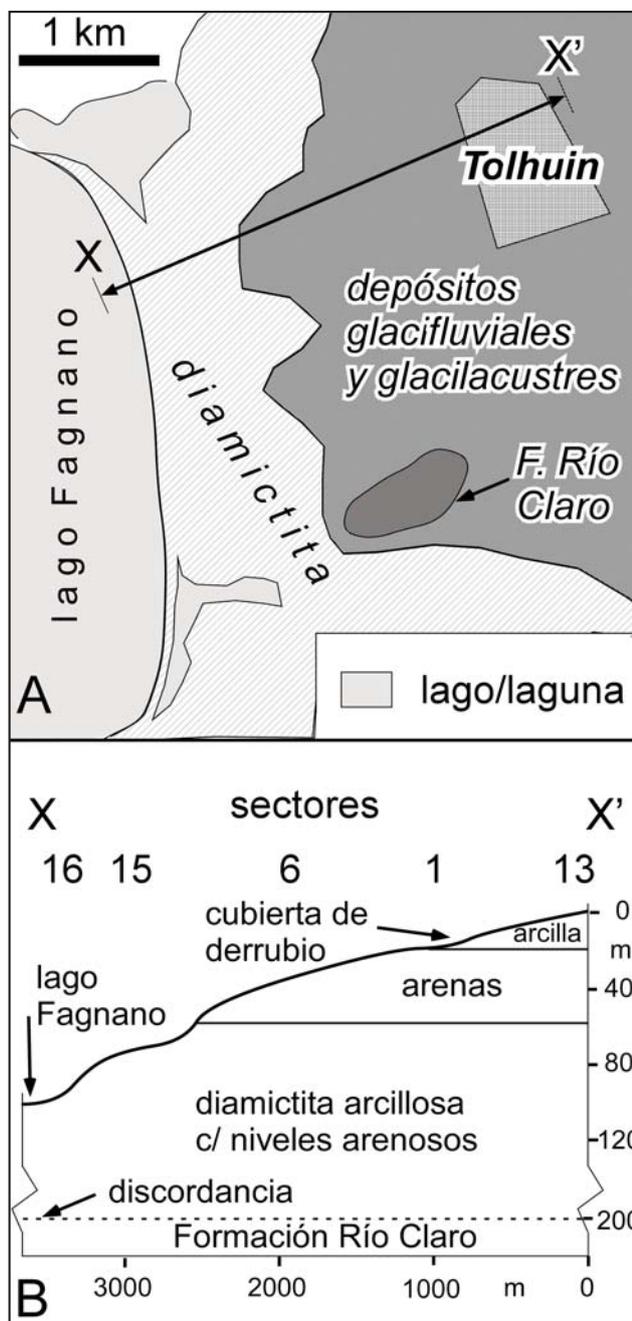


Figura 2. A. Geología simplificada entre Tolhuin y el lago Fagnano. El casco céntrico está representado por una rastra cuadrículada. Parcialmente basado en Lakefield Research (2000). B. Estratigrafía bajo la urbanización de Tolhuin. Se indica la posición de algunos de los sectores de la microzonificación. La ubicación del perfil estratigráfico se indica con X-X' en el panel A. Espesores y litologías dominantes parcialmente basados en CFI (1996).

predominan niveles arenosos, hasta una profundidad de aproximadamente 50 m. Más abajo sigue una diamictita glacial limo arcillosa, plástica y compacta, con abundantes rodados dispersos, alternando con intercalaciones de arena particularmente abundantes entre cotas de 60 y 20 msnm. Esta diamictita subyace el faldeo inferior y está cubierta por grava de playa moderna sobre la costa del lago Fagnano. Por datos de la literatura se atribuye a esta diamictita una velocidad de corte $V_s = 400$ m/seg (e.g., Bradley et al., 1998). Esta velocidad corresponde a suelo firme clase C en la clasificación NEHRP (FEMA, 2003). El basamento consiste de estratos consolidados de arenisca y conglomerados de la Formación Río Claro (Terciario inferior; Caminos, 1980), con techo a 200 m de profundidad; esta roca no aflora en la zona urbana y no oficia de sustrato para las construcciones.

En el pasaje de roca a suelo firme o blando, la amplitud de una onda sísmica suele aumentar considerablemente. Un análisis del perfil estratigráfico de Tolhuin empleando el programa EERA (Equivalent-linear Earthquake site Response Analyses of Layered Soil Deposits; Bardet et al., 2000), indicó una posible amplificación por un factor de hasta 2 en la capa arcillosa superior (Figura 3).

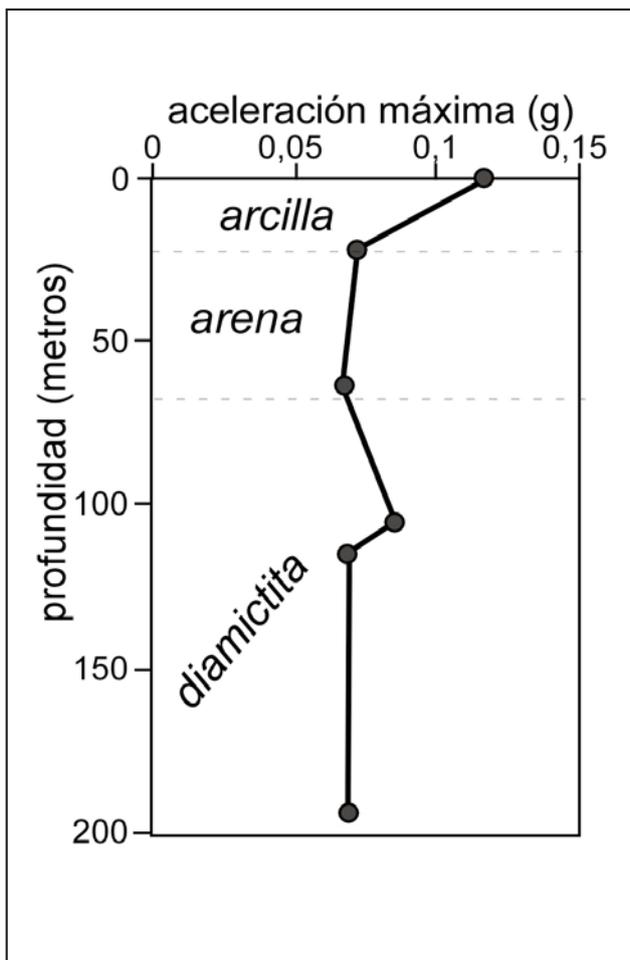


Figura 3. Resultado de la modelización con el programa EERA. El intervalo arcilloso superior, de 22 metros de potencia, es particularmente sensible a las vibraciones y amplifica considerablemente el movimiento sísmico. El intervalo con diamictita puede dar amplificación en partes.

MODELIZACIÓN CON SELENA

SELENA se enfoca sobre dos de las posibles consecuencias de un terremoto, los daños a edificios y las lesiones a personas. La metodología implementada en SELENA está basada en la del programa HAZUS-MH (FEMA, 2003), una poderosa herramienta para el cálculo de riesgo de origen natural implementada por la agencia federal de emergencia ambiental de los EEUU (Federal Emergency Management Agency, FEMA). A diferencia de HAZUS-MH, cuyos resultados son estimaciones óptimas, SELENA trabaja con un esquema de árbol lógico y así toma en cuenta la indeterminación en los valores de ciertos parámetros. SELENA supone que el sustrato de las construcciones se comporta de modo elástico o plástico y no considera fenómenos de licuefacción.

Los datos de ingreso necesarios para operar con SELENA son aquellos que describen la fuente sismogénica y la atenuación de la energía sísmica con la distancia al epicentro, la cualidad sismorresistente y el valor monetario (por m^2) de las construcciones, y cierta información demográfica. La secuencia operativa de SELENA se resume en el diagrama de flujo de la Figura 4. La estructura de árbol lógico permite que para una misma variable se ingresen valores diferentes, ponderados según la presunta influencia sobre el riesgo, con el propósito de abarcar la incertidumbre epistémica así como la variabilidad natural del fenómeno sísmico, y de factores económicos y sociales. En la Tabla 1 se describe el contenido de los archivos empleados en

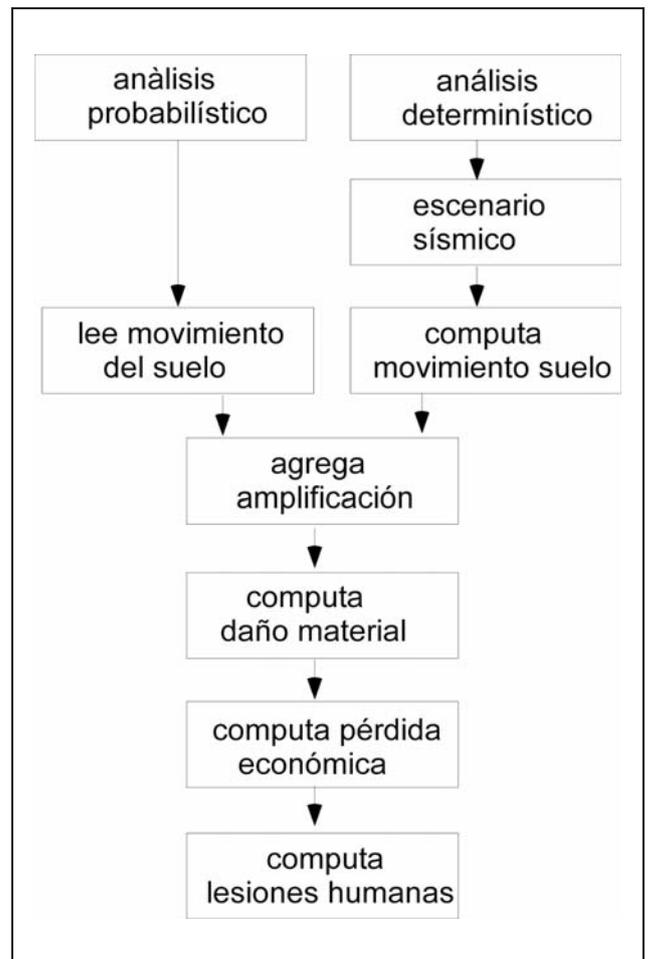


Figura 4. Diagrama de flujo que representa la secuencia operativa del programa SELENA.

este estudio. Los procesos de análisis probabilístico y determinístico se distinguen en que el determinístico calcula el valor de la aceleración del suelo en base a los datos de atenuación y sismicidad, mientras que el probabilístico lee esos valores de un archivo de entrada. Se corrieron dos simulaciones determinísticas y una probabilística.

Relación de atenuación sísmica

Las relaciones de atenuación sísmica se clasifican, según el contexto tectónico de los sismos en que se fundamentan, como : de continente estable, de subducción y de corteza tectónicamente activa (Douglas, 2011). El sector argentino de Tierra del Fuego, caracterizado por sismos someros en una situación alejada de una zona de subducción, califica en la última categoría. Las relaciones de atenuación propuestas por Boore y Atkinson (2008) y por Campbell y Bozorgnia (2003, 2008), están basadas en sismos intracorticales y con distancias al epicentro inferiores a unos 100 km, y son aplicables a la zona de interés. Se seleccionaron dos epicentros hipotéticos, uno coincidente con el sitio del 'foreshock' del 17/12/1949, a 120 km de Tolhuin, y el otro situado arbitrariamente 30 km al oeste de

Tolhuin. En ambos casos se adoptó $M=7,8$, magnitud registrada instrumentalmente en el pasado. Estos eventos representan una potencial actividad en el tramo transpresivo ('*restraining bend*') de la falla Magallanes-Fagnano. Para el epicentro lejano (120 km), las relaciones de Boore y Atkinson y de Campbell y Bozorgnia predicen similares valores de atenuación. Para el epicentro cercano (30 km), en cambio, las relaciones de Campbell y Bozorgnia (2003) y de Campbell y Bozorgnia (2008) predicen valores de atenuación respectivamente menores y mayores que la de Boore y Atkinson (2008) (Figura 5). Por simplicidad se optó por emplear la relación de Boore y Atkinson (2008) para ambos epicentros en el archivo 'attenuation.txt'. Esta relación emplea la distancia Joyner-Boore, o distancia mínima entre el sitio y el plano de ruptura. Para un sismo de $M=7,8$, el largo del plano de ruptura es de unos 160 km (cf., Wells y Coppersmith, 1994), y, debido al rumbo de la falla Magallanes-Fagnano respecto de Tolhuin, la distancia Joyner-Boore es considerablemente menor que la distancia epicentral: 73 km para el sismo lejano y 5 km para el cercano. Esto da valores de aceleración pico en suelo tipo D del orden de 0,51g para el sismo cercano y de 0,12g para el sismo lejano.

Tabla 1. Archivos con datos de ingreso. Aquellos identificados con * se emplean únicamente en el análisis determinístico y aquellos identificados con ** únicamente en el análisis probabilístico; los demás son comunes a ambos tipos de análisis. (i comodín, PGA Peak Ground Acceleration, Sa0,3 aceleración espectral para período 0,3 segundos, Sa1,0 aceleración espectral para período 1 segundo).

soilfiles.txt	refiere a los archivos soilcenteri.txt; puede incluirse más de un archivo con ponderación relativa
soilcenteri.txt	coordenadas del centro de cada sector en que se dividió la ciudad y el tipo de suelo dominante en esa zona (clasificación del NEHRP, National Earthquake Hazards Reduction Program; ver texto); ponderación relativa
vulnerability.txt	refiere al conjunto de 2 archivos: capacityi.txt y fragilityi.txt; puede incluirse más de un conjunto con ponderación relativa
capacityi.txt	parámetros para calcular el límite de resistencia elástica a la deformación horizontal de un edificio (tomados de FEMA, 2003)
fragilityi.txt	parámetros para calcular la probabilidad de que el valor de la deformación horizontal de un edificio caiga dentro de un cierto nivel de daño, o lo supere (tomados de FEMA, 2003)
ecfiles.txt	refiere al conjunto de 4 archivos: elosssdi.txt, elossmdi.txt, elosseddi.txt, y elosscdi.txt; puede incluirse más de un conjunto ponderación relativa
eloss_i.txt	costo monetario estimado, por m ² de construcción, para reparar o reemplazar el daño estructural
builtarea.txt	superficie en m ² que ocupa cada uno de los tipos estructurales de edificación considerados en la simulación
numbuild.txt	número de edificios de cada tipo estructural considerado en la simulación
ocupmbti.txt	m ² adjudicados a cada una de las categorías de uso en cada uno de los tipos estructurales de edificación considerados en la simulación
population.txt	número de habitantes en cada sector en que se dividió la ciudad
poptime.txt	proporción de la población que se encuentra fuera o dentro de un edificio según las franjas horarias matutina (10 horas), vespertina (17 horas) y nocturna (2 horas) y el tipo de ocupación de cada edificio
ocupmbtp.txt	distribución de la población entre los distintos tipos estructurales de edificación
injuryi.txt	número de lesionados y muertes, según el nivel de daño estructural, para cada uno de los tipos estructurales de edificación, clasificado por gravedad de las lesiones; valores tomados de tablas 13.3 a 13.7 en FEMA (2003)
debris.txt	toneladas/100 m ² de escombros según tipo de construcción; tabla 12.1 en FEMA (2003)
earthquake.txt*	máximo terremoto considerado: coordenadas del epicentro, magnitud, rumbo e inclinación de la falla asociada, y profundidad al foco
attenuation.txt*	relaciones de atenuación empleadas para estimar PGA, Sa0,3 y Sa1,0; ponderación relativa
shakefiles.txt**	refiere a los archivos shakecenteri.txt; puede incluirse más de un archivo con ponderación relativa
shakecenteri.txt**	valores de PGA, Sa 0,3 seg y Sa 1,0 seg para cada sector

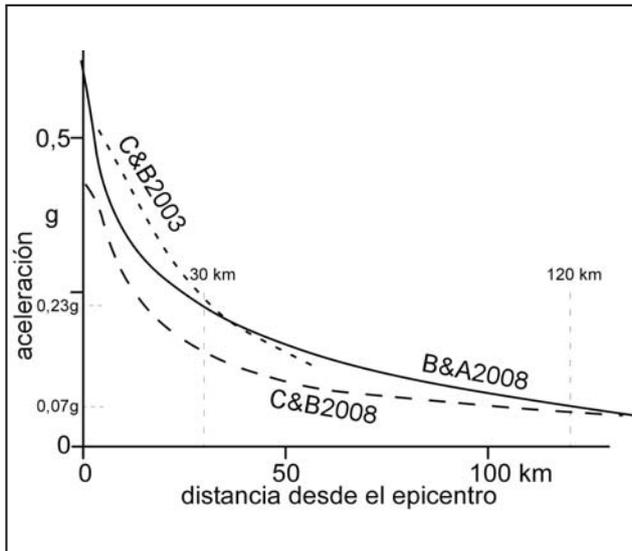


Figura 5. Relaciones de atenuación de Campbell y Bozorgnia (2003; C&B2003), Campbell y Bozorgnia (2008; C&B2008) y Boore y Atkinson (2008; B&A2008), graficadas en entorno OpenSHA (Field et al., 2003), con $V_{s30}=300$ m/seg². La aceleración del suelo está dada en fracciones de la aceleración de la gravedad, g.

Microzonificación sísmica

La microzonificación sísmica consiste en subdividir el área urbana en sectores distintivos, ya sea por el tipo dominante de edificación, por la naturaleza geotécnica del sustrato, por la densidad de población, u otro factor de interés en el cómputo del riesgo. La zona urbana de Tolhuin fue dividida en diecisiete sectores (Figura 6). Los sectores 2, 3, 4, y 7 comprenden el casco céntrico y comercial, el sector 13 es predominantemente industrial, y los demás son mayormente residenciales. Los sectores 1 a 5, y 7 a 13, ocupan terreno alto, a cotas entre 60 y 90 m sobre el nivel del lago Fagnano. El sector 12 comprende un barrio de casas gemelas, aislado del resto de la urbanización. Los sectores 6 y 14 a 17 ocupan el faldeo que desciende hasta la playa de grava sobre el lago Fagnano, y comprende principalmente viviendas y cabañas turísticas. Para cada sector se estimó la población, el tipo de edificación, el número de edificios de cada tipo y la superficie ocupada por cada tipo de edificación.

Población e infraestructura edilicia

El censo 2010 estimó la población de Tolhuin en 2400. Para el presente estudio se supuso un leve incremento en la población, a 2500 habitantes, desde la fecha del censo. Las ocupaciones dominantes son asalariados en establecimientos productivos mayormente ligados a la industria maderera, empleados públicos, y proveedores de servicios varios.

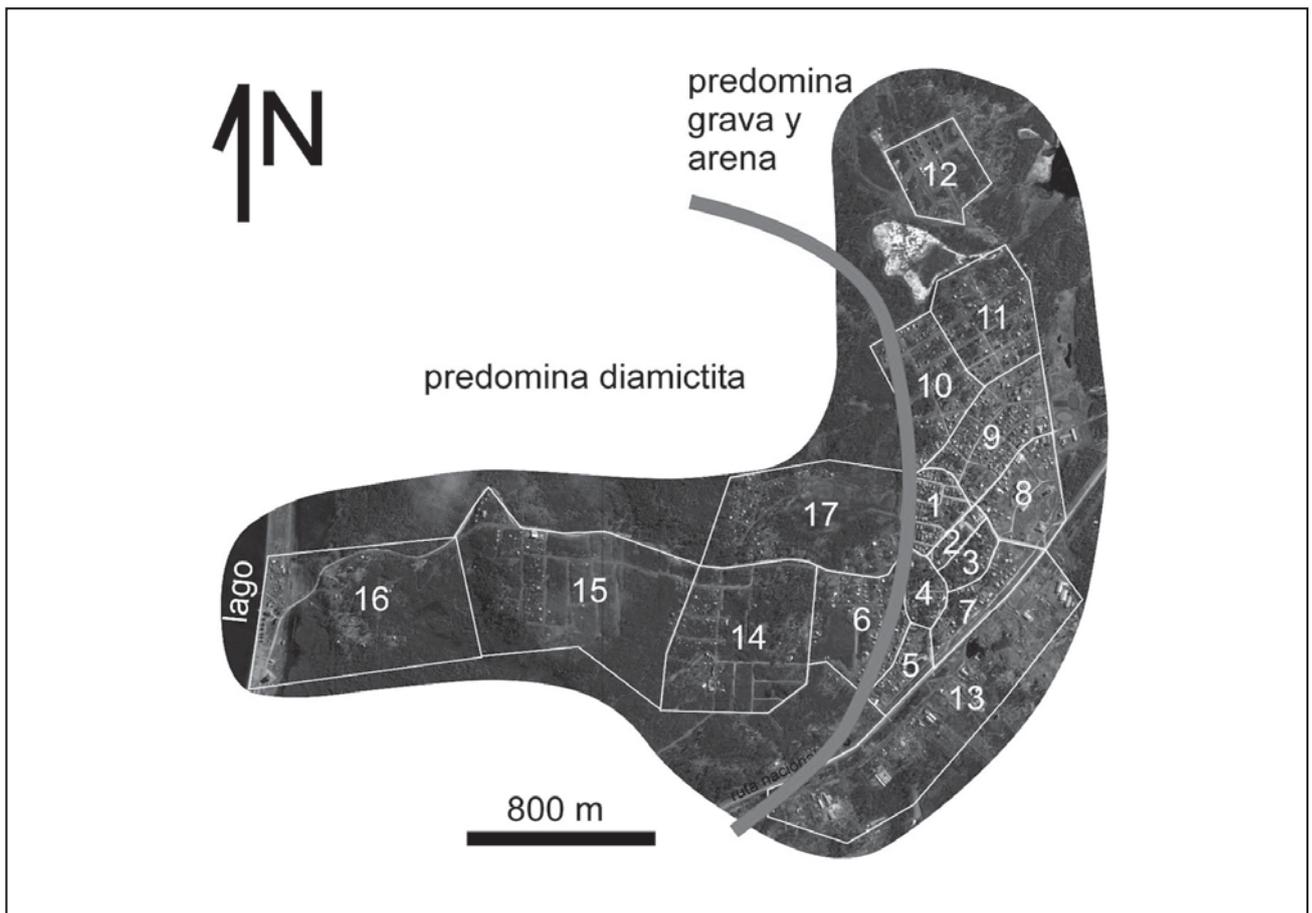


Figura 6. Imagen de Google Earth de la urbanización de Tolhuin con la división en sectores y la distribución de los principales tipos de sustrato. Al oeste de la línea naranja el sustrato dominante es una diamicictita arcillosa, mientras que al este domina grava y arena, con estratos de arcilla.

La urbanización de Tolhuin es relativamente joven, en general tiene menos de 20 años. Una pequeña fracción de las construcciones, menos del 10% en número, comprende escuelas, centros comunitarios (biblioteca, iglesias), centros de salud, sedes del gobierno y de las fuerzas de seguridad (bomberos, policía) y conjuntos de viviendas económicas. La construcción de estos edificios fue gerenciada por entes gubernamentales como el Instituto Provincial de la Vivienda (IPV) y el Ministerio de Educación, y es razonable suponer que se adecuan a las normas de sismorresistencia INPRES-CIRSOC 103. El resto de las edificaciones, mayormente viviendas familiares y galpones de chapa, que constituyen la mayor parte del inventario edilicio es posible que no cumplan plenamente con dichas normas.

El número total de edificios en Tolhuin se estimó en 1240, con una superficie construida de alrededor de 135.000 m². Estos valores se obtuvieron de la inspección de una imagen de Google Earth de 2006 y de estimaciones del censo 2010. El número de edificios y la superficie construida por sector y por tipo estructural se incluyeron en los archivos 'builtarea.txt' y 'num-build.txt'.

El inventario edilicio se llevó a cabo de manera expeditiva por observaciones de terreno. Ante un evento sísmico, el daño que puede afectar un edificio depende esencialmente de la altura, de los materiales que lo componen, y del diseño estructural, condiciones que varían notoriamente entre edificios. Los edificios en Tolhuin son de una planta en más del 95% de los casos. El manual *FEMA 154 (2002)* contiene una tipología

edilicia apropiada para una inspección visual expeditiva, tipología que fue adoptada en SELÉNA. Empleando esta tipología, las construcciones en Tolhuin se han agrupado en tres grandes tipos estructurales: hormigón, metal y madera. Entre las estructuras de hormigón se distinguen dos subtipos: C1L, vigas, columnas, pisos y paredes de hormigón armado (Figura 7A) y C3L, paredes de mampostería no reforzada, con columnas y vigas de hormigón armado (Figura 7B). Entre las metálicas se distinguen: S3, paredes y techo de chapa, y S5, techo y piso en metal o hormigón y paredes de mampostería. Sólo se reconoció un tipo de estructura en madera, W1, con base de losa o de madera (Figura 7C). Un tipo adicional, URML, consiste de paredes de mampostería no reforzada, y techo de madera o chapa, con o sin losa.

Las construcciones de madera (W1), mayormente viviendas familiares pero también algunos comercios, comprenden un 4% en superficie, y un 7% del número total de construcciones. Este tipo es más común sobre el faldeo que desciende al lago Fagnano. Las estructuras metálicas (S3 y S5; 16% en superficie y 6% en número) corresponden a los numerosos galpones, concentrados al este de la ruta 3. Las construcciones C1L (7% en superficie y 6% en número) comprenden la mayor parte de los edificios públicos construidos por organismos nacionales y de las viviendas construidas por el IPV, y las C3L (70% en superficie y 78% en número) corresponden principalmente a viviendas familiares y a locales comerciales. Las construcciones no reforzadas (URML; 3% en superficie y en número) son viviendas precarias.



Figura 7. Ejemplos de los principales tipos edilicios en Tolhuin. A - Escuela (C1L). B - Vivienda de mampostería (C3L). C - Vivienda de madera (W1).

De acuerdo al uso, o modo de ocupación, que se hace de ellos, los edificios se clasificaron en: residencial (casas separadas, condominios, hospedajes; RES), comercial (locales comerciales, estación de servicio, restaurante/bar; COM), industrial (industria liviana, como aserraderos; IND), religioso (iglesias; REL), gubernamental (sedes del poder político y de servicios como hospitales; GOV), y educativo (escuelas, bibliotecas; EDU), y se estimó sobre el terreno la proporción de la superficie construida que ocupa cada uno de estos usos (archivo 'ocupmbti.txt'). Estos datos son relevantes para estimar el riesgo para las personas según la hora en que ocurre un sismo. En el horario nocturno, las 2 horas, el sismo afectará preferencialmente a personas en edificios de uso residencial, mientras que en el horario diurno, 10 horas, la mayor parte de la población estará en sus lugares de trabajo y estudio. La simulación supone que el 98% de la población está en residencias permanentes en el horario nocturno, contra 10% en el horario matutino.

Sismorresistencia

Las vibraciones sísmicas imponen una demanda sobre la capacidad de una estructura para resistir los esfuerzos horizontales que puedan causar una deformación permanente en ella. Esa capacidad puede representarse mediante curvas de capacidad espectral, o espectros de capacidad (*ATC-40, 1996*). De modo simplificado, y en un espacio aceleración-desplazamiento horizontal, una curva de capacidad espectral queda definida por el origen, un punto de cedencia, o de fluencia (*Ay, Dy*) y un punto de resistencia última (*Au, Du*), que precede al colapso (Figura 8A). Entre el origen y el punto de cedencia se supone que la estructura se comporta de modo elástico, y que pasado ese punto lo hace de modo plástico. En rigor, la curva representa el comportamiento promedio ponderado de los numerosos componentes estructurales de un edificio, cada uno de los cuales responde a los esfuerzos de modo particular.

La sismorresistencia de cada uno de los tipos estructurales reconocidos en Tolhuin se representó mediante curvas de capacidad espectral, con parámetros tomados de tablas en FEMA (2003), e incorporados en los archivos 'capacity.txt' de *SELENA*. *FEMA (2003)* agrupa las curvas de capacidad en cuatro clases, según el grado de adecuación a las normas de edificación sismorresistente actualmente vigentes en los Estados Unidos: (a) 'pre-code' – aquellas que mayormente describen edificaciones antiguas, previas a la implementación generalizada de las normas edilicias de sismorresistencia, (b) 'low-code' y (c) 'moderate-code' – curvas representativas de construcciones que cumplen con algunos de los preceptos de la sismorresistencia, y (d) 'high-code' – aquellas propias de edificios modernos, adecuados a las normas más estrictas. En la Figura 8 se grafican curvas de capacidad espectral para las tres tipologías edilicias simuladas para Tolhuin. Se trata de curvas promedio, que se aplican a un conjunto edilicio con características estructurales similares y no a edificaciones individuales.

En la simulación con *SELENA* se supuso que todas las construcciones en Tolhuin cumplen con al menos algunas de las normas sismorresistentes, es decir, están por encima del nivel 'pre-code'. Las viviendas precarias, del tipo edilicio URML, probablemente clasifiquen como 'pre-code', pero debido a su baja representatividad, en la simulación de daños fueron incluidas en la categoría 'low-code', de la tipología en hormigón. Los edificios públicos probablemente cumplen plenamente con la reglamentación *INPRES-CIRSOC 103*, y califican para curvas 'high-code'. El resto de las construcciones se distribuye en

las categorías 'low-code' y 'moderate-code'. En la simulación se recurrió a una estructura de árbol lógico, empleando tres archivos de capacidad, respectivamente con probabilidades 50% 'low-code', 40% 'moderate-code' y 10% 'high-code'; las tres tipologías edilicias fueron representadas por los espectros de capacidad C1L (hormigón), W1 (madera) y S3 (metal).

Espectros de diseño

Las vibraciones del suelo se transfieren a las estructuras, generando en éstas aceleraciones, velocidades y desplazamientos que pueden inducir deformaciones más o menos destructivas, y que dependen fuertemente del período de la vibración y también de las propiedades geotécnicas del sustrato. El espectro de diseño es una adecuada representación de este fenómeno. El espectro de diseño puede representarse en un espacio aceleración espectral, *Sa(g)*, versus desplazamiento horizontal, *Sd(m)*. La Figura 8 muestra espectros de diseño *Sa/Sd* para suelo tipo D: "Suelo cohesivo consistente, de baja plasticidad. Gravillas y/o arenas de baja densidad" (Tabla 2.2 en *INPRES-CIRSOC 103, 2003*), que se considera representativo del potente espesor de gravas, arenas y pelitas que subyace Tolhuin, y para niveles de aceleración correspondientes a las zonas sísmicas 2 y 4 definidas en *INPRES-CIRSOC 103 (2013)*.

Punto de desempeño

La intersección en el plano *Sa/Sd* de un espectro de capacidad y un espectro de diseño define un punto de desempeño (Figura 8A). Este punto permite estimar la capacidad de una determinada estructura para resistir una demanda sísmica dada, es decir, el valor de desplazamiento máximo que podrá soportar. *SELENA* calcula estos valores para cada tipología edilicia y con ellos inspecciona las curvas de fragilidad, o de vulnerabilidad edilicia, pertinentes para esa tipología, contenidas en el archivo 'fragility(i).txt', con el fin de calcular la probabilidad de que el edificio alcance, o exceda, un determinado nivel de daño: nulo, leve, moderado, extenso y total. El punto de desempeño resulta de un proceso iterativo, método del espectro de capacidad ('*Capacity Spectrum Method*', *ATC-40, 1996*), que involucra un progresivo aumento del amortiguamiento del espectro de demanda. En la Figura 8A se ilustra el concepto empleando la intersección con el espectro elástico, 5% de amortiguamiento.

Valuación de los daños materiales y humanos

El costo monetario por daños edilicios, definido en los archivos 'loss_i.txt', se estimó en base a la superficie cubierta, suponiendo un costo de construcción por m² de \$4.000 para edificios de madera (W1) y de \$5.000 para el resto. *SELENA* estima los perjuicios a las personas, expresados como heridas leves a mortales. La información necesaria está incluida en los cuatro archivos 'injury(i).txt', que corresponden a cuatro niveles de gravedad de lesiones: 1 - heridas leves, 2 - heridas que requieren atención profesional pero sin peligro de vida, 3 - heridas que hacen peligrar la vida, y 4 - heridas mortales. Para estimar este tipo de daños se empleó la rutina en *SELENA* 'Basic methodology'.

RESULTADOS

Se corrieron sendas simulaciones determinísticas para el epicentro lejano y el cercano, y una simulación probabilística combinando ambos epicentros. En los tres casos se aplicó un árbol lógico con tres ramas de espectros de capacidad: 'low-code', 'moderate-code' y 'high-code', ponderados al 50, 40 y

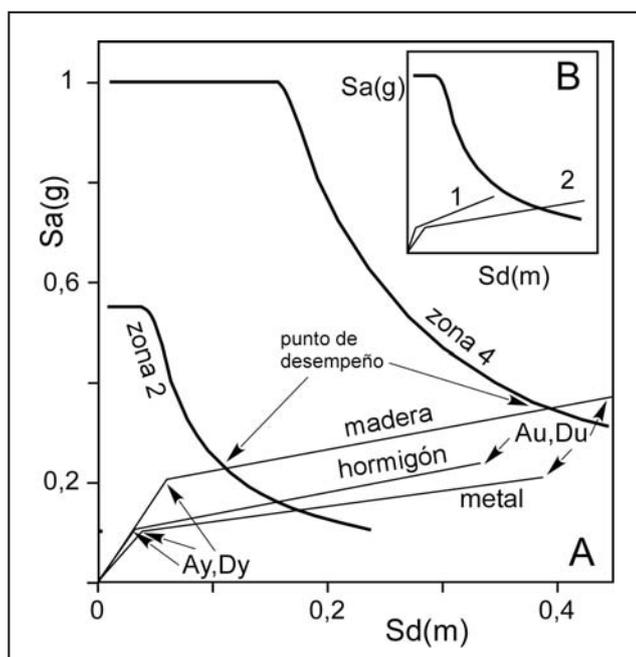


Figura 8. A. Espectros de diseño sísmico en formato aceleración-desplazamiento para las zonas 2 y 4, construidos según normas en INPRES-CIRSOC 103 (2013); corresponden a suelo tipo D, moderadamente dúctil. Se grafican también las curvas de capacidad espectral 'low-code' para las tres tipologías edilicias simuladas para Tolhuin, con parámetros tomados de Molina et al. (2014). Se indican los puntos de desempeño iniciales, sobre los espectros de demanda elástica. B. Definición de sismorresistencia. La hipotética demanda sísmica excede la resistencia última del edificio representado por el espectro de capacidad 1, el cual probablemente colapsaría; en cambio, el espectro de capacidad 2 sí resistiría dicha demanda sin colapsar.

10%. La Tabla 2 resume los resultados para daños edilicios por metro cuadrado y en pesos, según el tipo de edificación y la naturaleza geotécnica del sustrato, para cada sector urbano. Sólo se presentan los porcentajes de construcciones que habrían sufrido daños entre moderado y colapso total. En el caso del sismo lejano, entre 1 y 8% de las construcciones sufrirían daños moderados y mayores, y las pérdidas materiales serían relativamente poco onerosas, de unos pocos millones de pesos (Tabla 2, columna 6). En el caso del sismo cercano, entre el 45 y el 88% de la superficie edificada sufriría daños moderados y mayores, con pérdidas materiales valuadas en más de 100 millones de pesos (Tabla 2, columna 7). Las construcciones en madera surgen como las menos afectadas en ambos escenarios. Las estructuras en metal aparecen como levemente menos resistentes a la deformación que las de hormigón para vibraciones moderadas, pero más resistentes para vibraciones fuertes. La modelización probabilística sugiere pérdidas monetarias intermedias, de entre 1 y 11 millones de pesos por sector urbano (Tabla 2, columna 8). En general, los sectores urbanos que apoyan sobre suelo blando, tipo 4 (diamictita arcillosa), se verían más afectados. La simulación resultó en una baja probabilidad de heridos y víctimas fatales. En el caso del sismo cercano, en el sector 6, con una población estimada en 400 personas, habría menos de cinco heridos leves en el horario nocturno (2 horas), y menos de uno en el horario matutino (10 horas).

DISCUSIÓN

La diversidad geotécnica del sustrato en Tolhuin constituye un factor importante en la vulnerabilidad. La diamictita que subyace el faldeo posiblemente esté suficientemente compactada como para no contribuir significativamente a la amplificación, excepto en ciertos tramos. Aun así, el mayor daño potencial estaría parcialmente contrarrestado por la baja densidad de construcciones. La unidad arcillosa superior, en cambio, es propensa a amplificar las vibraciones sísmicas del suelo superficial. La estimación con EERA indica una potencial amplificación por un factor 2, con este valor la aceleración pico para el epicentro lejano podría alcanzar 0,13 g, y para el epicentro cercano 0,55g, ambos valores potencialmente dañinos.

El Instituto Nacional de Prevención Sísmica (INPRES) ha establecido la zonificación sísmica para la Argentina con cinco niveles de peligrosidad, 0 el más bajo a 4 el más alto, y en base a dicha zonificación determina la rigurosidad de la aplicación de las normas de sismorresistencia (*INPRES-CIRSOC 103, 2013*). Tierra del Fuego comprende tres zonas, 1, 2 y 3, de intensidad creciente hacia el oeste-sudoeste, y orientadas con rumbo NNO-SSE (Figura 9A). Tolhuin está situado en zona 2, definida como de peligrosidad moderada, y caracterizada por una aceleración máxima del suelo de 0,18g (*INPRES-CIRSOC 103, 2013*). La orientación NNO-SSE de las zonas sísmicas en Tierra del Fuego refleja la adopción de un modelo tectónico donde la principal fuente sismogénica se encuentra sobre la margen del continente sudamericano que linda con el océano Pacífico. Este modelo es válido al norte de la dorsal de Chile (ca 52°S) donde la sismicidad está dominada por la rápida convergencia de la placa de Nazca, a una velocidad de 8 cm/año. Al sur de esa dorsal, la placa Antártica converge a una velocidad baja de 2,4 cm/año y genera una sismicidad débil (*Barrientos, 2007*) que no implica amenaza de daño para el sector argentino de Tierra del Fuego, distante más de 200 km de esa zona de subducción en distancia horizontal y posiblemente más de 80 km en distancia vertical hasta la zona de Benioff.

Para la Tierra del Fuego argentina la única fuente sismogénica de interés es la falla Magallanes-Fagnano (*González Bonorino et al., 2012*). Empleando el programa OpenSHA (*Field et al., 2003*) se calculó la distribución probabilística de aceleraciones del suelo referidas a la falla Magallanes-Fagnano. En la modelización se supuso que cada punto sobre la traza de la falla tiene igual probabilidad de generar un sismo de magnitud $M=8$. Con este modelo tectónico, la zonación sísmica es paralela y simétrica a la traza de la falla (Figura 9B), y Tolhuin queda situado en la zona 4 de peligrosidad sísmica, caracterizada por una aceleración pico del suelo de 0,35g (*INPRES-CIRSOC 103, 2013*). La peligrosidad sísmica para Tolhuin es, pues, similar a la de San Juan con el terremoto de 1944 ($M=7,4$) y de Cauce en 1977 ($M=7,5$).

Las curvas espectrales 'low-code' para tipologías en madera, hormigón y metal intersectan la rama descendente del espectro de zona 2 para suelo tipo D en sus sectores plásticos (Figura 8A). Esto implica que probablemente sufrirían deformación permanente, pero sin llegar al colapso, en el caso de un sismo moderado. Si se diera un sismo fuerte, propio de zona sísmica 4, sin embargo, las construcciones 'low-code' en hormigón y metal alcanzarían condiciones de colapso; sólo las de madera podrían resistir las deformaciones asociadas. Estos resultados remarcan la necesidad de ejecutar un relevamiento geotécnico más detallado y una inspección rigurosa de la calidad sismorresistente de las construcciones existentes en Tolhuin,

Tabla 2. Porcentaje de daños edificios de gravedad moderada a total, según sector (columna 1), tipo de suelo (columna 2), y tipo de construcción (columnas 3 a 5) para el epicentro lejano (L) y cercano (C), de acuerdo con la modelización determinística. Las columnas 6 a 8 dan una estimación del valor monetario de los daños materiales según la modelización determinística (columnas 6 y 7), y probabilística (MP, columna 8).

1	2	Modelización determinística								MP	
		3		4		5		6		7	8
		Madera (W1)		Metal (S3/S5)		Hormigón (C1L, C3L)		millones de \$		millones de \$	
Sector	suelo	L %	C %	L %	C %	L %	C %	L	C	millones de \$	
1	4	2,5	58	7,3	79	5,7	86	0,9	50	11	
2	4	2,5	59	7,5	79	5,7	86	0,2	9	2	
3	4	2,5	59	-	-	5,6	86	0,2	9	1,9	
4	3	-	-	3,6	66	2,1	74	0,1	8	1,4	
5	3	1,0	45	3,6	68	2,1	76	0,1	10	2	
6	4	-	-	7,6	77	5,7	84	0,6	31	7	
7	3	1,0	49	3,6	72	2,1	79	0,1	9	1,4	
8	3	-	-	3,5	69	2,1	77	0,2	22	3,3	
9	3	1,0	46	3,6	68	2,1	76	0,4	37	6	
10	3	-	-	3,7	68	2,1	76	0,2	17	2,7	
11	3	-	-	4,0	66	2,1	74	0,03	3	4,8	
12	3	-	-	-	-	2,1	72	0,1	9	1,7	
13	4	-	-	7,5	79	5,5	85	0,7	20	4,6	
14	4	2,5	58	7,8	79	5,8	85	0,2	9	2	
15	4	2,6	59	8,0	80	6,0	86	0,2	8	1,8	
16	4	2,8	63	-	-	6,2	88	0,1	5	1	
17	4	2,5	60	-	-	5,8	86	0,2	8	1,8	

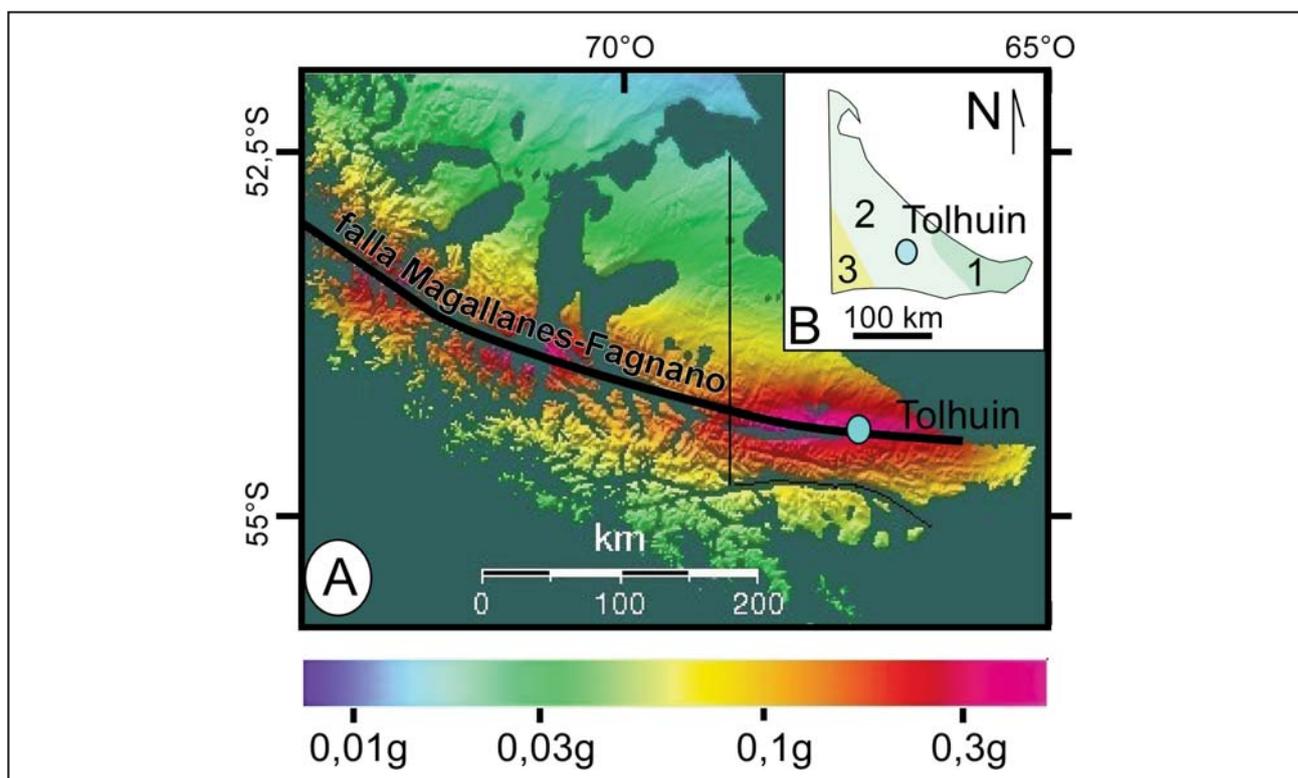


Figura 9. A - Zonificación sísmica basada en la falla Magallanes-Fagnano como fuente sismogénica. Modelización con el programa OpenSHA. B - Zonificación sísmica para Tierra del Fuego tomada de la Figura 2.1 en INPRES-CIRSOC 103 (2013).

con el fin de detectar las construcciones deficientes en sismo-resistencia y adecuarlas a niveles 'moderate-code' o 'high-code', según sea su destino de ocupación. Además, sugiere la conveniencia de adecuar las normas de construcción en Tierra del Fuego para adaptarlas a zona sísmica 4 del INPRES. Este cambio tendría un efecto mayor sobre Tolhuin, el municipio con menor población de los tres, y un efecto mederado en Ushuaia y Río Grande. Ushuaia dista 30 km de la falla Magallanes-Fagnano, y la urbanización apoya mayormente sobre roca y suelo firme, por lo cual es dable esperar una aceleración pico de 0,14g, aproximadamente, adecuada para zona 2, clasificación que ocupa actualmente. Queda por evaluar una posible amplificación local por efecto de la topografía para construcciones en las laderas. Río Grande dista 80 km de la falla Magallanes-Fagnano y está clasificada actualmente en zona 1, definida por una aceleración pico de 0,09 g (*INPRES-CIRSOC 103, 2013*). La urbanización asienta sobre suelo firme y muy firme, posiblemente tipo C, con $V_{s30}=500$ m/seg², aproximadamente. Estas condiciones geotécnicas y la distancia permiten estimar la aceleración pico esperable en Río Grande en el orden de 0,09g, es decir, zona 1.

CONCLUSIONES

La información sísmológica regional indica que el modelo sismotectónico basado en la zona de subducción que bordea Chile, modelo adoptado en la Figura 2.1 de *INPRES-CIRSOC 103 (2013)*, no es aplicable al sector argentino de la Tierra del Fuego. La zonificación sísmica para Tierra del Fuego debe

seguir un modelo sismotectónico basado en la falla Magallanes-Fagnano, el cual resulta en zonas sísmicas orientadas aproximadamente este-oeste. En esta situación, la amenaza sísmica para Tolhuin puede ser superior a la actual zona 2, y aun alcanzar zona 4 del esquema del INPRES. Estudios previos habían establecido que la amenaza sísmica para Tolhuin es elevada. El presente estudio expeditivo indica que la exposición a esa amenaza es moderadamente elevada, en virtud de la baja densidad de población y el bajo valor medio de las instalaciones. E indica también que la vulnerabilidad varía entre moderada y alta, condicionada principalmente por la potencial amplificación sísmica en el suelo blando y por la probable insuficiencia en el cumplimiento de las normas de sismo-resistencia edilicia.

Los resultados de este estudio ponen de manifiesto la conveniencia de ejecutar un relevamiento geotécnico más detallado y una tipificación más rigurosa de la cualidad sismo-resistente de las construcciones existentes, acciones necesarias para disminuir el riesgo sísmico para Tolhuin.

AGRADECIMIENTOS

Los fondos para el desarrollo de este estudio fueron aportados por el Consejo Federal de Ciencia y Tecnología a la Dra. Abascal a través del PFIP 2005, Convenio N° 63, y del PFIP 2007, Convenio n° 74. Las imágenes ASTER DEM fueron obtenidas de <http://asterweb.jpl.nasa.gov/gdem.asp>. Agradecemos la lectura crítica de este manuscrito por el Dr. Sergio Molina Palacios (Universidad de Alicante, España).

TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

- ABASCAL, L. DEL V. Y GONZÁLEZ-BONORINO, G., 2008.
Seismic risk associated with the Magallanes-Fagnano continental transform fault, Tierra del Fuego, Southern Argentina. *7th International Symposium on Andean geodynamics (ISAG 2008, Nice), Extended Abstracts, p. 13-16.*
- ABASCAL, L.; GONZÁLEZ BONORINO, G.; BUJALESKY, G.G.Y COTO, C., 2012.
Efecto amplificador del suelo en la exposición al peligro sísmico de Tolhuin, Tierra del Fuego, Argentina. *Revista de ASAGAI, Vol. 28: 45-56.*
- ATC-40, 1996.
Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings. Volume 1. *Applied Technology Council, Report No. SSC 96-01, 346 p., California.*
- BARDET, J.P.; ICHII, K. Y LIN, C.H., 2000.
EERA - A Computer Program for Equivalent-linear Earthquake site Response Analyses of Layered Soil Deposits. *Department of Civil Engineering, University of California.*
- BARRIENTOS, S.E., 2007.
Earthquakes in Chile. En: Moreno, T., y Gibbons, W. (eds) *The geology of Chile. The Geological Society of London, London, p. 263-289.*
- BOORE, D.M. Y G.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(1): 99-138.*
- BRADLEY J.; ZOLTAN, H. Y ARNFINN, P., 1998.
Shear-wave studies in glacial till. *Geophysics, Vol. 63(4): 1273-1284.*
- BUFFONI, C.; SABBIONE, N.C.; CONNON, G. Y HORMAECHEA, J.L., 2009.
Localización de hipocentros y determinación de su magnitud en Tierra del Fuego y zonas aledañas. *Geoacta, Vol. 34: 75-86, Buenos Aires.*
- CAMINOS, R., 1980.
Cordillera Fueguina. *En: Segundo Simposio de Geología Regional Argentina, Academia Nacional Ciencias, Córdoba, Vol. 2: 1463-1501.*

- CAMPBELL, K.W. Y BOZORGNIA, Y., 2003.
Updated near-source ground motion (attenuation) relations for the horizontal and vertical components of peak ground acceleration and acceleration response spectra.
Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 93(1): 314-331.
- CAMPBELL, K.W. Y BOZORGNIA, Y., 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 10s.
Earthquake Spectra, Vol. 24(1): 139-171.
- CFI, 1996.
Estudio sobre provisión de agua para la Comuna de Tolhuin.
Programa de Desarrollo de Pequeñas Comunidades, Consejo Federal de Inversiones, 17 p.
- CORONATO, A.; SEPPALA, M.; PONCE, J.F. Y RABASSA, J., 2009.
Glacial geomorphology of the Pleistocene Lake Fagnano ice lobe, Tierra del Fuego, southern South America.
Geomorphology, Vol. 112: 67-81.
- DEMETS, C.; GORDON, R.G.; ARGUS, D.F. Y STEIN, S., 1990.
Current plate motions.
Geophysical Journal International, Vol. 10: 425-478.
- DIRAISON, M.; COBBOLD, R.; GAPAIS, D.; ROSSELLO, E.A. Y LE CORRE, C., 2000.
Cenozoic crustal thickening, wrenching and rifting in the foothills of the southernmost Andes.
Tectonophysics, Vol. 316: 91-119.
- DNV, 2004.
Informe de Ingeniería, IIIa2. Capítulo 1, Suelos y materiales. Ruta Khamy-Kosobo.
Dirección Nacional de Vialidad, 78 p., Buenos Aires.
- DOUGLAS, J., 2011.
Ground-motion prediction equations 1964-2010.
PEER Report 2011/102, Pacific Earthquake Engineering Research Center. College of Engineering, University of California, Berkeley, 455 p.
- ESTEBAN, F.D.; TASSONE, A.; LODOLO, E.; MENICETTI, M.; LIPPAL, H.; WALDMANN, N.; DARBO, A.; BARADELLO, L. Y VILAS, J.F., 2014.
Basement geometry and sediment thickness of Lago Fagnano (Tierra del Fuego).
Andean Geology, Vol. 41(2): 293-313.
- FEMA 154, 2002.
Rapid Visual Screening of Buildings for Potential Seismic Hazards.
Washington, D.C., USA.
- FEMA, 2003.
Multi-hazard Loss Estimation Methodology, Earthquake Model-Hazus®-MH 2.0, Technical Manual.
Department of Homeland Security, Federal Emergency Management Agency, Mitigation Division, 736 p., Washington, D.C.
- FIELD, E.H.; JORDAN, T.H. Y CORNELL, C.A., 2003.
OpenSHA: A Developing Community-Modeling Environment for Seismic Hazard Analysis.
Seismological Research Letters, Vol. 74(4): 406-419.
- GOMEZ, F.; NEMER, T.; TABET, C.; KHALIE, M.; MEGHRAOUI, M. Y BARAZANGI, M., 2007.
Strain partitioning of active transpression within the Lebanese restraining bend of the Dead Sea Fault (Lebanon and SW Syria).
En Cunningham, W.D. y Mann P. (eds) Tectonics of strike-slip restraining and releasing bends, Geological Society, Special Publication 290, p. 285-303.
- GONZÁLEZ BONORINO, G.; RINALDI, V.; ABASCAL, L. DEL V.; ALVARADO, P.; BUJALESKY, G.G. Y GÜELL, A., 2012.
Holocene paleoseismicity in southern Patagonia (Argentina-Chile; 52°-55°S); the role of the Magallanes-Fagnano transform fault.
Journal of Natural Hazards, Vol. 61(2): 337-349.
- INPRES-CIRSOC 103, 2013.
Reglamento argentino para construcciones sismorresistentes.
Parte I. Construcciones en general. Instituto Nacional de Tecnología Industrial, Buenos Aires, 87 p.
- JASCHEK, E.; SABBIONE, N. Y SIERRA, P., 1982.
Reubicación de sismos localizados en territorio argentino (1920-1963).
Observatorio Astronómico de la Universidad Nacional de La Plata, Serie Geofísica. Vol. XI, No 1, 79 p.

- KANAMORI, H. Y ALLEN, C.R., 1986.
Earthquake repeat time and average stress drop.
En Das, S.; Boatwright, J. y Scholz, C.H. (eds) Earthquake source mechanics, Issue 7. AGU Geophysical Monograph 37, Maurice Ewing Volume 6, p. 227-236.
- KLEPEIS, K.A., 1994.
The Magallanes and Deseado fault zones: major segments of the South American-Scotia transform plate boundary in southernmost South America, Tierra del Fuego.
Journal of Geophysical Research, Vol. 99: 22001-22014.
- LAKEFIELD RESEARCH, 2000.
Geomorfología. Subárea este del lago Fagnano, provincia de Tierra del Fuego.
PASMA II - Zona Sur, Plano N° TFTF-3-GM2A.
- LAWRENCE, J.F. Y WIENS, D.A., 2004.
Combined receiver-function and surface wave phase-velocity inversion using a niching genetic algorithm: application to Patagonia.
Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 94: 977-987.
- LODOLO, E.; MENICETTI, M.; BARTOLE, R.; BEN-AVRAHAM, Z.; TASSONE, A. Y LIPPAI, H., 2003.
Magallanes-Fagnano continental transform fault (Tierra del Fuego, southernmost South America).
Tectonics, Vol. 22(6): 1076, doi:10.1029/2003TC001500.
- MARTINIC, M., 2008.
Registro histórico de antecedentes volcánicos y sísmicos en la Patagonia austral y la Tierra del Fuego.
Magallania, Vol. 36: 5-18.
- MENICETTI, M.; E. LODOLO, E. Y TASSONE, A., 2008.
Structural geology of the Fuegian Andes and Magallanes fold-and-thrust belt - Tierra del Fuego Island.
Geologica Acta, Vol. 6: 19-42.
- MOLINA, S.; LANG, D.H. Y LINDHOLM, C.D., 2010.
SELENA - An open-source tool for seismic risk and loss assessment using a logic tree computation procedure.
Computers & Geosciences, Vol. 36(3): 257-269.
- MOLINA-PALACIOS, S.; LANG, D.H. Y LINDHOLM, C.D., 2014.
SELENA v6.0,
User and Technical Manual v6.0, Report no. 14-003, Kjeller (Norway) - Alicante (Spain), 97 pp.
- PELAYO, A. Y WIENS, D.A., 1989.
Seismotectonics and relative plate motions in the Scotia sea region.
Journal of Geophysics Research, Vol. 94: 7293-7320.
- REITER, L., 1990.
Earthquake hazard analysis.
Columbia University Press, New York, 254 pp.
- ROSYIDI, S.A.; NAYAN, K.A.M.; TAHA, M.R. Y ISMAIL, A., 2006.
Estimating G-Max & Field CBR of Soil Subgrade Using a Seismic Method.
NDT.net, June, Vol. 11(6), <http://www.ndt.net/article/v11n06/rosyidi/rosyidi.htm>.
- SMALLEY, R., JR.; KENDRICK, E.; BEVIS, M.; DALZIEL, I.; TAYLOR, F.; LAURÍA, E.; BARRIGA, R.; CASASSA, G.; OLIVERO, E. Y PIANA, E., 2003.
Geodetic determination of relative plate motion and crustal deformation across the Scotia-South America plate boundary in eastern Tierra del Fuego.
Geochemical, Geophysical, Geosystems, Vol. 4: 1-19.
- WALDMANN, N.; ANSELMETTI, F.S.; ARIZTEGUI, D.; AUSTIN, JR, J.A.; PIROUZ, M.; MOY, C.M. Y DUNBAR, R., 2011.
Holocene mass-wasting events in Lago Fagnano, Tierra del Fuego (54°S): implications for paleoseismicity of the Magallanes-Fagnano transform fault.
Basin Research, Vol. 23: 171-190.
- WELLS, D.L. Y COPPERSMITH, K.J., 1994.
New Empirical Relationships Among Magnitude, Rupture Length, Rupture Width and Surface Displacement,
Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 84: 974-1002.