



Efecto amplificador del suelo en la exposición al peligro sísmico de Tolhuin, Tierra del Fuego, Argentina

Soil amplifying effect on vulnerability to seismic hazard for Tolhuin, Tierra del Fuego, Argentina

Abascal, Liliana ¹✉ - González Bonorino, Gustavo ² - Bujalesky, Gustavo G. ² - Coto, Claudio ²

Recibido: 01 de Enero de 2012 • Aceptado: 26 de Marzo 2012

Resumen

La Isla Grande de Tierra del Fuego (Argentina-Chile) está situada en un entorno de intensa actividad sísmica merced a la interacción de las placas tectónicas Antártica, Scotia y Sudamericana. Dos zonas sismotectónicas en esta región: la fosa de subducción en el extremo austral de Chile y la falla Magallanes-Fagnano, que cruza la isla de este a oeste, representan una amenaza sísmica para la población local. Considerando únicamente el sector argentino de la Tierra del Fuego, sin embargo, la mayor amenaza proviene de la falla Magallanes-Fagnano, la cual ha generado eventos sísmicos de magnitud $M=8$ en tiempos históricos. Tolhuin, una pequeña población de 3000 habitantes en rápido crecimiento, está a 1 km de la traza de esta falla. Las construcciones de Tolhuin en gran parte no han tenido el control de sismorresistencia que requiere el INPRES (Instituto Nacional de Prevención Sísmica). Por otra parte, la urbanización de Tolhuin apoya sobre un espeso paquete de sedimentos glaciogénicos del Cuaternario cuyas características geotécnicas sugieren que puede amplificar a más del doble una vibración sísmica, de acuerdo a una simulación con EERA (Equivalent-linear Earthquake Analyses). Aplicando la metodología Risk Assessment Tools for Diagnosis of Urban Areas against Seismic Disasters (RADIUS) propiciada por las Naciones Unidas, este estudio analiza la vulnerabilidad edilicia de Tolhuin ante un Terremoto Máximo Considerado de $M=8,0$. Los resultados muestran la importancia de tomar en cuenta la probable amplificación local por el efecto suelo. El presente trabajo constituye un primer esfuerzo concertado para dotar a la provincia argentina de Tierra del Fuego de herramientas cartográficas y conceptuales útiles para planificar el crecimiento urbano tomando en cuenta la prevención sísmica.

Palabras clave: RADIUS, riesgo sísmico, vulnerabilidad edilicia, EERA.

Abstract

The island of Tierra del Fuego (Argentina-Chile) lies in a region of intense seismic activity due to the interaction of the Antarctica, Scotia and South American tectonic plates. Two seismotectonic zones in this region: the subduction trench in southernmost Chile and the Magallanes-Fagnano fault, that

¹ Facultad Regional Río Grande, Universidad Tecnológica Nacional, Islas Malvinas 1650, Río Grande, Tierra del Fuego.

✉ liliana_abascal@hotmail.com

² CADIC-CONICET, Bernardo Houssay 200, Ushuaia, Tierra del Fuego

crosses the island from east to west, represent a seismic hazard for the island population. Focusing on the Argentine sector of Tierra del Fuego, however, the greater threat comes from the Magallanes-Fagnano fault, which has generated seismic events in historical times of magnitude $M=8$. Tolhuin, a small population of 3000 inhabitants undergoing fast growth, is located 1 km from the trace of the Magallanes-Fagnano fault. Buildings in Tolhuin largely have not had seismic safety controls required by the INPRES (the Argentine seismic building code regulator). In addition, the urbanization of Tolhuin rests on a thick package of Quaternary glacial sediments with the potential for amplifying seismic vibrations by a factor of more than 2, judging from a simulation with EERA (Equivalent-linear Earthquake Analyses). Applying the Risk Assessment Tools for Diagnosis of Urban Areas against Seismic Disasters (RADIUS) methodology, supported by the United Nations, this study analyses the seismic vulnerability of constructions in Tolhuin under the effect of a Maximum Considered Earthquake of magnitude $M=8.0$. The results show the importance of considering the probable local amplification through site effects. This study constitutes a first effort to provide the Argentine province of Tierra del Fuego with cartographic and conceptual tools useful in planning urban growth taking into consideration seismic hazard.

Keywords: RADIUS, seismic risk, building vulnerability, EERA.

INTRODUCCIÓN

La Isla Grande de Tierra del Fuego (Argentina-Chile) se encuentra expuesta a la actividad sísmica originada por la interacción de las placas tectónicas Antártica, Scotia y Sudamericana (Figura 1). La Figura 2 muestra la distribución de 3993 eventos sísmicos con magnitudes entre 3,1 y 7,8, tomados de <http://www.iris.washington.edu/SeismicQuery/events.htm>. La geometría de las estructuras sismogénicas y la distribución de los epicentros permiten definir seis zonas sismotectónicas (Figura 2; Tabla 1). En el oeste, la placa Antártica subduce bajo la de Scotia en la fosa de Chile austral (zona 1, Figura 2). Esta zona de subducción termina hacia los 58°S, remplazada por la Zona de Fractura Shackleton (ZFS; zona 2) en la cual predomina el movimiento transcurrente sinistral. La ZFS interseca la Dorsal de Scotia Sur (DSS; zona 3), que marca el límite entre las placas Antártica y Scotia y muestra movimiento dominante transcurrente sinistral. En el este la generación de sismos está asociada con la dorsal centro-oceánica y la zona de subducción de las islas Sandwich del Sur (zona 4). Casi paralela a la DSS, hacia el norte corre la Dorsal Scotia Norte (zona 5), conformada por un conjunto de fallas, también de movimiento transcurrente sinistral (Pelayo y Wiens 1989). La porción subaérea de esta dorsal es la falla Magallanes-Fagnano, que atraviesa la Isla Grande de Tierra del Fuego de este a oeste, y que se distingue aquí como zona 6 (Figura 2; Winslow 1982; Lodolo et al. 2003).

La amenaza de un terremoto es inversamente proporcional a la distancia que separa el sitio de interés del epicentro sísmico. En términos muy generales, a una distancia de 100 a 200 km la onda sísmica ha perdido cerca del 90% de su energía inicial (e.g., Reiter 1991). Así, la gran distancia que separa las zonas 2, 3, 4 y 5 del sector argentino de Tierra del Fuego, permite descartarlas como potenciales contribuyentes a la amenaza sísmica para la población fueguina. La fosa de Chile austral está más cerca (zona 1, Figura 2). Allí, las placas Antártica y Scotia convergen a una velocidad de aproximadamente 1,1 cm/año (Pelayo y Wiens 1989), generando sismos de magnitudes generalmente inferiores a $M=6$, probablemente debido a la baja velocidad de convergencia (Barrientos 2007). Por ello esta zona no parece ser fuente de sismos potencialmente dañinos para la Tierra del Fuego argentina (González Bonorino et al. 2011). La falla Magallanes-Fagnano, por su parte, cruza el territorio argentino de la isla de Tierra del Fuego y tiene una actividad sísmica continua. Esta actividad está documentada por

los frecuentes sismos de baja magnitud con epicentros agrupados en proximidad a la traza de la falla (Febrer et al. 2001; Sabbione et al., 2007; Buffoni et al. 2009) y por el desplazamiento horizontal sinistral de entre 0,66 y 0,96 cm/año medido por métodos geodésicos (DeMetz 2010; Smalley et al. 2003).

Varios sismos fuertes tuvieron epicentros asociados con la traza de la falla Magallanes-Fagnano. El 1 de febrero de 1879 tuvo lugar un movimiento sísmico que se sintió en gran parte de la Patagonia austral. Martinic (2008), en base a una reconstrucción de la distribución de las intensidades sísmicas, estimó la magnitud de ese evento en $M=8$. En la era instrumental se registraron varios terremotos fuertes. El 13 de julio de 1930 ocurrió un evento con $M=6$; el 17 de diciembre de 1949 hubo uno con $M=7,8$ ('foreshock'), seguido pocas horas después por otro con $M=7,8$ ('mainshock'), y días más tarde, el 30 de enero de 1950, por una réplica con $M=7$; otro sismo importante ocurrió el 15 de junio de 1970 con $M=7$ (Pelayo y Wiens 1989; Jaschek et al. 1982). Costa et al. (2006) estimaron que la falla Magallanes-Fagnano podría haber tenido desplazamientos horizontales de entre 4 y 5 metros a lo largo de cientos de kilómetros; tal movimiento debió dar origen a sismos fuertes. La falla Magallanes-Fagnano tiene ramificaciones; es un conjunto de fallas paralelas que distan entre sí unos pocos kilómetros, y no una traza única. La traza media de la falla Magallanes-Fagnano pasa a unos 80 km de Río Grande, unos 30 km de Ushuaia, y a menos de 1 km de Tolhuin, una pequeña población de 3000 habitantes (censo INDEC 2010) situada en la cabecera oriental del lago Fagnano (Figura 1).

El presente trabajo evalúa el riesgo sísmico para la estructura edilicia de Tolhuin, tomando en consideración la posible amplificación de la aceleración sísmica por causa del espeso sustrato sedimentario sobre el cual apoya la urbanización. Los resultados son aplicables a la planificación de la expansión urbana.

CONTEXTO GEOGRÁFICO, GEOLÓGICO Y SISMOLÓGICO

El sector argentino de la Isla Grande de Tierra del Fuego cubre una superficie de 21.571 km². La ruta nacional N° 3 es la única vía terrestre de comunicación entre Ushuaia, Tolhuin y Río Grande. Un corte en esa ruta dejaría incomunicados a estos centros urbanos. Ushuaia y Río Grande tienen servicio de aeropuerto internacional. La conexión por tierra con el continente es precaria, ya que depende de un servicio de ferry en territorio de, y administrado por, Chile.

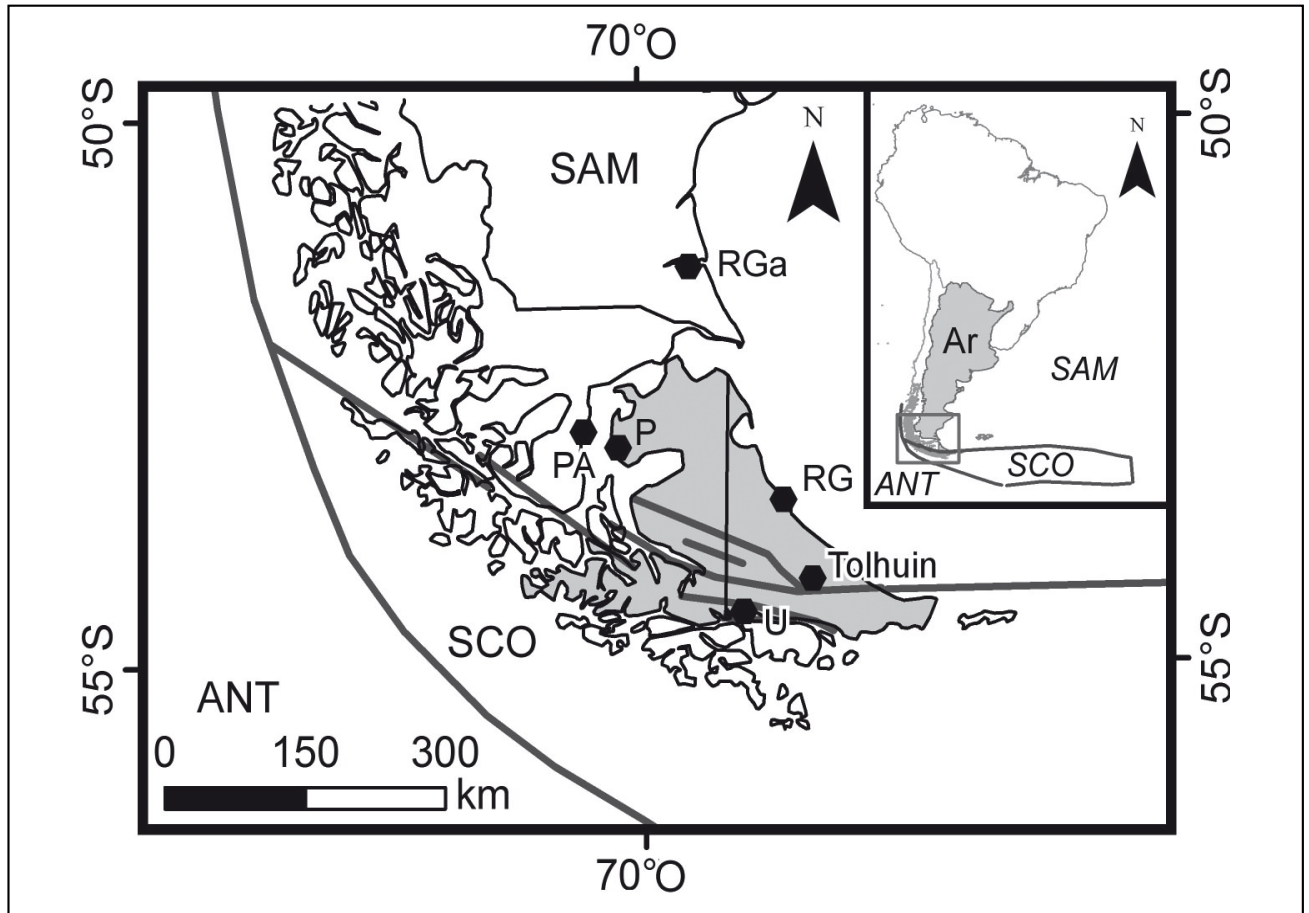


Figura 1. Mapas de ubicación a escalas continental (esquina superior derecha) y regional. Se indican las principales poblaciones y estructuras sismogénicas. La Isla Grande de Tierra del Fuego está grisada. Abreviaturas: poblaciones - RGa, Río Gallegos; RG, Río Grande; U, Ushuaia, en la Argentina, y PA, Punta Arenas y P, Porvenir, en Chile; placas tectónicas - SAM, Sudamericana; SCO, Scotia; ANT, Antártica.

Tabla 1. Zonas sismotectónicas.

Numeración	Designación	Ambiente geológico
1	fosa de Chile austral	subducción placa Antártica bajo Sudamericana
2	zona de Fractura Shackleton	límite placas Antártica y Scotia
3	dorsal Scotia Sur	límite placas Antártica y Scotia
4	dorsal Sandwich del Sur	límite placas Scotia y Antártica
5	dorsal de Scotia Norte	límite placas Scotia y Sudamericana
6	falla Fagnano-Magallanes	límite placas Sudamericana y Scotia

La conformación geográfica actual de Tierra del Fuego, con montañas en el sur y llanuras y mesetas en el norte, ha sido el resultado de una prolongada sedimentación marina y continental, seguida por deformación tectónica de los estratos depositados, y luego erosión de las cumbres produciendo nuevo detrito sedimentario, evolución que lleva ya más de 200 millones de años. La última gran glaciación, en el Cuaternario, dio lugar a erosión y sedimentación, principalmente glacial y glaci-fluvial, y al relleno de los bajos con turbales y depósitos fluviales. Estos depósitos recientes ocupan las cotas más bajas, comúnmente por debajo de 30 m s.n.m., y están alojados en surcos glaciarios exhondados en roca en el sector montañoso y

cubren gran parte del sector septentrional de la isla. Estos depósitos han sido el sustrato preferido para la urbanización de Río Grande y de Tolhuin, y de gran parte de la de Ushuaia.

Para los fines de la prevención sísmica a escala provincial, se discriminó el sustrato en roca, suelo firme y suelo blando (Figura 3). El suelo firme está conformado por mantos de arena limosa con rodados dispersos, colectivamente denominados drift glacial, acumulados como morenas en los márgenes del hielo y como till de alojamiento, y en este caso compactados por el peso del hielo. El espesor de estos mantos puede superar 100 m (Meglioli 1992). Por datos de la literatura un drift

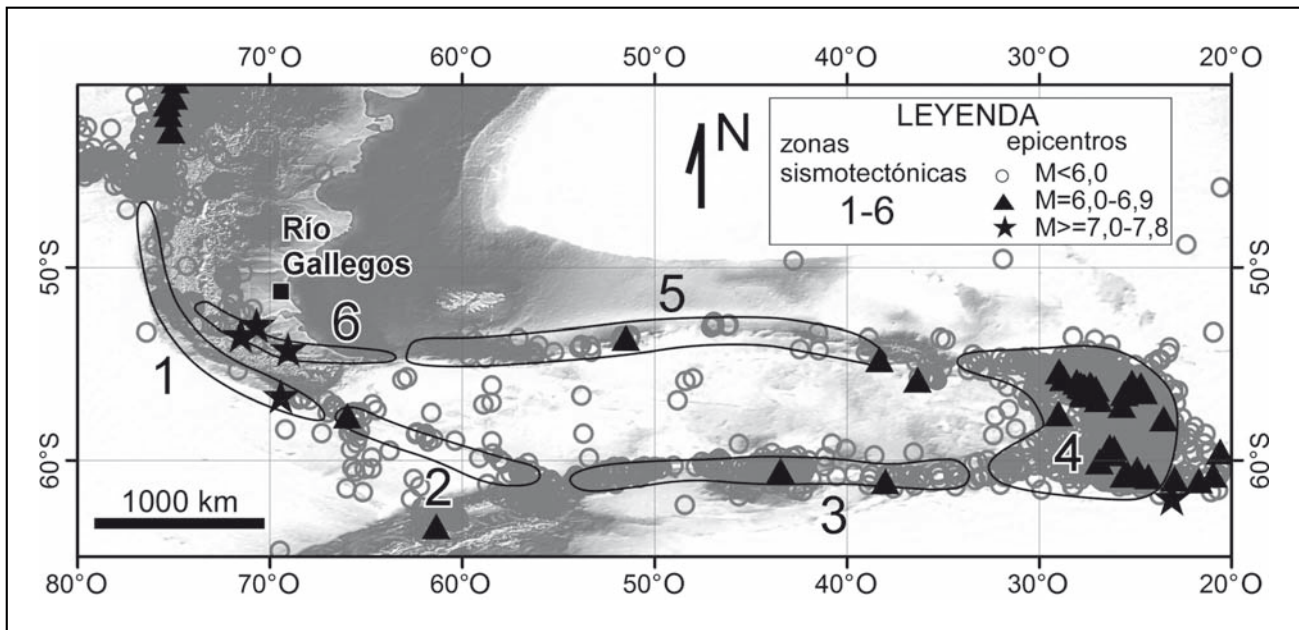


Figura 2. Distribución de epicentros en Patagonia y el arco de Scotia (base de datos IRIS <http://www.iris.washington.edu/SeismicQuery/events.htm>). Las réplicas ('aftershocks') fueron filtradas con la opción que da el formulario de SeismicQuery. El mapa regional de fondo es un subconjunto del mapa global de elevación y batimetría incluido en la distribución de ESRI ArcView 9. Se indican con números las seis zonas sismotectónicas identificadas.

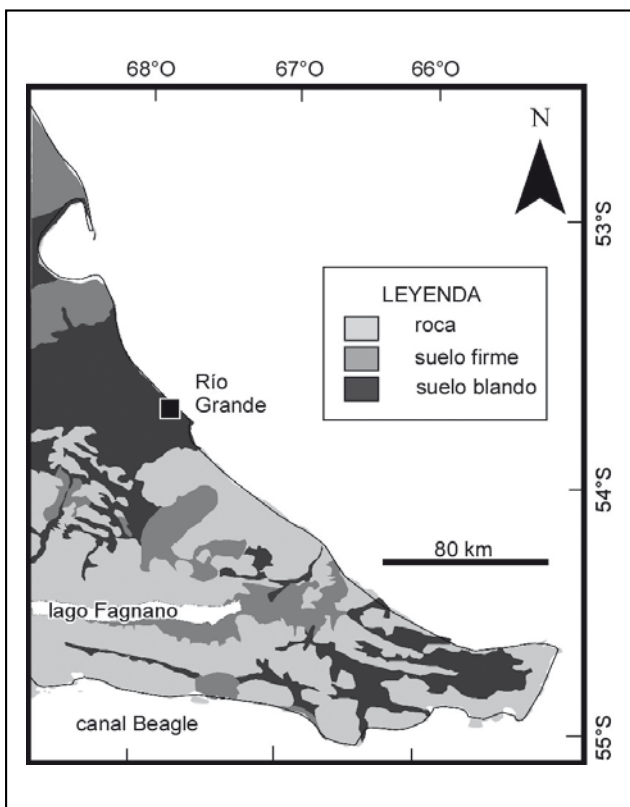


Figura 3. Tipos y distribución de suelos a escala provincial. Aproximadamente el 50% de la superficie de la Tierra del Fuego argentina, y casi todas las tierras bajas, están cubiertas por suelos firmes y blandos.

glacial suele tener velocidades de corte $V_s \leq 450$ m/seg (e.g., Bradley et al. 1998; West 2002). Ensayos SPT en drift sumergido en la bahía Ushuaia dieron valores de N entre 20 y el rechazo (más de 50 golpes para penetrar 30 cm; Instituto Superior de Recursos Hídricos 1998; FUNCOR 1997). La combinación de estos valores permite clasificar el drift como transicional entre suelo firme y muy firme (según la clasificación del National Earthquake Hazards Reduction Program; FEMA 2003). El suelo blando corresponde a limos y arcillas glacialustres y fluviales, y a depósitos de turba. Por datos de la literatura los suelos blandos, suelos tipo E (clasificación del NEHRP en FEMA 2003), pueden tener $V_s < 180$ m/seg y valores de $N < 15$; ensayos SPT locales tomados de informes inéditos del Instituto Provincial de la Vivienda de Tierra del Fuego y de consultores privados, compilados para este estudio, dieron una media de $N = 20$ para el suelo somero. La clasificación de los suelos a escala provincial tiene el propósito de definir la peligrosidad sísmica para construcciones que apoyen, o eventualmente puedan apoyarse en esos diferentes tipos de substrato.

ATENUACIÓN DE LA ENERGÍA SÍSMICA CON LA DISTANCIA AL EPICENTRO

Entre 1997 y 1998 se llevó a cabo el proyecto SEPA (Seismic Experiment in Patagonia and Antarctica), con la instalación de cinco estaciones sismológicas en la Patagonia austral de Argentina y Chile. Empleando los registros de estas cinco estaciones temporarias, Lawrence y Wiens (2004) aplicaron inversión de ondas de cuerpo y Rayleigh para inferir la conformación del subsuelo. De acuerdo a este estudio Patagonia muestra un Moho bien definido entre 28 y 34 km de profundidad, y una capa sedimentaria de baja velocidad de espesor entre 0 y 4,3 km. Otra fuente de información sobre la corteza de Patagonia es el modelo CRUST 2.0, una compilación de 360 perfiles columnares que permiten visualizar variaciones globales en las propiedades de la corteza con una resolución de $2^\circ \times 2^\circ$ (Bassin et al. 2000). De acuerdo al modelo CRUST 2.0 el espesor de la corteza en

Patagonia mide entre 20 y 40 km. Los valores compilados indican que la corteza en Tierra del Fuego tiene un espesor inferior al promedio continental, reflejando corteza joven y adelgazada tectónicamente (Febrer et al. 2001). Smalley et al. (2003) postularon que la falla Magallanes-Fagnano posiblemente esté sellada a una profundidad de aproximadamente 15 km. Buffoni et al. (2009) reconstruyeron las profundidades focales de sismos de baja magnitud probablemente asociados a la falla Magallanes-Fagnano y determinaron que la mayoría está a profundidades inferiores a los 10 km, hecho que concuerda con la conclusión de Smalley et al. (2003) de que la sismogénesis estaría confinada a los 15 km superiores de la corteza. La generación de sismos con hipocentros someros es típica de las fallas transformes y se asocia con el límite inferior de la corteza frágil y la condición comúnmente dúctil de la corteza inferior (cf., Gregg et al. 2006).

Una relación de atenuación de amplia difusión es la de Campbell (1997). Esta relación está basada en terremotos poco profundos con epicentros en la zona de subducción en el oeste de los Estados Unidos, con magnitudes entre 4 y 9,5, y distancias al epicentro entre 0 y 100 km. De acuerdo con esta ecuación la aceleración horizontal decae por debajo de 0,1g (aproximadamente el límite superior de vibración sísmica dañina para una estructura edilicia) a los 100 km de distancia al epicentro (Figura 4).

AMENAZA SÍSMICA PROVINCIAL

Descartando las réplicas de 1949 y 1950, hubo tres terremotos con $M > 6$ entre 1879 y 2011, o sea una recurrencia de 0,023 eventos por año. Adoptando un modelo de Poisson para los tres eventos no correlacionados se puede estimar la probabilidad de sismos con $M > 6$ en los próximos cien años. La probabilidad de que no ocurra ningún sismo en tal lapso es menor al 10%. La probabilidad de que ocurra exactamente 1 sismo de $M > 6$ alcanza a un 30% en los próximos 50 años, para luego disminuir a medida que aumenta la probabilidad de que ocurra más de uno (Figura 5). En un estudio geotécnico orientado a la ampliación del puerto de Ushuaia se adoptó, para fines de prevención sísmica, un Terremoto Máximo Considerado de magnitud $M = 8,5$ (Instituto Superior de Recursos Hídricos 1998). Este valor probablemente es demasiado elevado. Una compilación de terremotos con $M > 7,0$, generados por fallas transcurrentes, revela que este tipo de falla aparentemente no ha generado eventos de magnitud superior a $M = 7,9$ (Tabla 2), en tanto que los sismos generados en zonas de subducción han alcanzado $M = 9,5$ (e.g., Chile, 1960). Esta limitación se debe probablemente a la menor superficie de fricción por unidad de largo disponible en las fallas transcurrentes. Los registros históricos no garantizan, sin embargo, haber documentado la magnitud máxima posible de una falla. En el presente trabajo se adopta una magnitud $M = 8,0$ para el Terremoto Máximo Considerado, un 2% superior a la mayor registrada por instrumento.

La combinación de los factores de amplificación del suelo con la ley de atenuación de la energía sísmica, permite generar un mapa de intensidades sísmicas suponiendo un epicentro y una magnitud conocidos del Terremoto Máximo Considerado. Para este estudio se supuso un epicentro sobre la falla Magallanes-Fagnano y sobre el límite con Chile (Figura 6). Tal ubicación es próxima al epicentro del primer sismo ocurrido en diciembre de 1949 ('foreshock'). La aceleración máxima horizontal (PGA, 'Peak Ground Acceleration') generada por la modelización fue transformada a la escala de intensidad de Mercalli Modificada (MMI) empleando la ecuación de Trifunac y Brady (1975):

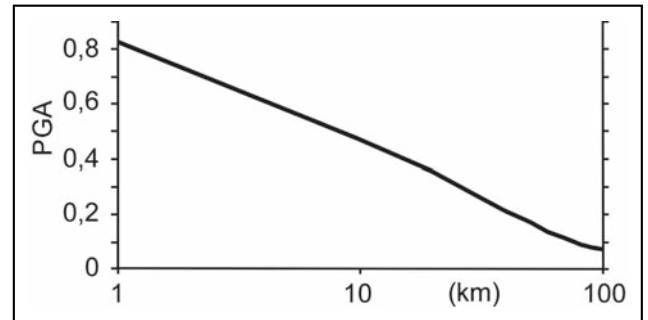


Figura 4. Disminución de la aceleración máxima horizontal (PGA) con la distancia al epicentro (basado en Campbell 1997).

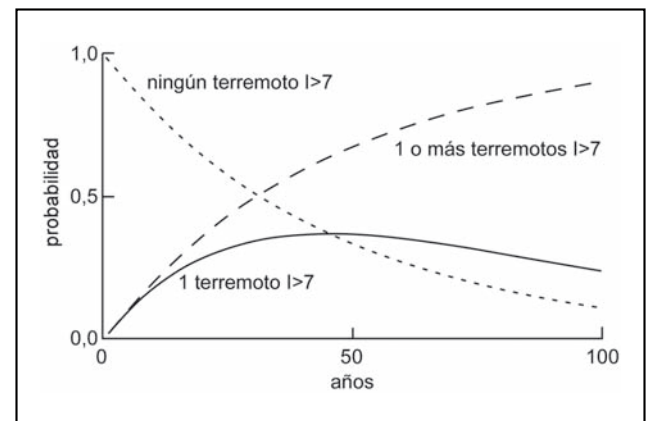


Figura 5. Probabilidad de ocurrencia de sismos con $M > 7$ en Tierra del Fuego, empleando un modelo de Poisson.

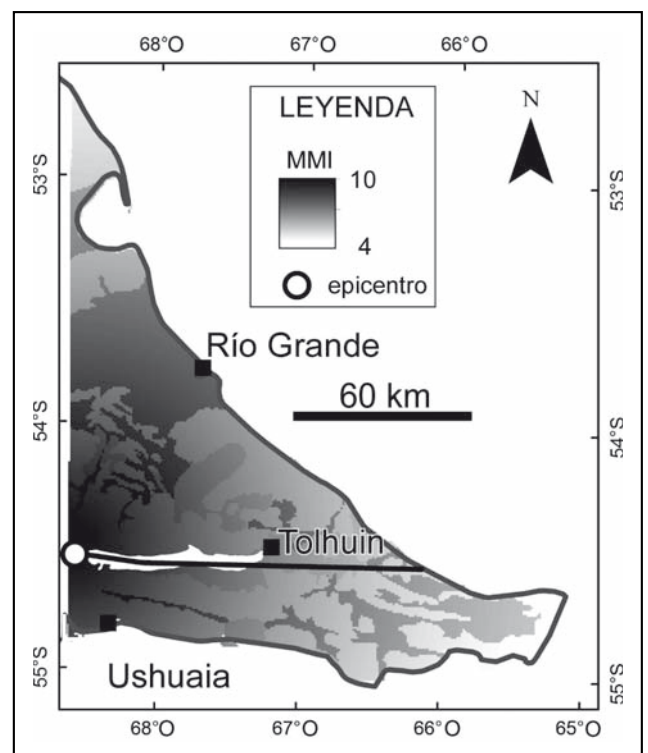


Figura 6. Distribución de la intensidad sísmica para un evento hipotético de $M = 8,0$ con epicentro sobre la falla Magallanes-Fagnano en el límite con Chile (círculo blanco). MMI - escala de intensidad de Mercalli Modificada.

Tabla 2. Magnitudes de sismos históricos generados en fallas transcurrentes. Fuente: [http:// earthquake.usgs.gov](http://earthquake.usgs.gov)

Falla	Región	Año	Magnitud
Denali	Alaska, EEUU	1912	7,2
Denali	Alaska, EEUU	2002	7,9
Port-au-Prince	Haití	2010	7,0
Erzincan	Turquía	1939	7,8
Denizli	Turquía	1976	7,3
Izmit	Turquía	1999	7,6
Van	Turquía	2011	7,2
Sistema falla San Andreas			
Fort Tejon	California, EEUU	1857	7,9
Owens Valley	California, EEUU	1872	7,4
Kern County	California, EEUU	1952	7,3
Landers	California, EEUU	1992	7,3

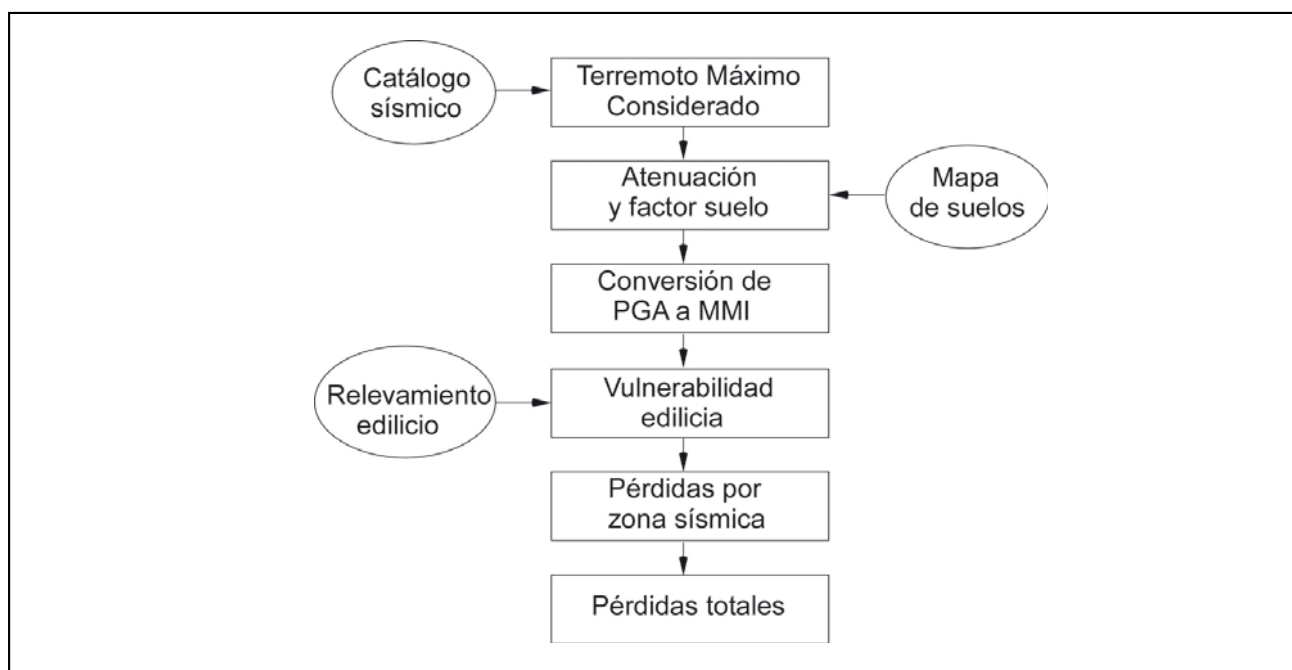


Figura 7. Diagrama de flujo del método RADIUS.

$$MMI = 3,333 * (\log(PGA * 980) - 0,014) \quad (1)$$

La intensidad se atenúa radialmente desde el epicentro pero muestra importantes anomalías locales en función del efecto amplificador del suelo (Figura 6; Abascal y González Bonorino 2008). En sustrato rocoso la intensidad decae de MMI=10 a MMI=7 en aproximadamente 50 km. Donde el suelo es firme a blando, en cambio, el mismo rango de disminución ocurre a unos 80 km del epicentro.

EVALUACIÓN DEL RIESGO SÍSMICO EDILICIO PARATOLHUIN

En esta primera evaluación del riesgo sísmico para Tolhuin, la microzonificación ha sido trabajada en un nivel inter-

medio de detalle, analizando conjuntos de edificios y de suelos. El marco conceptual del estudio está basado en una iniciativa de las Naciones Unidas para lograr una mayor seguridad para los habitantes de ciudades implantadas en territorios susceptibles de actividad sísmica dañina. Esta iniciativa se ha denominado Método RADIUS, por Risk Assessment Tools for Diagnosis of Urban areas against Seismic Disasters y se implementa como planilla MSEXcel. Este programa es gratuito y puede descargarse en: <http://www.geohaz.org/radius>. La aplicación del Método RADIUS comprende varias etapas (Figura 7).

Paso 1. Definir el escenario sísmico: epicentro, magnitud y profundidad de los posibles sismos. Paso 2. Calcular la atenuación sísmica, ya sea en base a fórmulas preexistentes, o a datos locales. Paso 3. Calcular la amplificación de la onda sísmica debido a condiciones locales de espesor y características geotécnicas del suelo. Paso 4. Convertir valores de aceleración

máxima del suelo (PGA) a valores de la escala Modificada de Mercalli (MMI). Paso 5. Aplicar funciones de vulnerabilidad según tipo de edificación.

Los pasos 1 y 2 se trataron al considerar la amenaza sísmica provincial. Al analizar la amenaza a escala urbana es necesario incorporar las nociones de vulnerabilidad y de riesgo. La vulnerabilidad involucra nociones físicas, sociales, y económicas. Riesgo es "La destrucción o pérdida esperada en base a la convolución de la probabilidad de ocurrencia de una amenaza y de la vulnerabilidad de los elementos expuestos a esa amenaza. Matemáticamente puede ser expresado como la probabilidad de exceder un nivel determinado de daño económico y social, en un sitio específico y un período dado" (Spence 1990).

RELEVAMIENTO GEOTÉCNICO

La urbanización de Tolhuin está emplazada sobre depósitos glaciales diversos a cotas que varían entre 0 y 100 metros sobre el nivel del lago Fagnano (SEGEMAR 2002). La mayor parte de la planta urbana se encuentra por encima de la cota de 75 metros. La variación altitudinal hace que diversas zonas de la urbanización apoyen sobre sustratos diferentes, en función de la estratigrafía. La estratigrafía del sustrato se conoce merced a un pozo de 120 m de profundidad y un sondeo geoelectrico en el mismo sitio del pozo; la boca de pozo está a unos 100 metros por encima del nivel del lago, sobre la ruta n° 3 (CFI 1996). El techo del basamento hidrogeológico se encuentra a 200 m de profundidad y corresponde a estratos consolidados y tectónicamente deformados de arenisca y conglomerados de la Formación Río Claro (Terciario inferior; Caminos 1980) con valores de resistividad entre 30 y 40 ohm.m (Figura 9). Por encima, hasta los 105 m b.b.p. (bajo boca de pozo), domina material de muy baja resistividad (<50 ohm.m) que por exposiciones en superficie se identifica como limo arcilloso con abundantes rodados dispersos, o diamictita. Entre 64 y 105 m b.b.p. el registro geoelectrico indica una predominancia de arena. Entre 22 y 64 m b.b.p. alternan capas de arena, de diamictita y de arcilla. En el tramo superior la diamictita está cubierta por un manto de grava y arena con abundantes restos vegetales, de 2 a 4 m de espesor, interpretado como derrubio de falda.

La topografía de detalle del área urbanizada revela un perfil escalonado (Figura 10A). Una plataforma superior, donde se extiende el casco céntrico, corresponde al techo del depósito de derrubio. Una terraza a cotas entre 50 y 60 m sobre el nivel del lago podría estar incidiendo en el intervalo arenoso registrado en pozo a profundidades entre 64 y 105 m b.b.p. (CFI 1996). Otra terraza, más angosta, ocurre a cotas entre 10 y 20 m, labrada en diamictita, y ha sido interpretada como de origen lacustre (Figura 10B; SEGEMAR 2002).

La caracterización geotécnica de los suelos en Tolhuin se basó en ensayos de resistencia al corte (Standard Penetration Test, SPT, y California Bearing Ratio, CBR), análisis granulométricos, determinación de densidad, y medición del índice plástico. Los ensayos fueron hechos en aproximadamente una docena de calicatas, con profundidades entre 1,5 y 2,0 metros, y catorce pozos a lo largo de la ruta nacional n° 3 nueva, con profundidades entre 2,5 y 7 metros (Figura 8).

El ensayo CBR da la capacidad de carga del subrasante en caminos pavimentados. Cuanto mayor sea el valor de CBR mayor es la resistencia que ofrecerá el subrasante a la carga estática del pavimento y dinámica del tráfico vehicular. Se trata de un ensayo empírico que mide la resistencia a la penetración en el suelo de un cilindro de dimensiones estandarizadas. Seis ensayos dieron un promedio del índice CBR=20% (DNV 2004).

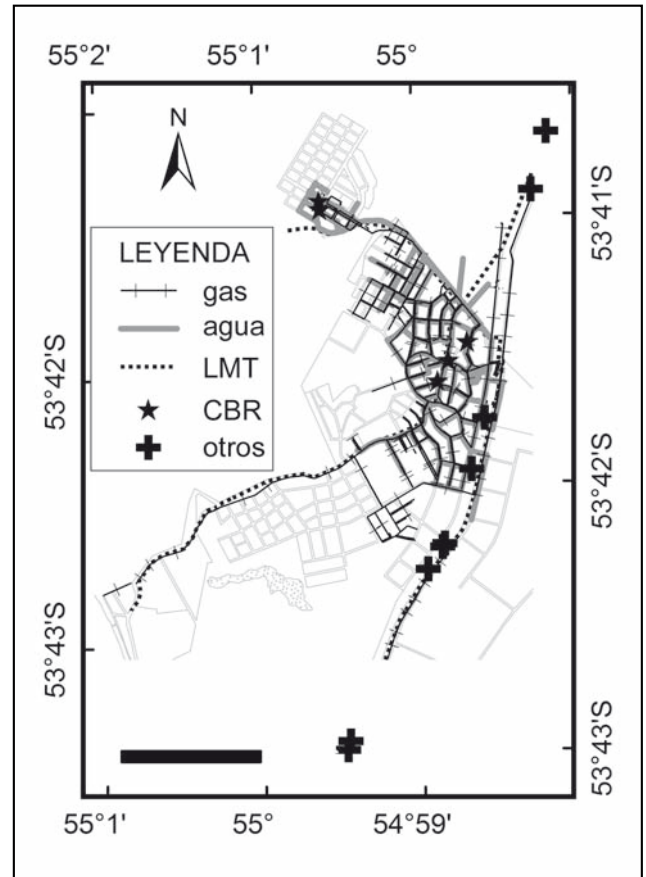


Figura 8. Plano de microzonificación sísmica para Tolhuin, con tendidos críticos y ubicación de sitios con ensayos geotécnicos. SEV8 indica el sitio del sondeo geoelectrico vertical y del pozo de 120 metros de profundidad. La planta urbana está grisada.

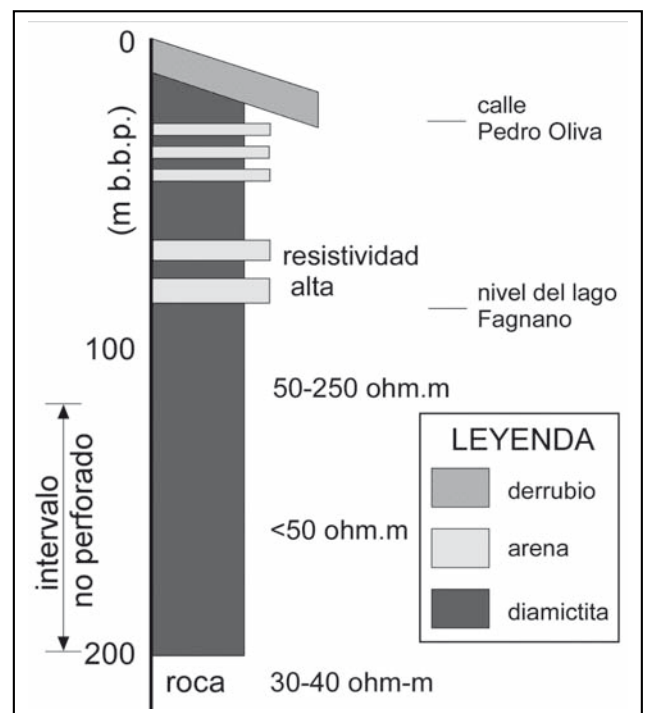


Figura 9. Columna estratigráfica del sustrato de Tolhuin. Basado en datos del pozo profundo (CFI 1996) y datos propios.

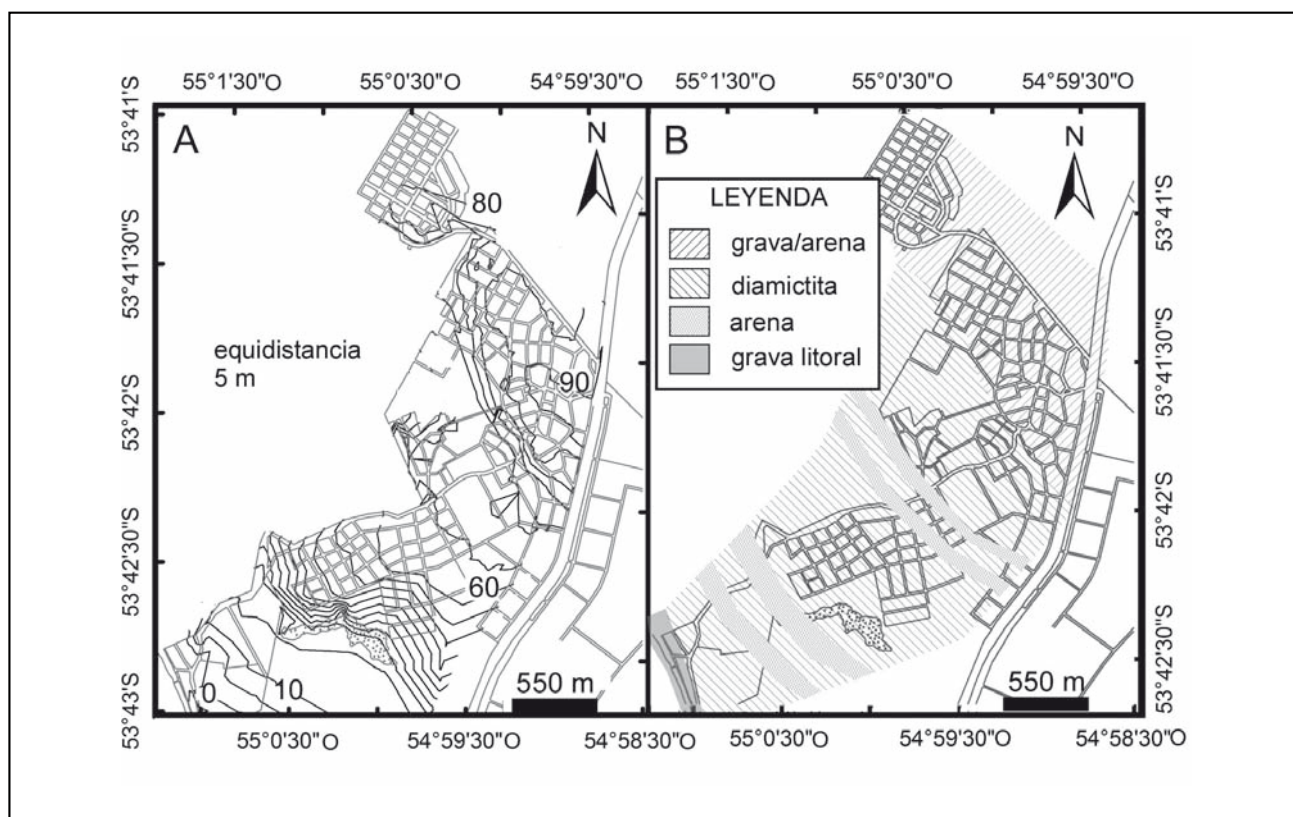


Figura 10. A) Curvas de nivel con equidistancia 5 metros para la zona urbana y suburbana de Tolhuin; las cotas están referidas al nivel del Lago Fagnano. B) Distribución de los principales tipos texturales de suelos sobre los que apoya la urbanización de Tolhuin.

Los ensayos de penetración por el método SPT siguieron las normas patrón en geotecnia. Estos ensayos fueron hechos in situ. Con el fin de independizar las mediciones de SPT de la profundidad a la que se toma la muestra, el valor de N se normaliza en función del esfuerzo efectivo de sobrecarga. Seis ensayos dieron una media de $N=23$ (informes inéditos del Instituto Provincial de la Vivienda de Tierra del Fuego).

EFFECTO AMPLIFICADOR DEL SUELO

El factor de amplificación de un suelo, también denominado el efecto local, es la modificación en la amplitud de la vibración sísmica de un sitio sobre la superficie terrestre por efecto de la interposición de un espesor de sedimento poco consolidado. En términos generales, una onda sísmica aumenta de amplitud al atravesar una capa deformable en su trayectoria hacia la superficie. Para valores de la máxima aceleración horizontal (PGA) en roca inferiores a 0,1g, o <10% de la gravedad terrestre, aproximadamente, el efecto del suelo es despreciable. Para valores de PGA de hasta 0,5g, aproximadamente, una columna de suelo de más de unos 10 metros de espesor suele tener potencial para amplificar la aceleración sísmica. La amplificación puede resultar en valores de aceleración dos a tres veces superiores a los que se registrarían sobre un sustrato de roca dura. La mayor amplificación ocurre a la frecuencia natural del suelo, o frecuencia fundamental, con un período asociado que se denomina período característico del sitio, el cual depende de las condiciones geotécnicas y el espesor del suelo.

Si una edificación tiene un período natural similar al período natural del suelo sobre el cual apoya, el conjunto pue-

de entrar en resonancia y se incrementa la amenaza sísmica para la estructura edilicia. La respuesta de un edificio a una aceleración impuesta en su base está fuertemente controlada por la altura del edificio. En Tolhuin la casi totalidad de los edificios, tanto los públicos como los privados, son de una sola planta. El período de onda característico para tales construcciones puede estimarse por:

$$T=0,1N \quad (2)$$

donde N=número de pisos de la construcción. Así, pues, para Tolhuin, $T=0,1$ segundos, y la frecuencia natural $f_n=10$ Hertz.

El efecto del suelo en la aceleración máxima horizontal se estimó mediante el programa de computación EERA ('Equivalent-linear Earthquake site Response Analyses'; Bardet et al. 2000; descarga gratuita en: <http://www.ce.memphis.edu/7137/eera.htm>). Este programa requiere el ingreso de un terremoto de diseño y de un perfil de suelo con propiedades geotécnicas que permitan calcular G/G_{max} , la relación de módulos dinámicos de corte ('dynamic shear moduli'). Como terremoto de diseño se empleó uno de magnitud 6,5, ocurrido en Loma Prieta, California, asociado a una zona de subducción. El módulo de elasticidad de la columna de suelo se obtuvo de los ensayos geotécnicos. Los valores de SPT y de CBR permiten aproximar valores de la velocidad de corte (V_s) y con V_s estimar el módulo elástico del suelo. Existe una buena correlación estadística entre los valores del índice CBR y la velocidad de cor-

te (shear wave velocity), hasta alrededor de 400 m/seg (Rosyidi et al. 2006). La ecuación representativa de esta correlación es:

$$\text{CBR} = 0.0006 (V_s)^{1,99} \quad (3)$$

Existe también una moderada correlación entre los valores de SPT y de V_s , representada por la ecuación (Andrus et al. 2003):

$$V_s = 72,9 (N60)^{0,224} Z^{0,13} \quad (4)$$

donde Z es la profundidad de la muestra y N60 es el valor normalizado de SPT. Se obtuvieron valores de V_s entre 200 m/seg y de 224 m/seg, a partir de los promedios de CBR y de SPT, respectivamente. Estos valores de velocidad de corte pueden aplicarse al tramo somero del perfil, poco compactado. Para la diamictita compactada que aflora a lo largo del faldeo se adoptó $V_s=450$ m/seg, tomado de Bradley et al. (1998). Las intercalaciones de arena en el tramo superior se agruparon en un único banco de 10 m de espesor, al cual se aplicó $V_s=270$ m/seg. Los valores de V_s empleados en la simulación están indicados en la Figura 11A. Con estos datos se corrió una simulación con EERA sobre el tramo de 50 metros superiores de la columna del sustrato de Tolhuin. El resultado sugiere que la amplificación podría incrementar a más del doble la aceleración horizontal (Figura 11B). El valor máximo de aceleración es sensible al comportamiento de la intercalación de arena. La simulación permite concluir la conveniencia de mejorar el conocimiento de la estratigrafía y de las características geotécnicas de las distintas unidades del suelo.

Vulnerabilidad edilicia

La información sobre tendidos y edificios críticos, topografía y características geotécnicas de los suelos y sus espesores

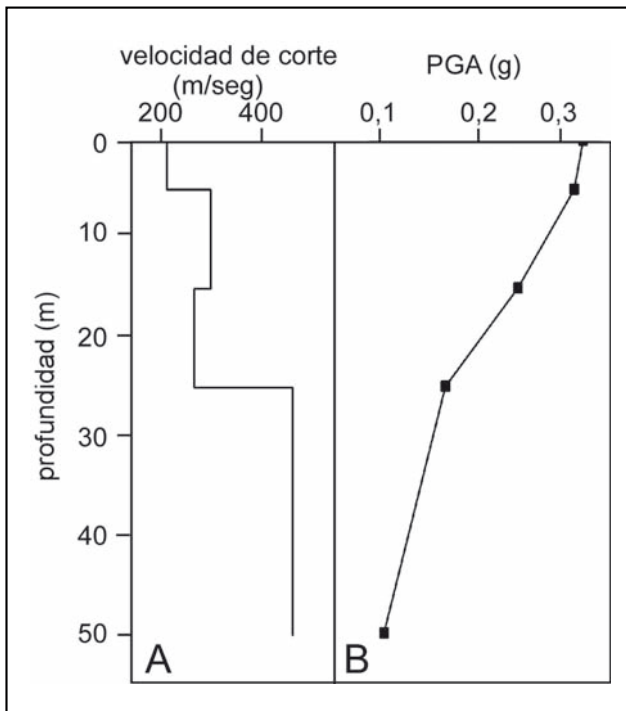


Figura 11. A) Velocidades de corte adoptadas para el perfil de suelo. B) Amplificación resultante de la simulación con el programa EERA.

tiene como objetivos: a) facilitar el acceso rápido a sitios de posibles cortes de suministro; b) prever, en base a informes de Defensa Civil o de vecinos, la posibilidad de daño a tendidos críticos; c) determinar con antelación a la emergencia la dificultad de acceso debida a la topografía; y d) prever la dificultad de acceso por falta de caminos abiertos para llegar a viviendas aisladas.

Tolhuin ha pasado de tener 245 viviendas en 1991 (censo INDEC) a tener cerca de 1000 viviendas actualmente, además de un centenar de edificaciones de diversos usos. En una primera aproximación, la condición estructural de las construcciones en Tolhuin se puede simplificar en dos grandes categorías. Por un lado están los edificios construidos por organismos estatales, tales como viviendas construidas por el Instituto Provincial de la Vivienda, y escuelas y algunos edificios de gobierno construidos por organismos bajo control de la Nación, los cuales cumplen con la norma de sismorresistencia implementada por el INPRES (Instituto Nacional de Prevención Sísmica). Por otro lado está el resto de las edificaciones, mayoritariamente viviendas, comercios unifamiliares, y galpones de chapa, las cuales en gran parte fueron construidas sin el control profesional adecuado. Empleando esta simplificada clasificación edilicia, y adoptando los parámetros de amenaza sísmica presentados arriba, se simuló con RADIUS dos escenarios de desastre, respectivamente con epicentros a 80 km y a 10 km de Tolhuin. El escenario de sismo cercano dio $\text{MMI}=8,8$ y estimó un daño edilicio, medido en número de edificios dañados, con una media de 33,9%. El escenario de sismo lejano se tradujo en $\text{MMI}=6,0$ y un daño estructural medio estimado en 2,6%. La simulación con EERA dio un espectro de frecuencia de la pseudo-aceleración con período pico entre 0,5 y 0,6 seg. La moda del espectro difiere considerablemente del período fundamental de las edificaciones de una planta que dominan la urbanización de Tolhuin, lo cual disminuye el riesgo de daño edilicio extremo.

CONCLUSIONES

La combinación de los factores de amplificación del suelo con la ley de atenuación dio un mapa de intensidades sísmicas, suponiendo un epicentro y magnitud conocidos del Terremoto Máximo Considerado. En este estudio se supuso un epicentro sobre la falla Magallanes-Fagnano y sobre el límite con Chile. El resultado demuestra que la intensidad disminuye radialmente desde el epicentro pero se potencia en zonas cubiertas por suelos duros y blandos. En vista de la amplia distribución de este tipo de sustrato en Tierra del Fuego, sobre todo en cotas bajas, tentadoras para la expansión urbana, y del rápido crecimiento poblacional, que fuerza la expansión urbana, el efecto amplificador del suelo debe tenerse en cuenta. La práctica de definir normativas sobre sismorresistencia basándose únicamente en valores de PGA en roca puede ser inadecuada en Tierra del Fuego.

La ciudad de Tolhuin, situada a menos de 1 km de la traza de la falla Magallanes-Fagnano, es la población que tiene mayor riesgo de sufrir daños graves ante un evento sísmico por la cercanía a la fuente sísmogénica y por las características geotécnicas de los suelos. La aplicación del método RADIUS guió la sistematización de información útil en la valoración de la exposición al peligro sísmico del área urbana de Tolhuin. Los resultados de la simulación con EERA demuestran que el sustrato glaciogénico de Tolhuin puede amplificar a más del doble una vibración sísmica.

En Tolhuin, la edificación ejecutada por entes gubernamentales generalmente cumple con las normas sismorresistentes implementadas por el INPRES. Las edificaciones de particulares, mayormente viviendas familiares, en cambio, en muchos casos no han estado sujetas a un control estructural riguroso. Los resultados de este estudio enfatizan la necesidad de realizar campañas sostenidas de concientización acerca de la conveniencia de construir según normas sismorresistentes, adecuadas para Tierra del Fuego, y trabajar en la definición de un plan de prevención sísmica que proteja la vida y los bienes materiales.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecemos al COFECYT (Consejo Federal de Ciencia y Tecnología) por los fondos aportados a través de la convocatoria PFIP-Convenio N° 063 para el desarrollo de la investigación. También agradecemos y destacamos la colaboración de oficinas públicas y empresas al proporcionar información valiosa para la ejecución de este trabajo. Asimismo agradecemos a los árbitros de ASAGAI por los comentarios constructivos que ayudaron a mejorar el manuscrito.

TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

- ABASCAL, L. DEL V. Y G. GONZÁLEZ-BONORINO, 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.
- ANDRUS, R.D., J. ZHANG, B.S. ELLIS Y C.H. JUANG, 2003.
Guide for estimating the dynamic properties of South Carolina soils for ground response analysis. *South Carolina Department of Transportation, SC-DOT Research Project No. 623, Report N° FHWA-SC-03-07*.
- BARDET, J.P., K. ICHII Y C.H. LIN, 2000.
EERA - A computer program for Equivalent-linear Earthquake site Response Analyses of layered soil deposits. *Department of Civil Engineering, University of California, Los Angeles, 37 pp*.
- BARRIENTOS, S.E., 2007.
Earthquakes in Chile. En Moreno, T. y W. Gibbons (eds.) *The geology of Chile. The Geological Society of London, London, p. 263-289*.
- BASSIN, C., G. LASKE Y G. MASTERS, 2000.
The current limits of resolution for surface wave tomography in North America. *EOS Transactions AGU. Volume 81, F897*.
- BRADLEY J.C., Z. HAJNAL Y A. PRUGGER, 1998.
Shear-wave studies in glacial till. *Geophysics. Volume 63: 1273-1284*.
- BUFFONI, C., N.C. SABBIONE, G. CONNON Y J.L. HORMAECHEA, 2009.
Localización de hipocentros y determinación de su magnitud en Tierra del Fuego y zonas aledañas. *Geoacta. Volume 34:75-86, Buenos Aires*.
- CAMINOS, R., 1980.
Cordillera fueguina. *En Geología regional argentina. Academia Nacional de Ciencias, Córdoba. Volumen 2: 1463-1501*.
- CAMPBELL, K.W. 1997.
Empirical near-source attenuation relationships for horizontal and vertical components of peak ground acceleration, peak ground velocity, and pseudo-absolute acceleration response spectra. *Seismological Research Letters. Volumen 68:154-179*.
- CFI, 1996.
Estudio sobre provisión de agua para la Comuna de Tolhuin. *Programa de Desarrollo de Pequeñas Comunidades, Consejo Federal de Inversiones, 17 p*.
- COSTA, C.H., R. SMALLEY, D. SCHWARTZ, H. STENNER, M. ELLIS, E. AHUMADA Y M.-S. VELASCO, 2006.
Preliminary seismological observations at an onshore transform boundary: The Magallanes-Fagnano Fault, Tierra del Fuego. *Revista de la Asociación Geológica Argentina. Volumen 61: 647-657, Buenos Aires*.
- DEMETS, C., R.G. GORDON Y D.F. ARGUS, 2010.
Geologically current plate motions. *Geophysical Journal International. Volumen 181:1-80. doi:10.1111/j.1365-246X.2009.04491.x*.
- DNV, 2004.
Informe de Ingeniería, IIIa2. Capítulo 1, Suelos y materiales. Ruta Khamy-Kosobo. *Dirección Nacional de Vialidad, 78 p., Buenos Aires*
- FEBRER, J.M., M.P. PLASENCIA Y N.C. SABBIONE, 2001.
Local and regional seismicity from Ushuaia broadband station observations (Tierra del Fuego). *Terra Antarctica. Volume 8: 35-40*.

- FEMA, 2003.
NEHRP recommended provisions for seismic regulations for new buildings and other structures (FEMA 450).
Part 1: Provisions. National Institute of Building Sciences, 340 pp.
- FUNCOR, 1997.
Estudio de suelos. Ampliación muelle comercial. Puerto Ushuaia, provincia de Tierra del Fuego.
Dirección Provincial de Puertos, 76 p.
- GONZÁLEZ BONORINO, G., V. RINALDI, L. DEL V. ABASCAL, P. ALVARADO, G.G. BUJALESKY Y A. GÜELL, 2012.
Holocene paleoseismicity in southern Patagonia (Argentina-Chile; 52°-55°S); the role of the Magallanes-Fagnano transform fault.
Journal of Natural Hazards. Volumen 61: 337-349.
- GREGG, P.M., J. LIN Y D.K. SMITH, 2006.
Segmentation of transform systems on the East Pacific Rise: Implications for earthquake processes at fast-slipping oceanic transform faults.
Geology. Volumen 34: 289-292.
- INSTITUTO SUPERIOR DE RECURSOS HIDRICOS, 1998.
Ampliación del puerto de Ushuaia, Tierra del Fuego.
Informe Técnico Final, Documento I, Memorias Técnicas, 104 pp. Córdoba.
- JASCHEK, E., N. SABBIONE Y P. SIERRA, 1982.
Reubicación de sismos localizados en territorio argentino (1920-1963).
Observatorio Astronómico de la Universidad Nacional de La Plata, Serie Geofísica. Volumen XI, No 1, 79 pp.
- LAWRENCE, J.F. Y D.A. WIENS, 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. Volumen 94: 977-987.
- LODOLO, E., M. MENICETTI, R. BARTOLE, Z. BEN AVRAHAM, A. TASSONE Y H. LIPPAI, 2003.
Magallanes-Fagnano continental transform fault (Tierra del Fuego, southernmost South America).
Tectonics. Volumen 22(6), 1076, DOI: 10.1029/2003TC001500.
- MARTIN, A., 1990.
Hacia una nueva regionalización y cálculo de peligro sísmico en Chile.
Tesis, Universidad de Chile, Santiago, 207 pp.
- MARTINIC, M., 2008.
Registro histórico de antecedentes volcánicos y sísmicos en la Patagonia austral y la Tierra del Fuego.
Magallania. Volumen 36: 5-18.
- MEGLIOLI, A., 1992.
Glacial geology and chronology of southernmost Patagonia and Tierra del Fuego, Argentina and Chile.
Tesis. Lehigh University, 216 pp., Nueva York.
- PELAYO, A. Y D. WIENS, 1989.
Seismotectonics and relative plate motions in the Scotia sea region.
Journal of Geophysics Research. Volumen 94: 7293-7320.
- REITER, L., 1991.
Earthquake hazard analysis.
Columbia University Press, 254 pp., Nueva York.
- ROSYIDI, S.A., K.A.M. NAYAN, M.R. TAHA Y A. ISMAIL, 2006.
Estimating G-max & field CBR of soil subgrade using a seismic method.
<http://www.NDT.net>. Volumen 11, No.6.
- SABBIONE, N., G. CONNON, J.L. HORMAECHEA Y M. ROSA, 2007.
Estudio de sismicidad en la provincia de Tierra del fuego, Argentina.
Geoacta. Volumen 32: 41-50.
- SEGEMAR, 2002.
Provincia de Tierra del Fuego - Condiciones geotécnicas. Subárea este del lago Fagnano.
<http://www.mineria.gov.ar/estudios/lirn/tierradelfuegot-6zona.asp#m2>.
- SMALLEY, R., JR., E. KENDRICK, M.G. BEVIS, I.W.D. DALZIEL, F. TAYLOR, E. LAURÍA, R. BARRIGA, G. CASASSA, E. OLIVERO Y E. PIANA, 2003.
Geodetic determination of relative plate motion and crustal deformation across the Scotia-South America plate boundary in eastern Tierra del Fuego.
Geochemistry Geophysics Geosystems. Volumen 4: 1-19.

SPENCE, R.J.S., 1990.

Seismic risk modeling - A review of methods.

Contribution to Verso il New Planning, University of Naples, Papers of Martin Centre for Architectural and Urban studies, 155 pp., Cambridge.

TRIFUNAC, M.D. Y A.G. BRADY, 1975.

On the correlation of seismic intensity scales with the peaks of the recorded ground motion.

Bulletin, Seismological Society of America. Volumen 65: 103-145.

WEST, T.R., 2002.

Subsurface investigations of several glacial successions related to engineering construction.

Proceedings of the Indiana Academy of Science, Illinois, 15 p.

WINSLOW, M.A., 1982.

The structural evolution of the Magallanes Basin and neotectonics in the southernmost Andes.

En Craddock, C. (ed.) Antarctic Geoscience. I.U.G.S., Series B(4): 143-154.