

Estimaciones puntuales de la amenaza sísmica

Leonardo Alvarez, INETER, Managua

RESUMEN

Cuando se realiza un estimado de la amenaza sísmica, lo más común es presentar un conjunto de mapas con valores de algún parámetro del movimiento del terreno para diferentes períodos de retorno. En algunas ocasiones esos resultados se acompañan de gráficos con representaciones de la amenaza sísmica para algunos puntos aislados. Si es necesario ubicar una inversión que requiera ser protegida adecuadamente de los efectos de los terremotos, esa información resulta insuficiente y se toman decisiones sobre una base incompleta de conocimiento. Hay dos formas de enfrentar este problema; una de ellas es realizar de nuevo los estimados de amenaza sísmica para los puntos de interés, lo cual no siempre es posible, y la otra es realizar un procesamiento de los resultados obtenidos cuando se hicieron los estimados de amenaza sísmica de forma de extraer la información necesaria para obtener unos estimados puntuales de la misma con buena precisión. Se presenta un método para obtener tales resultados con ejemplos de Cuba y Nicaragua. La base para realizar los cálculos la constituyen los archivos de resultados de los estimados de amenaza sísmica. Estos están formados por los períodos de retorno de sacudidas con diferente valor del parámetro del movimiento del terreno. Con un conjunto de programas se procesan los mismos para obtener los gráficos deseados. Los cálculos se realizan con programas en FORTRAN 77 y los gráficos se hacen usando software de código abierto. El sistema está preparado en forma de aplicación web, en un esquema cliente-servidor, sobre un servidor Linux.

Introducción

Cuando se enfrenta una inversión importante, es muy necesario conocer en detalle la amenaza sísmica a que estará sometida, con vistas a proyectar los distintos objetos de obra de forma que no sea severamente dañada, ni que se produzcan afectaciones a la población o al medio ambiente, al ocurrir un terremoto fuerte. La práctica habitual en ingeniería es tomar el valor de aceleración pico que aparece en la norma de construcciones antisísmicas y buscar el espectro que corresponda al tipo de suelo presente, debidamente escalado según la aceleración pico, según indica la mayoría de los códigos de construcciones antisísmicas. Si bien cumpliendo con esos requerimientos se logra obtener el permiso de construcción, surgen varias preguntas: ¿está adecuadamente protegida la inversión ante la ocurrencia de un terremoto fuerte?, ¿la promediación presente en los espectros de una norma no pasará por alto posibles efectos de resonancia? ¿tienen la actualidad necesaria los estimados de amenaza sísmica que se obtienen por este procedimiento? La respuesta a esas y otras preguntas que puedan surgir indican que hay que buscar más información a la hora de tomar decisiones sobre la amenaza sísmica a que está sometida cualquier inversión. El presente trabajo trata sobre ello.

MÉTODOS

La base de la información sobre amenaza sísmica incluida en los códigos de construcciones antisísmica la constituyen los estudios regionales de la amenaza sísmica. Cuando se realiza un estimado de la amenaza sísmica se toman en consideración las posibles fuentes, la estadística de ocurrencia de los terremotos y la magnitud máxima posible en cada una de ellas, así como las fórmulas de atenuación de los parámetros del movimiento del terreno aplicables. A eso se le suma la selección de un modelo de cálculo (asociado al uso de un programa de cómputo específico) y se pasa directamente a estimar la amenaza sísmica. Cuando no es unívoca la decisión sobre cada uno de los aspectos mencionados es posible realizar diversos estimados de la amenaza combinando las diferentes decisiones sobre las partes constituyentes del cálculo, o que se conoce como “árbol lógico de

decisión” (Fig.1). Eso obliga a realizar un procesamiento estadístico posterior para obtener una “solución de compromiso”.

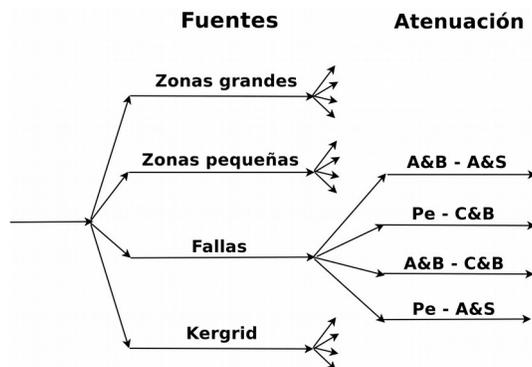


Fig. 1. Ejemplo de formación de un árbol lógico para el cálculo de la amenaza sísmica. La primera división corresponde a la selección de modelos de fuentes, mientras que la segunda corresponde al uso de diferentes fórmulas de atenuación de las amplitudes espectrales (modificado de Alvarez et al., en prensa)

Aunque al final de estos trabajos lo que se presenta es un mapa o un conjunto de ellos, lo cierto es que los estimados de amenaza para construir tales mapas la constituyen están en forma de estimados para puntos aislados. Así, lo que se hace es resolver la llamada integral de la amenaza, que por ejemplo en el programa CRISIS’2007 (Ordaz et al., 2008) toma la forma:

$$v_i(a) = \sum_j w_{ij} \int_{M_0}^{M_u} \left(-\frac{d\lambda_i(M)}{dM} \right) \Pr(A > a | M, R_{ij}) dM \quad v(a) = \sum_{i=1}^N v_i(a)$$

para un conjunto de puntos.

El proceso de cálculo implica dividir la región de estudio en una malla regular de puntos, y en cada punto se realizan los estimados de la amenaza sísmica (Fig. 2a). Aunque varía de un programa de cómputo a otro, el resultado en cada punto será una curva de amenaza sísmica, o un conjunto de ellas (Fig. 2b). Estas curvas pueden ser del tipo de período de retorno vs. valor del parámetro, probabilidad de no excedencia vs. valor del parámetro, etc. El carácter discreto de las soluciones hace que dichas curvas sean el resultado de la interpolación en un número finito de puntos. Cuando en lugar de trabajar con un solo parámetro se trabaja con un espectro (espectro de amenaza uniforme – UHS), se pueden manipular estos resultados y presentar un serie de espectros para diferentes períodos de retorno o curvas de amenaza para diferentes períodos del espectro. Algunos programas de cómputo permiten además estudiar para cada punto la influencia de distintas fuentes y otros parámetros (Fig. 3). Sin embargo, los archivos de resultados que permiten analizar esta influencia son sumamente extensos y es habitual solo calcularlos para puntos aislados.

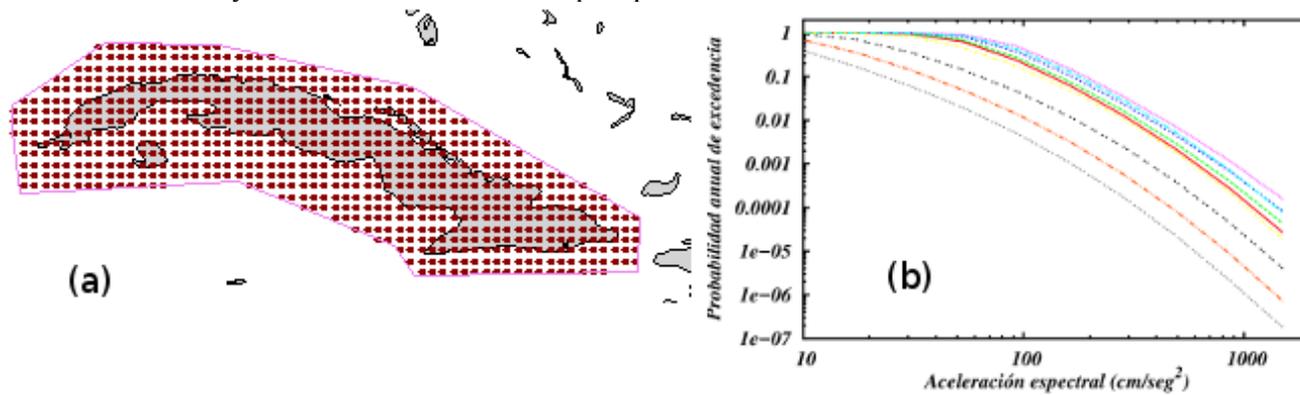


Fig. 2. (a) Ejemplo de puntos de una malla donde se calcula la amenaza sísmica, (b) Amenaza sísmica en un punto para diferentes períodos de oscilación; en rojo PGA.

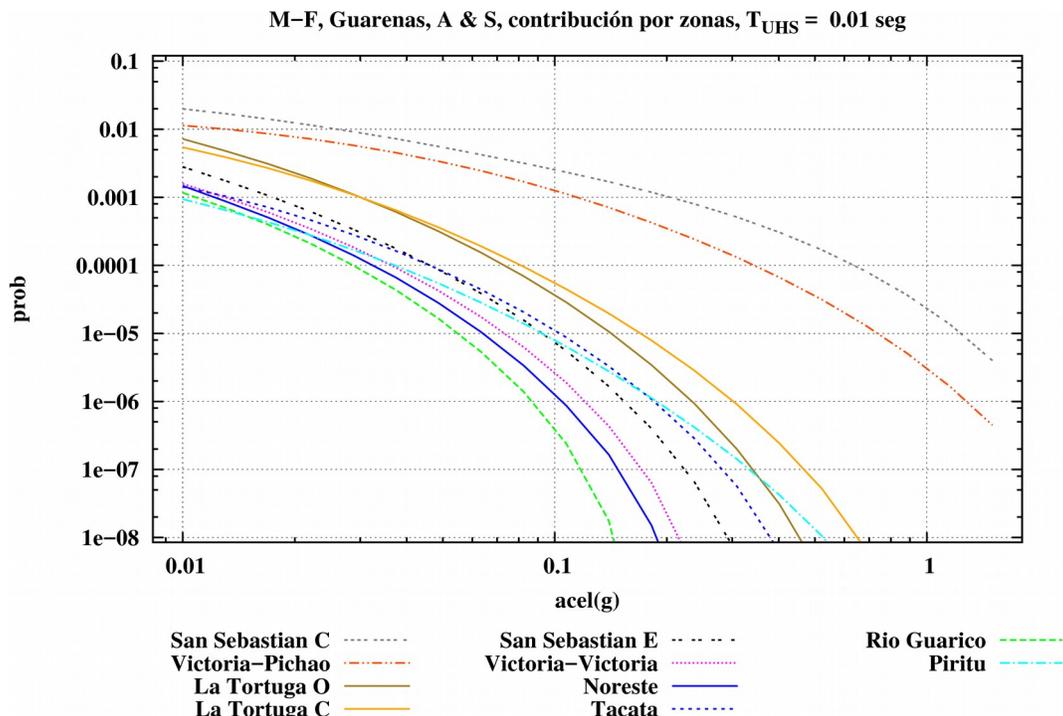


Fig. 3. Ejemplo de desagregación de la amenaza sísmica en un punto expresada como contribución de las diferentes fallas que afectan a dicho punto

¿Como obtener los estimados fundamentales de la amenaza sísmica para un punto que no coincida con los nodos de la malla donde ésta se calculó? Es evidente que se deben interpolar los valores de los puntos cercanos. Se analizaron dos métodos de interpolación: inverso de distancia e inverso del cuadrado de la distancia, los cuales arrojaron resultados muy próximos, por lo que se decidió que aplicando el primero de ellos se podían obtener resultados satisfactorios. En la Fig. 4a,b se presenta un ejemplo de ubicación de puntos y obtención de curva de amenaza sísmica para PGA por interpolación.

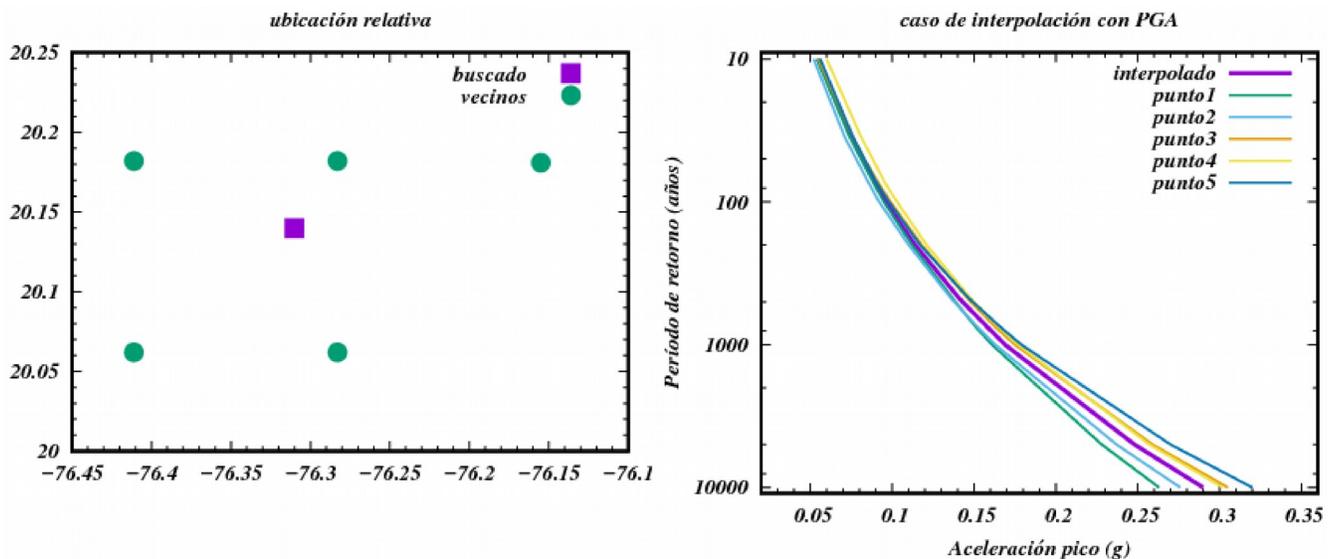


Fig. 4. Ejemplo de interpolación de PGA. Se realizó una búsqueda de puntos del cálculo inicial ubicados en un radio de 18 km del punto donde se quiere interpolar (izquierda). Los 5 puntos encontrados poseen estimados de periodos de retorno para PGA. Se realiza una interpolación por el método del inverso de la distancia. La curva obtenida junto con las iniciales se muestran a la derecha.

RESULTADOS

Los valores para interpolar las curvas tienen que ser obtenidos de las salidas en formato texto de los diferentes programas de cómputo utilizados para el cálculo de la amenaza. Cada uno de esos programas tiene como resultado diferentes archivos con formatos particulares, donde hay que buscar los parámetros deseados. En este trabajo se prepararon los programas para procesar los archivos de resultados de los programas SEISRISKIII (Bender y Perkins, 1987), CRISIS'2007 y CRISIS'2014 (Ordaz et al, 2008, 2014), lo que en principio se puede hacer para los resultados de cualquier programa de cálculo de la amenaza sísmica. A estos se suman otros programas para preparar diversos tipos de gráfico. Los programas básicos de selección y procesamiento primario de datos se confeccionaron en FORTRAN 77, y se usan diversos programas de código abierto que vienen en todas las distribuciones de Linux, como el gnuplot (William and Kelly, 2010) para la confección de gráficos y otros para el procesamiento ulterior de mismos.

Por simplicidad en el procesamiento se prepararon algunas aplicaciones web para realizar un procesamiento estándar de estos resultados y obtener los gráficos más usuales de forma automática. Estas aplicaciones web incluyen también la preparación de mapas de amenaza sísmica para períodos de retorno arbitrarios, que no son objeto de este trabajo y se preparan con el GMT (Wessell y Smith, 1988). El funcionamiento es de un esquema cliente-servidor, donde el servidor es en sistema operativo Linux y usa solamente software de código abierto, mientras que el cliente puede ser de cualquier sistema operativo y usar cualquier navegador. En el cliente se lee una planilla, se pasa el control al servidor donde con una combinación de programas y scripts en cgi y perl se realiza todo el proceso, que se devuelve al cliente en forma de mapas, gráficos y ficheros texto que pueden ser descargados fácilmente (Fig. 5).

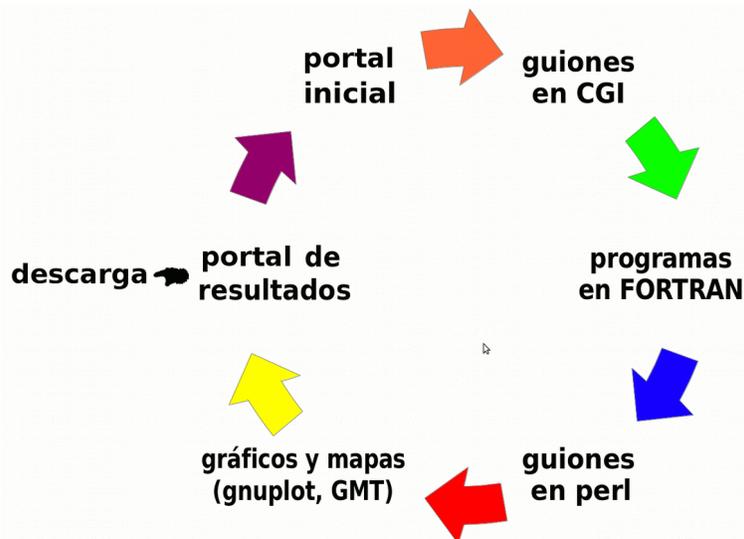


Fig. 5. Esquema de trabajo del sistema cliente-servidor donde están instaladas las aplicaciones para procesamiento de los resultados básicos de un estimado regional de amenaza sísmica. En el cliente solo son visibles los portales donde se hace la petición y donde se obtienen los resultados.

En la Fig. 6 se presenta la planilla correspondiente al caso de los estimados de amenaza sísmica en roca realizados para Nicaragua en el marco del proyecto RESIS-II (Molina et al., 2008) usando el programa CRISIS'2007. En este caso los estimados básicos están en una malla de $0.1^\circ \times 0.1^\circ$. Los mismos fueron recalculados para añadir otros 3 valores de períodos del espectro de amenaza uniforme que permitiese una mayor calidad en las interpolaciones. Los gráficos que se presentan son de 2 tipos: aceleración espectral en función del período del espectro (Fig. 7) para un período de retorno dado (en cada solicitud se calcula para un solo período de retorno) y probabilidad anual de excedencia vs. aceleración espectral (fig. 8). También se prepara un gráfico de los espectros de respuesta según la norma RCN-07 (MTI, 2007) ajustados de acuerdo al valor de PGA. En la Fig.9 se comparan los espectros obtenidos por el procedimiento descrito con los que se obtienen del código sísmico vigente en Nicaragua para el mismo valor de a_0 (PGA o aceleración pico)

Amenaza sísmica, estimados del proyecto RESIS-II Espectro uniforme de amenaza (UHS)

Este portal permite la estimación de la amenaza sísmica en términos del espectro de peligro uniforme para un período de retorno dado. Permite obtener mapas así como estimados puntuales mediante interpolación usando la base de datos creada en el:

Proyecto RESIS-II. Evaluación de la amenaza sísmica en Centroamérica,
Enrique Molina, Griselda Marroquín, José Jorge Escobar, Emilio Talavera, Wilfredo Rojas, Álvaro Climent, Eduardo Camacho, Belén Benito y Conrad Lindholm
2008, 237 pp.

En el mismo se calculó la amenaza sísmica en términos de aceleración espectral (S_a) para 6 puntos del espectro, que en esta aplicación se extienden a 9, correspondientes a los períodos: 0.0, 0.01, 0.05, 0.1, 0.2, 0.5, 1.0, 1.5 y 2.0 segundos. Por comodidad de representación en escala logarítmica, el valor 0.0 se sustituye por 0.001. Se usó un árbol lógico de 4 ramas.

Dado el carácter multivariado de los resultados básicos, si se desea la amenaza sísmica para diferentes períodos de retorno hay que correr la aplicación varias veces, fijando un período de retorno en cada corrida.

Caso de estimado puntual

Nombre del lugar:
Longitud:
Latitud:

¿Desea obtener los espectros de respuesta de acuerdo a la norma ajustados al valor de PGA? (esto solo se puede hacer si seleccionó como período de retorno 475 años): no si

Si seleccionó afirmativo diga el tipo de obra para el que desea los espectros: A B y C (la norma no diferencia entre los espectros para ambos tipos de obra)

El código usado es:

Ministerio de Transporte e Infraestructura (MTI) (2007): Reglamento Nacional de Construcción RCN-07. Dirección general de Normas de Construcción y Desarrollo Urbano. Managua, Nicaragua, 154 pp.

Fig. 6. Selección de la portada de la aplicación web correspondiente al caso de estimado puntual usando los resultados del proyecto RESIS II (Molina et al., 2008).

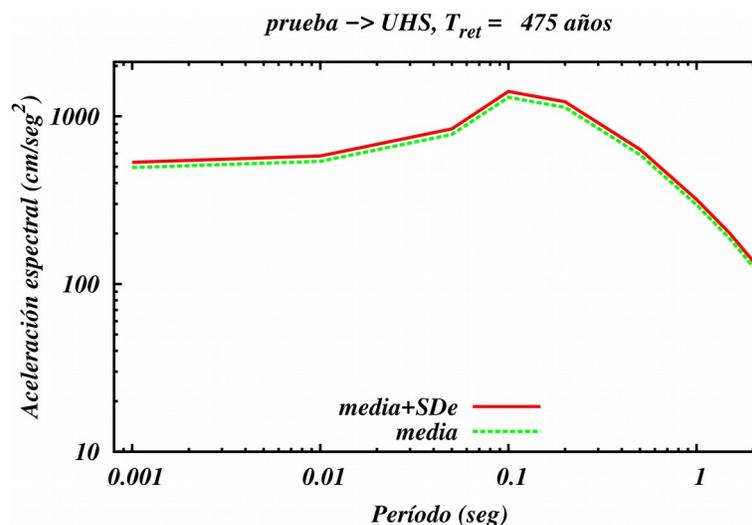


Fig. 7. Espectro uniforme de amenaza para el punto desado. Se representan el valor del espectro y el valor del espectro mas su dispersión estándar. Los espectros se construyen con los 9 valores del período usados, unidos por líneas rectas.

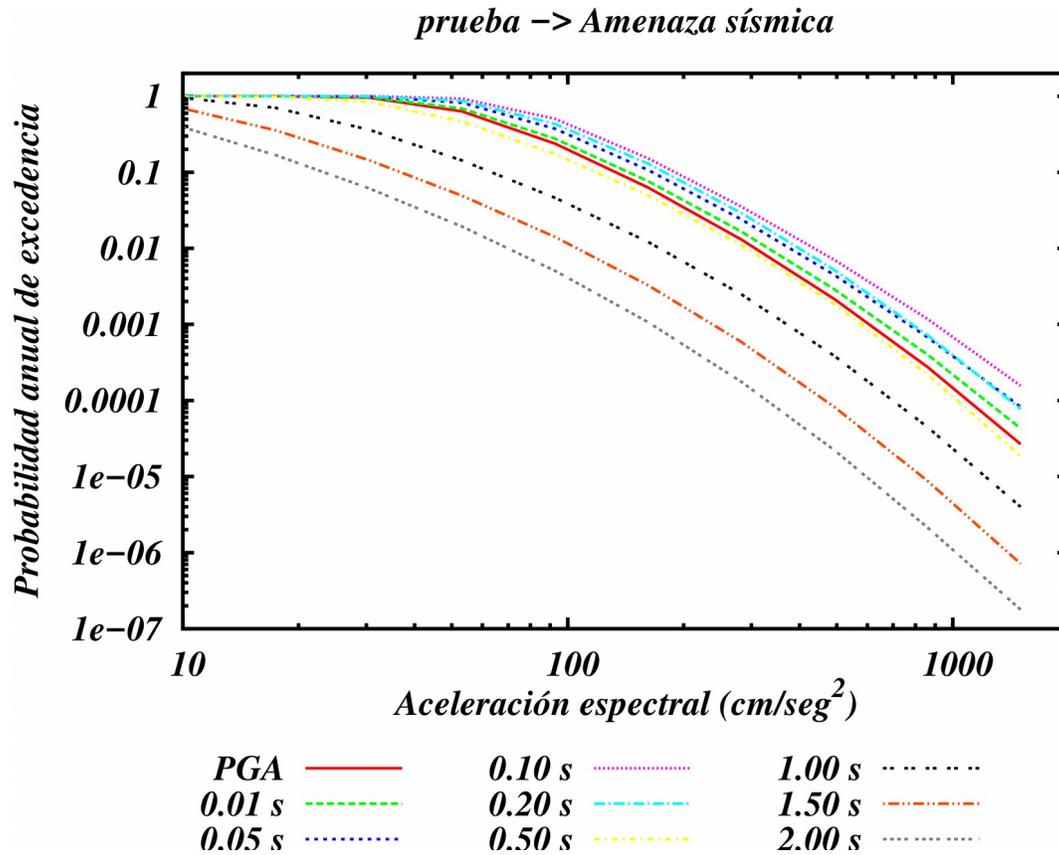


Fig. 8. Probabilidad anual de excedencia para todos los períodos del espectro calculados

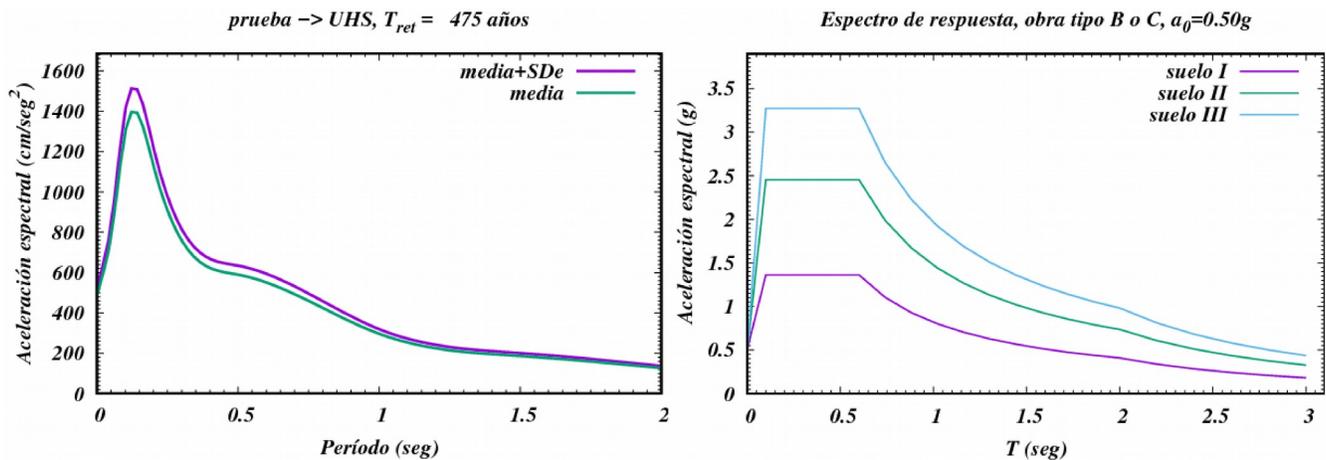


Fig. 9. Comparación entre los espectros para roca obtenidos por el procedimiento descrito y los que se obtienen usando los espectros que trae la norma sísmica vigente en Nicaragua. Ambos están referidos a una aceleración pico de 0.5g, que no corresponde a las de las diferentes zonas que aparecen en dicha norma.

La planilla correspondiente a los estimados de amenaza sísmica en roca para Cuba (Alvarez et al., en prensa), realizados con el programa CRISIS'2014 (Ordaz et al., 2014), tiene los mismos elementos que la correspondiente a Nicaragua, con la excepción del ajuste a la norma, pero permite además manipular la estadística del árbol lógico (Fig. 10). Debe señalarse que este procedimiento está implementado tanto en el Centro Nacional de Investigaciones Sismológicas de Cuba (CENAI), como en el Instituto Nicaragüense de estudios territoriales como un servicio científico técnico que se realiza a solicitud de los clientes.

Tipo de estadística:

- ajuste a distribución normal (media y media+dispersión epistémica)
- simple (mediana y percentil 0.84)

Asignación de pesos.

- iguales por rama
- combinación de pesos recomendada por los autores
- a seleccionar por el usuario (en este caso debe llenar la tabla que sigue)

Asignación interactiva de pesos:

Se usa el convenio de CRISIS'20014: Este peso no puede ser fraccionario, pues el CRISIS no lo admite. La mejor forma de determinar esos pesos es crear una escala de importancia en números enteros. Puede ser 1-2, entre 1 y 10, entre 1 y 100, etc. No importa la cantidad de ramas que contenga el fichero. El programa normaliza estos pesos para que al final la suma de las probabilidades asociadas sea 1.

Número de ramas: 16

- 1) 9_Mth_4.5_A&B_C&B
- 2) 9_Mth_4.5_Pezeshk_C&B
- 3) 9_Mth_4.5_A&B_A&S

siguen números 4-16

Fig. 10. Elementos para manipular la estadística del árbol lógico que fueron introducidos en el caso de la amenaza sísmica en roca para Cuba, lo que fue posible debido al número de ramas presentes en el árbol.

CONCLUSIONES

- Se presentó un procedimiento para la estimación de la amenaza sísmica para puntos arbitrarios a partir de los estimados realizados con carácter regional, a partir de los archivos de los estimados originales cuyos datos son interpolados. El mismo está establecido como servicio a brindar a clientes en el CENAI (Cuba) y el INETER (Nicaragua).
- Este procedimiento está instalado en un servidor web sobre Linux que facilita la obtención de los resultados deseados.

REFERENCIAS

- Alvarez, L.; Lindholm, C.; Villalón, M. (en prensa): Seismic Hazard for Cuba; A new approach. *Bul. Seis. Soc. Am.*, vol 77, No. 1., 11 pp.
- Bender, B.; Perkins, D.M. (1987): SEISRISK III: A computer program for seismic hazard estimation, U. S. Geological Survey Bulletin 1772, Denver, Colorado, 48 pp.
- Molina, E.; Marroquín, G.; Escobar, J.J.; Talavera, E.; Rojas, W.; Climent, A.; Camacho, E.; Benito, B.; Lindholm, C. (2008): Proyecto RESIS-II. Evaluación de la amenaza sísmica en Centroamérica, 237 pp.
- MTI (2007): Ministerio de Transporte e Infraestructura. Reglamento Nacional de Construcción RCN-07. Dirección general de Normas de Construcción y Desarrollo Urbano. Managua, Nicaragua, 154 pp.
- Ordaz, M.; Aguilar, A.; Arboleda, J. (2008): CRISIS2007. Program for computing seismic hazard. Instituto de Ingeniería de la UNAM <<http://www.iingen.unam.mx>>. La versión usada (7.6) se descarga de: <<http://www.ecapra.org/crisis-2007>>.
- Ordaz, M., F. Martinelli, A. Aguilar, J. Arboleda, C. Meletti and C. D'Amico (2014). CRISIS 2014, Ver 1.2, Program for computing seismic hazard.
- Wessel, P.; Smith, W.H.F. (1998). New, improved version of Generic Mapping Tools released, *EOS Trans. Amer. Geophys. U.*, **79** (47), 579.
- Williams, T.; Kelley, C. (2010). gnuplot 4.4, An Interactive Plotting Program, Manual, 224 pp.