XI Congreso Venezolano de Sismología e Ingeniería Sísmica
XI CONVESIS 2017
Caracas, 17 al 19 de julio de 2017

Trabajo N° CONV-048

SISMOLOGÍA Y SISMOTECTÓNICA

UNA APLICACIÓN WEB PARA PROCESAR RESULTADOS DE TRABAJOS DE PELIGROSIDAD SÍSMICA

Alvarez, Leonardo[1]

[1]Instituto Nicaragüense de Estudios territoriales, INETER

RESUMEN

Al realizar un estimado de la peligrosidad sísmica, lo mas común es presentar algunos mapas con valores de un parámetro del movimiento del terreno para diferentes períodos de retorno, acompañados de gráficos con representaciones de la peligrosidad sísmica para algunos puntos aislados. En realidad, los estimados de peligrosidad sísmica básicos son archivos que contienen mucha mas información que esa, y es posible confeccionar mapas con diferentes criterios y realizar estimados puntuales de la peligrosidad sísmica para cualquier punto de la región de estudio. Esto requiere procesar los resultados obtenidos cuando se hicieron los estimados de amenaza sísmica de forma de extraer la información necesaria para obtener, o bien nuevos mapas, o estimados puntuales con buena precisión. Se presenta un método para obtener tales resultados con ejemplos de Nicaragua y Cuba. La base para ello son los archivos de resultados de los estimados de peligrosidad sísmica, los que están formados por los períodos de retorno de sacudidas con diferente valor del parámetro del movimiento del terreno (casos de CRISIS'2007 y CRISIS'2014). Estos se procesan con un conjunto de programas para obtener los mapas y 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 como aplicación web, en un esquema cliente-servidor, sobre un servidor Linux.

***Palabras clave**: Peligrosidad sísmica, aplicación web*

INTRODUCCIÓN

Cuando se enfrenta una inversión importante, cuando se planifica el desarrollo urbano o se realizan planes de protección civil contra terremotos, es muy necesario conocer en detalle la peligrosidad (amenaza) sísmica correspondiente al lugar de interés, con vistas a proyectar los distintos objetos de obra de forma que no sean severamente dañados, 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 sismorresistentes 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 sismorresistentes. Si bien cumpliendo con esos requerimientos se logra obtener el permiso de construcción, surgen varias preguntas: ¿están adecuadamente protegidas la inversión o la población 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 peligrosidad sísmica que se obtienen por este procedimiento? La respuesta a esas y otras preguntas que puedan surgir indican que hay que buscar mas información a la hora de tomar decisiones sobre la peligrosidad sísmica a que está sometida cualquier lugar y no guiarse por un simple mapa que solo refleja una faceta del problema.

La base de la información sobre peligrosidad sísmica incluida en los códigos de construcciones sismorresistentes la constituyen los estudios regionales de la peligrosidad sísmica. Cuando se realiza un estimado probabilístico de la peligrosidad 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 peligrosidad sísmica. Cuando no es unívoca la decisión sobre cada uno de los aspectos mencionados es posible realizar diversos estimados de la peligrosidad combinando las diferentes decisiones sobre las partes constituyentes del cálculo, lo que se conoce como "árbol lógico de decisión" (Figura1). Eso obliga a realizar un procesamiento estadístico posterior para obtener una "solución de compromiso".

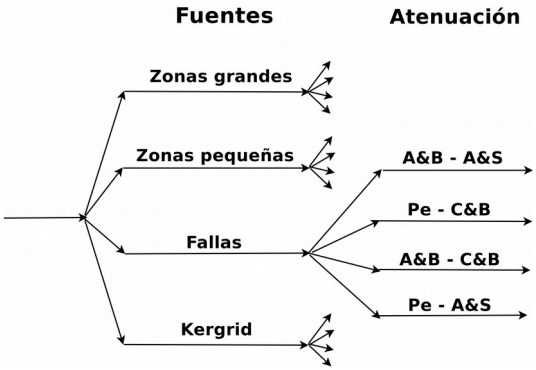

Figura 1. Ejemplo de formación de un árbol lógico para el cálculo de la peligrosidad sísmica. La primera división corresponde a la selección de modelos de fuentes, mientras que la segunda corresponde al uso de diferente fórmulas de atenuación de las amplitudes espectrales (modificado de Alvarez et al., 2017)

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 peligrosidad 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 peligrosidad, que por ejemplo en el programa CRISIS'2007 (Ordaz et al., 2008) toma la forma:

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

para un conjunto de puntos, y los resultados son interpolados espacialmente para construir mapas.

El proceso de cálculo implica dividir la región de estudio en una malla regular de puntos, y en cada punto realizar los estimados de la peligrosidad sísmica (Figura 2a). Aunque varía de un programa de cómputo a otro, el resultado en cada punto será una curva de peligrosidad sísmica, o un conjunto de ellas (Figura 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 peligrosidad uniforme – UHS), se pueden manipular estos resultados y presentar un serie de espectros para diferentes períodos de retorno o curvas de peligrosidad para diferentes períodos del espectro. Algunos programas de cómputo permiten además estudiar para cada punto la influencia de distintas fuentes o la influencia de todas en función de la distancia y la magnitud (Figura 3) lo que es conocido bajo la denominaación de desagregación de la peligrosidad sísmica. Sin embargo, los archivos de resultados que permiten analizar esta influencia son

sumamente extensos y es habitual solo calcularlos en casos especiales. La preparación de tales representaciones de la peligrosidad sísmica no está incluida en la aplicación que presentamos.

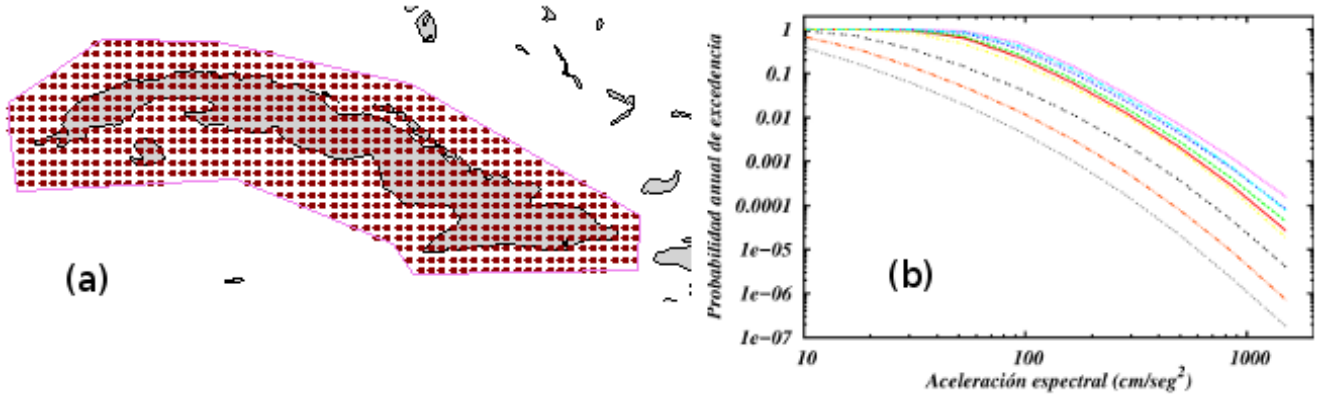

Figura 2. (a) Ejemplo de puntos de una malla donde se calcula la peligrosidad sísmica, (b) peligrosidad sísmica en un punto para diferentes períodos de oscilación; en rojo PGA.

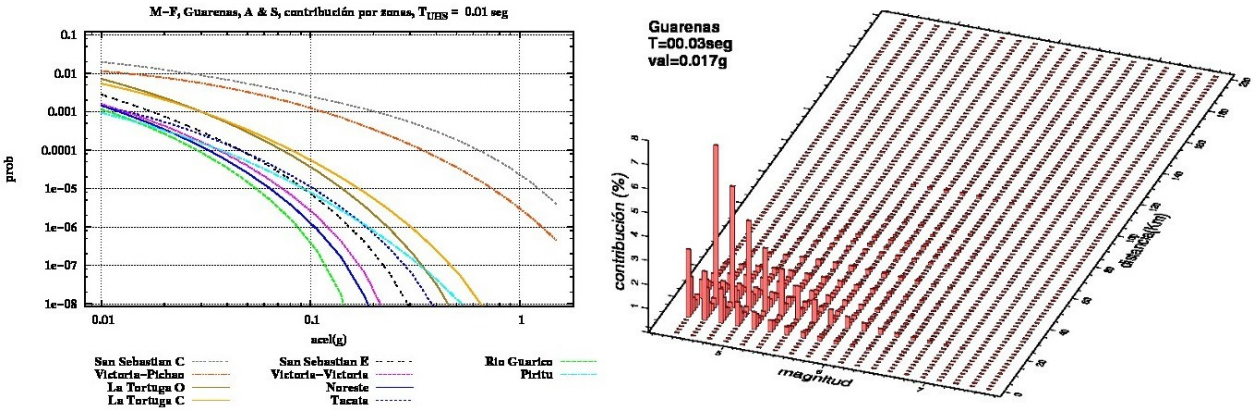

Figura 3. Ejemplo de desagregación de la peligrosidad sísmica en un punto expresada como contribución de las diferentes fallas que afectan a dicho punto (izquierda) o por la contribución de todas las fuente que se encuentren en cierto intervalo de distancia en función y ocurran terremotos en un intervalo de magnitud (derecha).

Al terminar un trabajo de estimación de la peligrosidad sísmica se hace una elección entre los diferentes tipos de mapas posibles de calcular producto de una combinación de períodos de retorno y períodos del espectro, y algunos gráficos de peligrosidad sísmica para puntos aislados (generalmente pocos) y se "olvida" la riqueza de información que contienen los resultados obtenidos durante las corridas del programa básico de estimación de la peligrosidad sísmica. Este trabajo trata sobre el aprovechamiento de dicha información.

MÉTODO

La tarea que se plantea es preparar mapas de peligrosidad sísmica producto de de cualquier combinación de períodos de retorno y del espectro (T_{ret},T_{esp}), así como estimados puntuales de la peligrosidad sísmica

para puntos que no puedan no coincidir con los nodos de la malla donde esta se calculó. Es evidente que realizar esto requiere un proceso de interpolación. Como las fórmulas de atenuación que se usan habitualmente tienen coeficientes específicos para diferentes valores de los períodos del espectro, se prefiere no interpolar estos, limitando el análisis a los períodos para los que se calculó la peligrosidad sísmica en el caso de los mapas y a una interpolación espacial para el caso de puntos fuera de los nodos de la malla. Si las fórmulas de atenuación lo permiten, se pueden repetir los cálculos aumentando el número de períodos del espectro a utilizar generando una nueva variante de resultados primarios.

En el caso de la interpolación espacial se analizaron dos métodos, 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 Figura 4 se presenta un ejemplo de ubicación de puntos y obtención de curva de peligrosidad sísmica para PGA por interpolación.

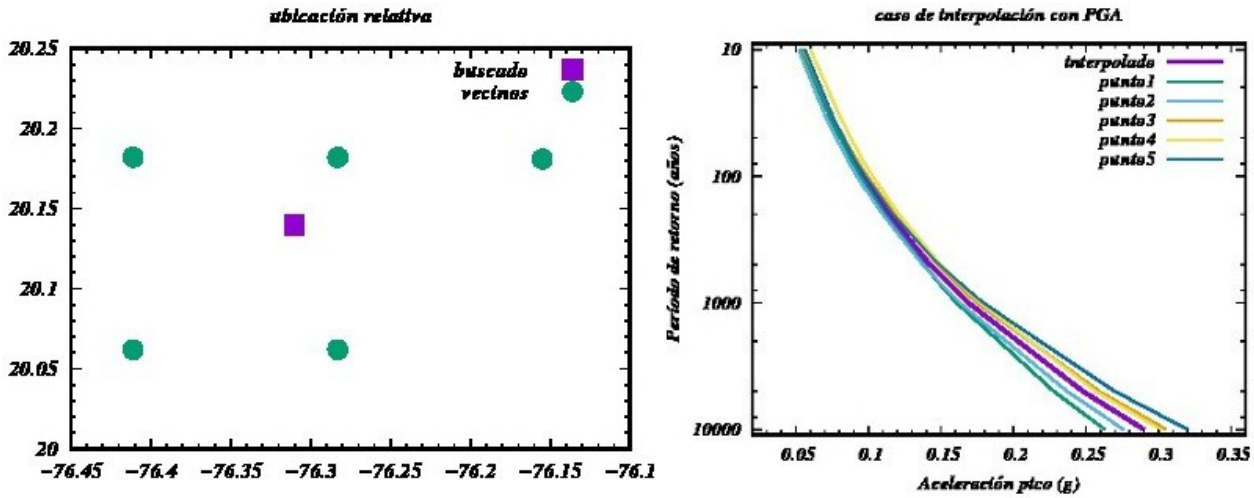

Figura 4. Ejemplo de interpolación de PGA. Se realizó una búsqueda de puntos del cálculo inicial ubicados en un radio de 18 km del punto donde se quiere interpolar (izquierda). Los 5 puntos encontrados poseen estimados de períodos de retorno para PGA. Se realiza una interpolación por el método del inverso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

Para el caso de confección de mapas el proceso es de interpolación a lo largo de curvas como las presentadas en las figuras 2b y 4 (derecha). Lo habitual es que para el cálculo de la peligrosidad sísmica se fijen valores de la aceleración espectral y y se calculen los períodos de retorno correspondientes (o su inverso, la probabilidad anual). En la preparación de un mapa es necesario calcular la amplitud espectral dado el período de retorno. Para esto se emplea interpolación lineal del logaritmo de la amplitud espectral. Se trata de evitar por todos los medios el uso de extrapolación, lo que se logra solamente aumentando el rango de valores en el proceso inicial de cálculo de la peligrosidad sísmica y repitiendo los cálculos básicos de ser necesario.

El método de trabajo es entonces:

- ➔ Obtener los resultados del cálculo de la peligrosidad sísmica en forma de archivos de datos, ya sea de los cálculos originales o producto de nuevos cálculos aumentando el número de períodos del espectro y del rango de variabilidad de los parámetros de movimiento del terreno
- ➔ Preparar algunos archivos de configuración
- ➔ Confeccionar programas para el manejo de esa información
- ➔ Situar datos y programas en un servidor web

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se usó un servidor apache2 sobre Linux, se confeccionaron programas de cómputo en FORTRAN y se prepararon diversos guiones (scripts) en cgi, perl y bash para manejar la información. El sistema así preparado hace un uso extensivo de herramientas de código abierto para preparar mapas y gráficos. 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 (Alvarez, 2014). En el cliente se lee una planilla, se pasa el control al servidor donde con una combinación de programas y guiones (scripts) en bash, 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 (Figura 5).

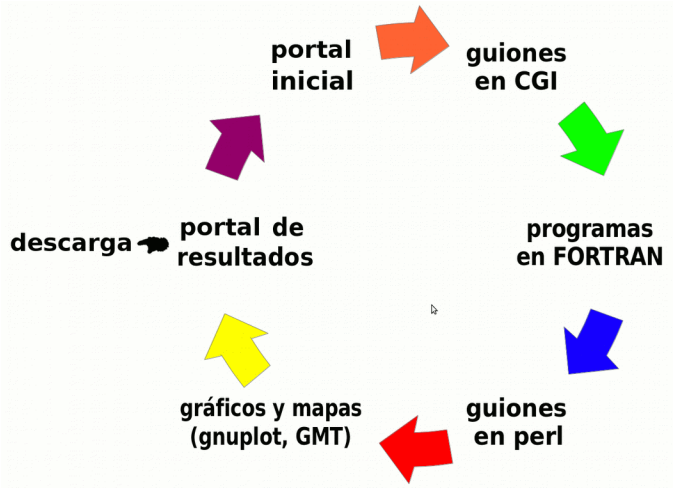

Figura 5. Esquema de trabajo del sistema cliente-servidor donde están instaladas las aplicaciones para procesamiento de los resultados básicos de un estimado regional de peligrosidad sísmica. En el cliente solo son visibles los portales donde se hace la petición y donde se obtienen los resultados [modificado de Alvarez (2014)].

Como se dijo anteriormente, los datos iniciales tienen que ser obtenidos de las salidas en formato texto de los diferentes programas de cómputo utilizados para el cálculo de la peligrosidad. 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 SEISRISK-III (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 peligrosidad sísmica. 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 y Kelly, 2010) para la confección de gráficos y otros para el procesamiento ulterior de mismos. Igualmente, los mapas de peligrosidad sísmica para períodos de retorno arbitrarios se preparan con el GMT (Wessell y Smith, 1988). Este sistema requiere el uso de varios de sus programas para preparar un mapa, por lo que fueron confeccionados guiones en perl para confeccionar los mismos. Los programas en FORTRAN preparan todos los ficheros de entrada para los programas que preparan los mapas y gráficos, y el flujo de trabajo se controla por los guiones en cgi. En la Figura 6 se presenta la planilla correspondiente al caso de los estimados de peligrosidad 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°x0.1° y son el resultado de un árbol lógico de 4 ramas. Los mismos fueron recalculados para añadir otros 3 valores de períodos del espectro de peligrosidad uniforme que permitiese una mayor calidad en las interpolaciones de las curvas de peligrosidad sísmica.

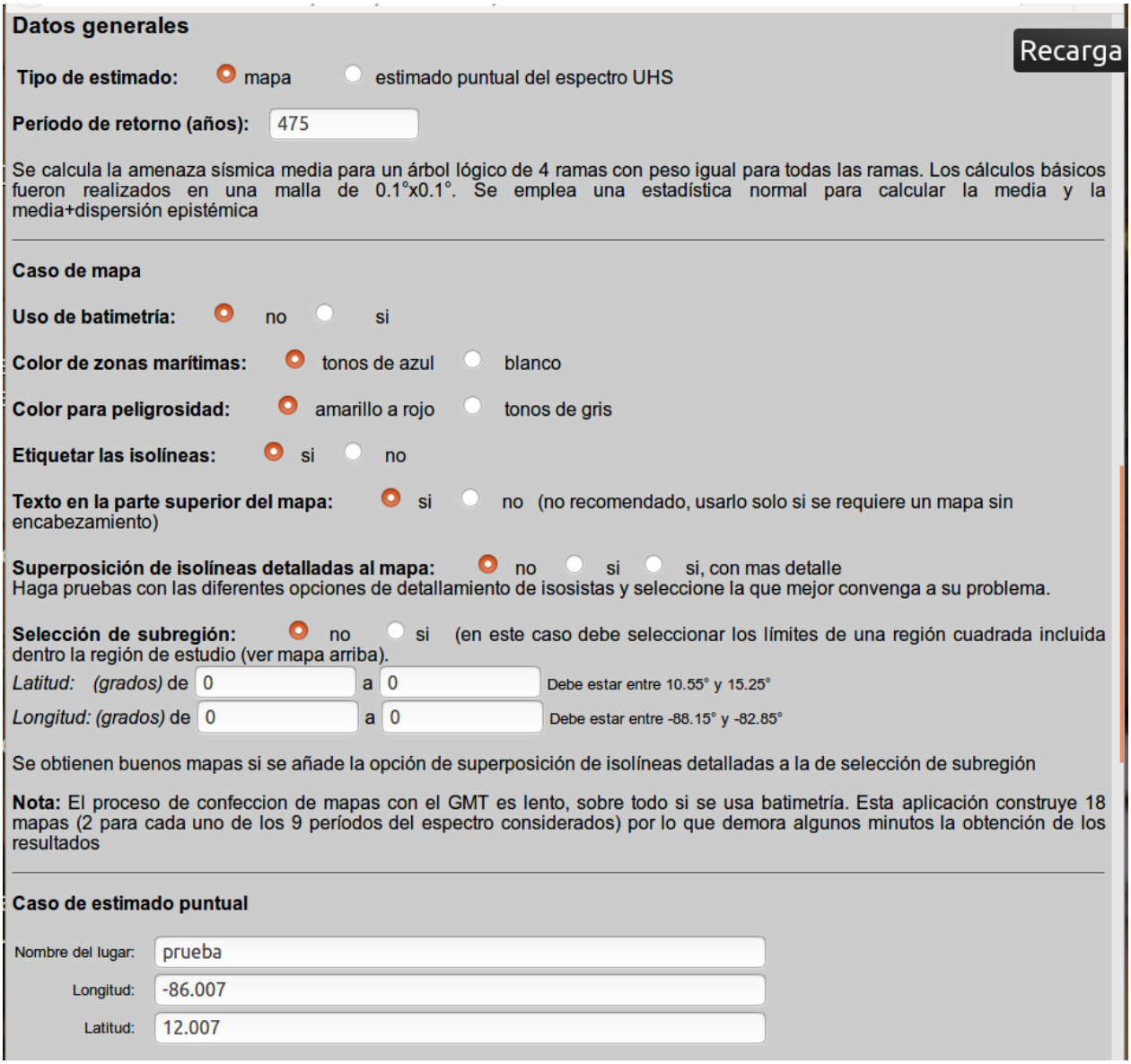

Figura 6. Selección en el portal de la aplicación web correspondiente al caso de los resultados del proyecto RESIS II (Molina et al., 2008), donde se indican las dos opciones a usar: confección de mapas y estimados puntuales. Estas opciones también están presentes para el caso de Cuba con los resultados de Alvarez et al. (2017),

El proceso mas simple es el del caso puntual, donde solo es necesario un nombre (que se ubicará en los gráficos como indicativo y las coordenadas del punto donde se quiere obtener la peligrosidad sísmica. Al ejecutar la petición se presentan dos tipos de gráficos: aceleración espectral en función del período del

espectro (Figura 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 (Figura 8).

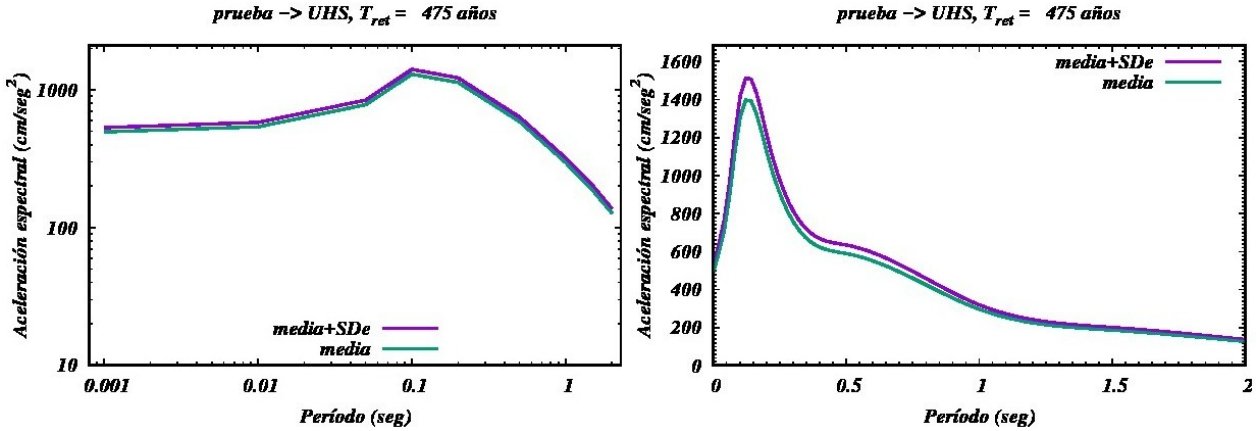

Figura 7. Espectro uniforme de peligrosidad para el punto deseado. Se representan el valor del espectro y el valor del espectro mas su dispersión estándar. Los espectros se construyen con los 9 valores del período usados, unidos por líneas rectas (izquierda) o interpolados por splines cúbicos (derecha).

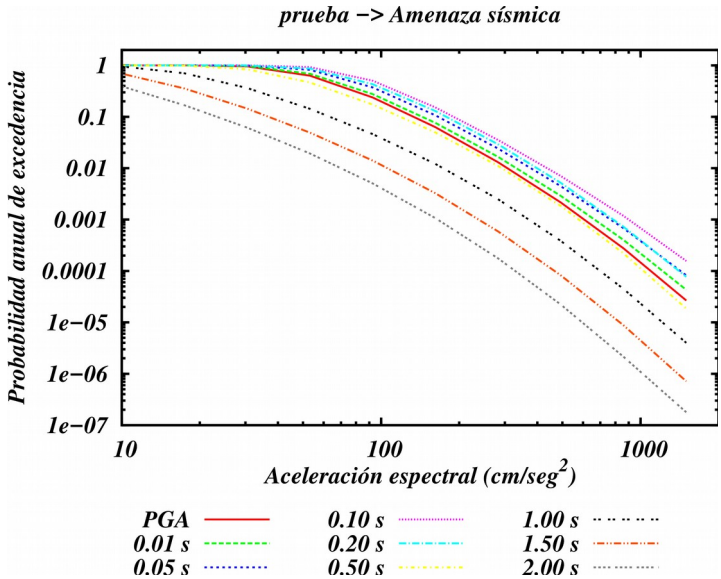

Figura 8. Probabilidad anual de excedencia para todos los períodos del espectro calculados

En el caso de la variante de preparar mapas, el resultado será de dos mapas por cada uno de los períodos del espectro presentes en los resultados del cálculo de la peligrosidad sísmica. En uno de ellos estarán los resultados del valor medio de todas las ramas del árbol lógico y en otro los de ese valor medio mas la dispersión estándar (SDe). Para Cuba se usaron 8 períodos del espectro por lo que se preparan 16 mapas (Alvarez et al.; 2017), mientras que para Nicaragua, aunque los cálculos iniciales solo contemplaban 6 períodos del espectro (Molina et al., 2008), para este trabajo se recalculó la peligrosidad sísmica usando 9 períodos, por lo que se preparan 18 mapas. En el caso de Nicaragua se usó un árbol lógico de solo 4 ramas y el procedimiento considera igual peso para todas, mientras que en el de Cuba el árbol lógico utilizado consta de 14 ramas y el procedimiento permite seleccionar los pesos que se le darán a cada una de ellas y la estadística a utilizar en el cálculo de las dispersiones estándar (Figura 9).

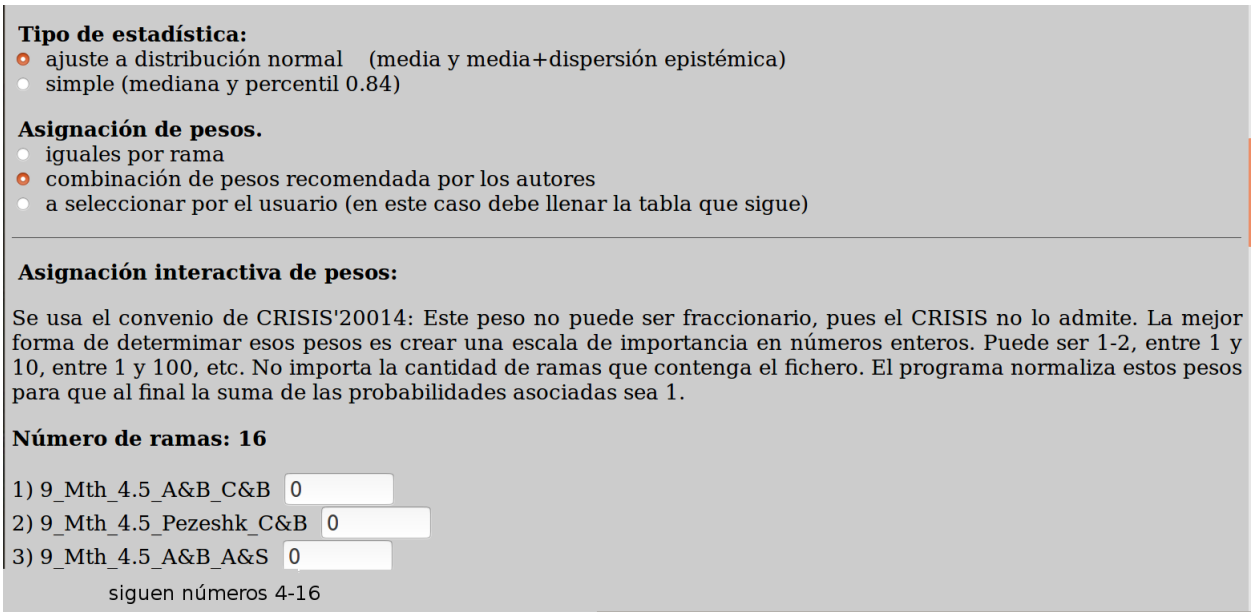

Figura 9. Elementos para manipular la estadística del árbol lógico que fueron introducidos en el caso de la peligrosidad sísmica para Cuba, lo que fue posible debido al número de ramas presentes en el árbol.

Otro elemento importante en el caso de los mapas son las posibilidades de seleccionar subregiones y usar 3 tipos diferentes de detalle en las isolíneas. En la Figura 10 se muestra uno de los mapas para toda la región de estudio y otro para una subregión. En ambos casos, la elección de las isolíneas básicas corresponde a la decisión de los autores del trabajo en cuestión. Las isolíneas mas detalladas no son mas que una intercalación mas o menos regular de otras isolíneas entre las básicas.

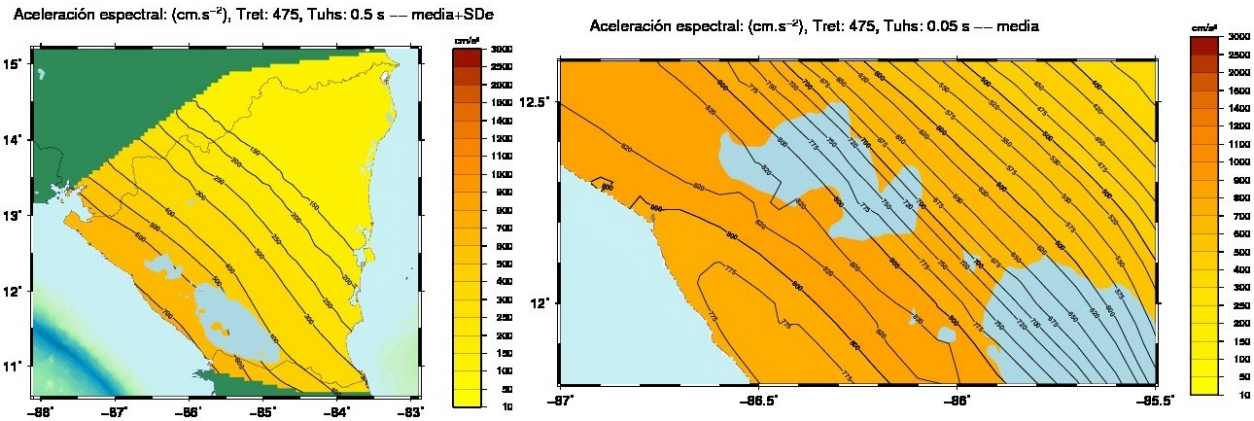

Figura 10. Ejemplo de dos tipos de mapas: para toda la región (izquierda) y para una subregión (derecha) con isolíneas con mayor grado de detalle. En verde, zona sin información.

Para los mapas se dan varias opciones de diseño, según se puede apreciar en la Figura 6. La leyenda de colores es lo suficientemente amplia para cubrir todos los valores del parámetro del movimiento del terreno a representar en un rango apreciable de períodos de retorno. No se ajusta en cada mapa para facilitar la comparación entre las diferentes combinaciones (T_{ret},T_{esp}), ya que se generan numerosos mapas en cada petición.

El sistema permite preparar prácticamente cualquier tipo de estimado de la peligrosidad sísmica, ya sea espacial o puntual, y los resultados pueden ser descargados tanto en forma de archivos de texto como de imágenes vectoriales. Durante la ejecución de la petición, en el servidor se crea un directorio que lleva como nombre la dirección IP de la máquina desde donde se hizo la consulta, lo que evita confusiones cuando trabajan simultáneamente diferentes usuarios. Ese directorio se borra y se vuelve a crear al realizar una nueva consulta. Este sistema ha sido probado con éxito en servidores, computadoras de mesa y portátiles, y está establecido como servicio a brindar a clientes en el CENAIS (Cuba) y el INETER (Nicaragua).

CONCLUSIONES

- Se desarrolló un procedimiento para la preparación de mapas y gráficos de peligrosidad sísmica a partir de los archivos de los estimados originales de peligrosidad sísmica empleando programas en FORTRAN y scrips en perl, cgi y bash confeccionados al efecto.
- El procedimiento consiste en una aplicación web, instalada en un servidor apache2 sobre Linux, basada en el principio cliente-servidor, donde el usuario tan solo debe llenar los datos de una planilla en línea y enviar la petición. Esto se hace desde cualquier sistema operativo y usando cualquier navegador
- La aplicación se ha probado con éxito en servidores, computadoras de mesa y portátiles, y está establecid como servicio a brindar a clientes en el CENAIS (Cuba) y el INETER (Nicaragua).

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue financiado parcialmente por el Centro Nacional de Investigaciones Sismológicas de Cuba (CENAIS) y el Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales (INETER).

REFERENCIAS

Alvarez, L. (2014): Sistema de análisis de la sismicidad sobre servidor Web. Ciencias de la Tierra y el Espacio (http://iga.cu/publicaciones/revista), vol.15, pp. 184-198.

Alvarez, L.; Lindholm, C. y Villalón, M. (2017): Seismic Hazard for Cuba; A new approach. Bul. Seis. Soc. Am., vol 77, No. 1., pp. 229-239.

Bender, B. y 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. yLindholm, 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. y 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 y C. D'Amico (2014). CRISIS 2014, Ver 1.2, Program for computing seismic hazard.

Wessel, P. y Smith, W.H.F. (1998). New, improved version of Generic Mapping Tools released, EOS Trans. Amer. Geophys. U., 79 (47), 579.

Williams, T. yKelley, C. (2010). gnuplot 4.4, An Interactive Plotting Program, Manual, 224 pp.