

Tipo de artículo: Artículo original
Temática: Tecnologías de la información y las telecomunicaciones
Recibido: 30/10/2017 | Aceptado: 05/06/2018

Determinación automática del umbral de detección de una red sísmológica

Automatic determination of the detection threshold of a seismological network

Raúl Palau Clares^{1*}, Tran Thanh Tuan², Antonio Salgado Castillo¹

¹ Centro Nacional de Investigaciones Sísmológicas. Calle 17 #61, entre 4^{ta} y 6^{ta}, Reparto Vista Alegre, CP 90100 Santiago de Cuba, Cuba. {[rpalau](mailto:rpalau@cenaiss.cu), [asalgado](mailto:asalgado@cenaiss.cu)}@cenaiss.cu

² Hanoi University of Science, Vietnam National University. tranthanhtuan@hus.edu.vn

* Autor para correspondencia: rpalau@cenaiss.cu

Resumen

El umbral real efectivo de detección de una red sísmológica, constituye una herramienta de apoyo muy importante en la toma de decisiones para instalar nuevas estaciones sísmológicas y mejorar los estimados de peligrosidad sísmica. Sin embargo, el proceso para determinar el mencionado umbral se realiza de forma semimanual usando programas especializados que no permiten automatizar todo el proceso; lo que ha provocado que el tiempo de obtención y graficación del umbral demore días y no esté exento de errores. Considerando lo anterior, este trabajo tiene como objetivo implementar un algoritmo para automatizar el procedimiento de determinar el umbral real efectivo de detección de una red sísmológica. Es así, que usando la herramienta MATLAB se implementó un algoritmo que permite obtener un mapa con el umbral de la red. Este mapa mostró, comparado con estudios precedentes, que las isolíneas de magnitud cubren una mayor área, lo que estuvo condicionado por la modernización del equipamiento y la creación de nuevas estaciones a partir del año 2010. Para validar los resultados, se compararon con varios estudios precedentes, lográndose determinar y graficar correctamente en dos segundos aproximadamente las isolíneas de igual magnitud. Posteriormente, se obtuvo el umbral para la red sísmológica cubana actual. Estos resultados permitieron concluir que cualquier sismo de magnitud mayor o igual a tres que ocurra en Cuba, podrá ser detectado al menos por tres estaciones sísmológicas.

Palabras clave: capacidad de detección de una red sísmológica, estaciones sísmológicas, isolíneas de magnitud, umbral real efectivo de una red sísmológica.

Abstract

The real effective threshold of detection of a seismological network is a very important support tool in the process of decision making to install new seismological stations and to improve the seismic hazard estimation. However, the process to determine the threshold is done in a semimanual way by using specialized programs that do not allow to automate the whole process. This has caused that the time to obtain and graph the threshold may take days and is not error free. Considering the above mentioned, this paper aims at implementing an algorithm to automate the procedure of determining the real effective threshold of detection of a seismological network. Using the MATLAB tool, an algorithm was implemented to obtain a map with the network threshold. This map, when compared to previous studies, showed that the isolines of magnitude cover a larger area, which was conditioned by the modernization of the equipment and the creation of new stations as of 2010. To validate the results, they were compared with a number of previous studies, and isolines of equal magnitude were correctly determined and graphed in approximately two seconds. Subsequently, the threshold for the current Cuban seismological network was obtained. These results led to the conclusion that any earthquake of a magnitude greater than or equal to three that occurs in Cuba can be detected by at least three seismological stations.

Keywords: *detection capability of a seismological network, isolines of magnitude, real effective threshold of a seismological network, seismological stations.*

Introducción

La red de estaciones del Servicio Sismológico Nacional Cubano tiene como misión el monitoreo de forma permanente de la actividad sísmica en Cuba y sus alrededores. La misma ha experimentado varias transformaciones tecnológicas, destacándose el cambio en 1998 del registro de papel al registro digital en formato SEISAN (Moreno, 2002; Ottemöller & Havskov, 2014) y su posterior modernización en el 2010, facilitando el registro en tiempo real de las señales sísmicas provenientes de las estaciones sismológicas distribuidas a todo lo largo y ancho de la isla, así como la incorporación de estaciones de otras redes sismológicas cercanas en la estación central ubicada en Santiago de Cuba (Diez et al., 2014).

La evolución de la red sismológica cubana ha estado condicionada por la modernización de los sismómetros y digitalizadores, responsables del incremento de la capacidad de registro y por ende del aumento del área de cobertura

para diferentes valores de magnitud. Actualmente, la mencionada red cuenta con 20 estaciones en funcionamiento hasta agosto de 2017, 15 de banda ancha y 5 de corto período, suministradas por las empresas Geodevice de China y Nanometrics de Canadá respectivamente (CENAI, 2017; Iris, 2017). Algo que hay que precisar es que 15 estaciones, la mayoría, están ubicadas en la parte oriental del país y 5 distribuidas entre el centro y occidente.

Ahora bien, lo anterior se justifica pues el oriente cubano es una zona de alto riesgo sísmico por la proximidad a la frontera de placas entre Norteamérica y el Caribe conocida como Falla Oriente en la costa sur desde Maisí hasta Cabo Cruz y por la costa norte la prolongación de la falla septentrional desde Maisí hasta Moa aproximadamente, estas fallas son las responsables del 90 % de la sismicidad y de los terremotos más fuertes ocurridos en Cuba (Alvares et al., 1973, 1999, 2000; Chuy, 2000; Moreno, Grandison & Atakan, 2002), entre los que se puede mencionar el terremoto del 3 de febrero de 1932 en Santiago de Cuba con magnitud 6,75 e intensidad 8 en la escala MSK y el terremoto del 25 de mayo de 1992 en Cabo Cruz con intensidad 7 e igual magnitud en la escala Richter (Chuy, 1999).

En este mismo orden de ideas, hay que destacar que un elemento muy importante en el monitoreo de la actividad sísmica lo constituye el proceso para determinar el umbral real efectivo de detección de la red de estaciones sismológicas (Schorlemmer & Woessner, 2008), el cual representa la distancia máxima en la cual un terremoto con un determinado valor de magnitud es registrado por tres o más estaciones, y está directamente relacionado con los cambios tecnológicos y la geometría de la red sismológica (Moreno, 2002). Se hace necesario aclarar, que el mencionado umbral también se denomina capacidad de detección de una red sismológica (Kvaerna & Ringdal, 2013; Fischer & Bachura, 2014).

Es así, que el umbral de detección se ha convertido, en varios países, en una de las herramientas más importantes por su aplicación práctica para poder estimar el riesgo y las vulnerabilidades de zonas de vital importancia, tal es el caso de la investigación reportada por Tiira et al. (2016) para determinar el riesgo sísmico en la construcción de una planta de energía nuclear. Estos autores determinan la capacidad de detección de una posible red de 10 estaciones basándose en las características de los sismómetros y acelerógrafos, combinando métodos para disminuir el ruido del terreno luego de la captura de la señal.

Por otra parte, Fischer & Bachura (2014) determinan el mencionado umbral usando análisis del ruido, para su aplicación a la sismicidad inducida debida a operaciones subterráneas. Asimismo, Kvaerna & Ringdal (2013) logran cuantificar y clasificar las estaciones sismológicas primarias y auxiliares del Sistema Internacional de Vigilancia (IMS: siglas en inglés) basadas en su capacidad para detectar eventos dentro de varios rangos de distancia usando umbrales de detección regionalizados basándose en la relación señal/ruido (SNR). Estos ejemplos evidencian la

importancia que tiene el mencionado umbral por lo que se hace necesario analizar cómo se ha desarrollado este proceso en Cuba.

Antecedentes y situación problemática

La determinación del umbral real efectivo de detección de una red sismológica, específicamente la cubana, ha sido sistematizada por varios autores, destacándose Álvarez et al. (2000), quienes basándose en las clases energéticas (K_r) hallan el mencionado umbral para la red analógica cubana que databa del año 1988 usando las 10 estaciones en funcionamiento. De igual manera, González et al. (1996) utilizan la magnitud por onda de volumen (mvp) para obtener el mapa de alcance máximo efectivo de la red cubana del año 1995 para las 9 estaciones existentes. Algo que hay que precisar en estas dos investigaciones mencionadas, es que se usa el catálogo cubano de terremotos teniendo en cuenta que la red sismológica no es homogénea, significando esto que los equipos de las estaciones tienen sensibilidad diferente. Por otro lado, Moreno (2002) a partir del catálogo de terremotos ya en formato SEISAN determina el umbral de detección para la red digital cubana existente en el año 1999 con 11 estaciones usando la magnitud local (MI), asumiendo que la red es homogénea y que la atenuación de las ondas sísmicas es la misma en todas direcciones.

Ahora bien, en los tres casos mencionados el umbral de detección se representa a través de isolíneas de magnitud, las cuales son curvas que conectan los puntos representados para un valor constante de magnitud, y que para determinar el umbral de detección de la red, delimitan aproximadamente un área donde al menos tres estaciones pueden registrar un terremoto de una clase energética o magnitud dada.

Por otro lado, Díez et al. (2014) determinan la capacidad de detección de la red cubana considerando las 12 estaciones existentes en ese año, pero tienen como particularidad que a diferencia de los métodos anteriores no usan los catálogos, sino que utilizan la relación señal/ruido (SNR) proveniente de las estaciones sismológicas.

Es válido señalar, que el proceso de determinación del umbral, históricamente, se ha desarrollado por los investigadores de manera manual o semimanual usando software especializados como el Generic Mapping Tools (GMT 5; Wessel et al., 2013) o el ArGIS (ESRI, 2014). Sin embargo, los mencionados softwares no permiten automatizar todo el proceso de obtención del umbral, lo que ha provocado que el tiempo de realización y obtención del mapa final con las isolíneas de magnitud contorneadas demore días (Álvarez et al., 2000). En adición, este proceso no está exento de errores humanos, pues el cálculo y la determinación de la intersección de los registros de al menos tres estaciones sismológicas es un proceso largo y complicado, más si el número de estaciones es mayor que tres y estas se encuentran relativamente cerca (Moreno, 2002).

Teniendo en cuenta estos antecedentes y el desarrollo de las tecnologías de la información y las comunicaciones (TIC) el presente trabajo tiene como **objetivo**: implementar un algoritmo para automatizar el procedimiento de determinar el umbral real efectivo de detección de una red sismológica. El algoritmo debe responder a los nuevos cambios tecnológicos y a la geometría de la red de estaciones sismológicas reflejadas en el catálogo de terremotos, constituyéndose en una herramienta computacional rápida, práctica y eficaz.

Consecuentemente, para lograr el objetivo anterior, se siguió una metodología dividida en etapas y posteriormente se corroboró la calidad de los resultados del algoritmo al realizar comparaciones con una selección de las investigaciones cubanas más representativas de la temática. Los resultados indican que la solución tecnológica que se presenta puede ayudar a la toma de decisiones de los directivos del Centro Nacional de Investigaciones Sismológicas (CENAI), para su uso en el Servicio Sismológico Nacional Cubano.

Materiales y métodos

La metodología utilizada en esta investigación se sustentó en cuatro etapas: la primera consistió en el diseño e implementación de un algoritmo para calcular de manera automática el alcance de una red de estaciones sismológicas, la segunda consistió en fundamentar los estudios precedentes más relevantes sobre la determinación del alcance de la red de estaciones sismológicas de Cuba, la tercera se centró en la selección del catálogo de terremotos a utilizar, y la cuarta etapa se centró en la aplicación del algoritmo que se ha implementado usando los datos de los estudios seleccionados y la determinación del alcance de la red de estaciones sismológicas hasta el año 2017. A continuación, se describen en detalle cada una de estas etapas.

Algoritmo propuesto

El procedimiento utilizado para calcular el umbral y posteriormente dibujar el mapa con las isóneas de magnitud que representan el umbral real efectivo de detección de la red sismológica, se basa en los pasos propuestos por Moreno (2002) que se describen a continuación: primero se determina la máxima distancia registrada para cada valor de magnitud fijado desde el catálogo; en segundo lugar los círculos son dibujados con radios igual a la máxima distancia epicentral y centrados en las estaciones; en el tercer paso el umbral de magnitud se define por el área de intersección de los tres círculos. En este procedimiento se asume que la atenuación de las ondas sísmicas es la misma en todas las direcciones y que la sensibilidad de las estaciones es la misma. En adición, los autores del presente trabajo resolvieron modificar el procedimiento, para lo cual se le incluyó que en el tercer paso se considerara la intersección por tres o más círculos con lo que se aumenta la precisión en el momento de graficar las isóneas de magnitud en el mapa.

Se debe precisar, que el presente estudio sólo tiene en una primera intención socializar a la comunidad científica la utilidad de una herramienta computacional que permita la determinación del umbral real efectivo de detección de una red sísmológica, de manera rápida y no compleja, por lo que se ha utilizado como software de desarrollo el Tollbox de MATLAB R2012A (7.14.0.739) (MATLAB, 2012), considerando la posibilidad de la implementación del algoritmo posteriormente en un lenguaje de programación de alto nivel dígase: C++, C# u otro.

El algoritmo que se presenta (Ver Tabla 1) consiste en una matriz cuadrada de (N x N) que incluye la región de estudio donde inicialmente se le asigna valor 0 a todas sus celdas. Cuando se cumpla la condición de que en una celda coincidan al menos tres o más puntos epicentrales para un valor de magnitud dada, entonces se le asigna el valor 1. Luego se contornean las celdas con valor 1, quedando de esta forma definidas las isolíneas de magnitud en el mapa.

Tabla 1. Algoritmo propuesto.

Algoritmo MAPA (X, Y, R)

Este algoritmo hace un mapa de la región en la cual un terremoto de radio R puede ser detectado por al menos tres estaciones.

Input: Coordenadas de n estaciones. Dadas por los vectores **X**, **Y** de dos columnas por una fila, **R** es un vector con dimensión de una columna por una fila que representa el radio de alcance de una determinada estación. Asimismo, **m** es un vector con dimensión de una columna por una fila que representa la cantidad de magnitudes diferentes del catálogo seleccionado, con intervalo de 0.5.

For i = 1, 2, 3, ..., R, **do**: // Se hace el desplazamiento por el vector que representa los valores de los radios de alcance.
Este vector tiene la misma longitud que el vector de magnitudes m//

Find Xmin, Xmax, Ymin, Ymax // Se busca el mayor valor de magnitud usando la función de MATLAB "sort"//

[Xmin - R, Xmax + R] * [Ymin - R, Ymax + R] de tamaño N x N //Se determina el tamaño de la matriz //

// N es suficiente para una matriz que abarque el área de estudio, en este caso la isla de Cuba //

GridValue = zeros (N x N) //Se crea la matriz e inicialmente se le asigna valor 0 a GridValue //

For j=1, 2, ..., N, **do**:

For k=1, 2, ..., N, **do**:

Count=0

For p = 1, 2, ..., n, **do**: // Se hace el desplazamiento por el vector de estaciones //

dist_km = distancia entre el punto (j, k) y cada estación. // Se utiliza cada magnitud m y radio R para las n estaciones.

if dist_km < R **then** count = count + 1

End

if count ≥ 3 **then** GridValue (j, k) = 1 // Si se cumple la condición de que se intersecan tres o más estaciones la celda (j, k) = 1 //

End

End

Contornear GridValue para los valores igual a "1" en la matriz.

End

Output: Figure // Mapa de contornos de las regiones correspondiente a R //

End MAPA

Principales referentes teóricos sobre la determinación del alcance de la red de estaciones sismológicas de Cuba.

Cuando se realiza un estudio como el que se propone, que tiene implícito la automatización de un determinado proceso, en este caso el cálculo del umbral real efectivo de detección de una red sismológica, se hace necesario seleccionar, reconocer y utilizar, los resultados obtenidos previamente por otros investigadores en esta temática, pero enfatizando en las propuestas más importantes concretadas en el área o región que se estudia, en este caso Cuba. Es así que en este trabajo se han seleccionado dos investigaciones, que además de ser las más actualizadas en el tema para Cuba, obtienen buenos resultados, destacando sobremanera la propuesta de Moreno (2002), la cual se constituye en referente principal a utilizar en este trabajo, ya que este autor considera la red sismológica cubana como homogénea en lo referido a la sensibilidad de las estaciones y que la atenuación de las ondas sísmicas es la misma en todas direcciones. Estos supuestos también se asumen en esta investigación, pues se considera precisamente, que el umbral que se quiere calcular estará determinado realmente por los eventos que ya han sido registrados en el catálogo, razón por la cual estará más cerca de cubrir el área principal de actividad sísmica de la región bajo estudio.

Por otro lado, se ha considerado en este trabajo como segundo referente la propuesta realizada por los investigadores Diez et al. (2014), quienes caracterizan el estado de la red sismológica de Cuba hasta el 2014 y además determinan el alcance de ésta. La diferencia con la investigación anterior, radica en que no se usa el catálogo, sino que se basa en la relación señal/ruido para lo cual los autores de ese estudio siguen el siguiente procedimiento: se calculan las amplitudes del ruido de las señales provenientes de las estaciones a partir de la densidad espectral de potencia determinándose la magnitud mínima que pueden registrar las estaciones, luego se hayan las amplitudes máximas de los sismogramas sintéticos del modelo de velocidad, el cual se emplea para el cálculo de los hipocentros (Herrmann, 2002), a estas amplitudes se le calcula su diferencia, así como las magnitudes para determinar el umbral de detección de la red sismológica. Estos son los pasos que de manera general aplicaron los autores Diez et al. (2014) en los cuales no es objetivo de esta investigación profundizar. No obstante, sería prudente precisar que el umbral determinado para la red por estos autores corresponde al posible alcance máximo y no al alcance real efectivo, el cual está dado únicamente por los catálogos.

Selección del catálogo utilizado

Se utilizó el catálogo cubano de terremotos en formato SEISAN ampliado (Ottemöller & Havskov, 2014) separado en tres intervalos temporales principales, enero de 1998 diciembre de 2002, enero de 2010 diciembre de 2014 y enero de 2010 agosto de 2017, esto con el objetivo de realizar comparaciones con estudios precedentes, los cuales utilizaban

los dos primeros intervalos. Para la selección de los eventos se tuvieron en cuenta los siguientes criterios: eventos registrados por 3 o más estaciones sismológicas con residual medio cuadrático (RMS) ≤ 1 y magnitud local o por coda (MI o Mc) ≥ 1 , según lo sugerido por Bormann et al. (2002) y Ottemöller & Havskov (2014). Aquí se asume la definición de RMS, como el promedio de los errores de los tiempos de llegada de las ondas P y S a la estación i-ésima (Ottemöller & Havskov, 2014).

Se debe precisar, que el catálogo escogido hace uso de las magnitudes local (MI) y por duración o coda (Mc), ambas determinadas por Moreno, Grandison & Atakan (2002), dando prioridad a la magnitud Mc si ambas aparecen. Para el caso de los valores de distancias de las tablas 5 y 7, estos fueron determinados por los autores del presente trabajo, pues el método propuesto para el cálculo del umbral de la red por Diez et al. (2014) no se basa en los catálogos como ya se explicó en el epígrafe anterior. A continuación, en las tablas desde la 2 a la 7, se muestran las coordenadas, magnitudes y distancias utilizadas en este trabajo, las que han sido obtenidas del catálogo cubano.

Tabla 2. Coordenadas de las 11 estaciones para el registro sismológico en Cuba usadas por Moreno (2002).

Estaciones	CCCC	RCC	LMGC	MOA	MASC	MGV
Latitud Norte (°)	21,193	19,994	20,101	20,665	20,170	22,114
Longitud Oeste (°)	-77,417	-75,696	-77,005	-74,955	-74,235	-79,979
Estaciones	SOR	YARC	PINC	SABC	CIES	
Latitud Norte (°)	22,793	20,357	20,485	20,341	20,0020	
Longitud Oeste (°)	-83,008	-76,363	-75,791	-75,359	-75,7710	

Tabla 3. Máxima distancia en la cual un terremoto fue registrado (Catálogo cubano 1999 usado por Moreno (2002)).

Magnitud (MI)	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
Distancia (km)	85	132	230	361	498

Tabla 4. Coordenadas de las 12 estaciones para el registro sismológico en Cuba usadas por Diez et al. (2014).

Estaciones	CCCC	RCC	LMGC	MOA	MASC	MGV
Latitud Norte (°)	21,1894	19,9953	20,0584	20,6583	20,1760	22,1086
Longitud Oeste (°)	-77,4172	-75,6965	-77,0029	-74,9568	-74,2310	-79,9749
Estaciones	SOR	YARC	PINC	SABC	HLG	GTMO
Latitud Norte (°)	22,7892	20,3360	20,4740	20,3630	20,8890	19,961
Longitud Oeste (°)	-83,0051	-76,3470	-75,7980	-75,3110	-76,2576	-75,061

Tabla 5. Máxima distancia a la cual un terremoto fue registrado (Catálogo cubano 2010-2014).

Magnitud (MI o Mc)	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5
Distancia (km)	114	237	323	404	601	752

Tabla 6. Coordenadas de las 20 estaciones en funcionamiento para el registro sismológico en Cuba hasta agosto de 2017.

Estaciones	CCCC	RCC	LMGC	MOA	MASC	MGV	SOR	YARC	PINC	SABC
------------	------	-----	------	-----	------	-----	-----	------	------	------

Latitud Norte (°)	21,193	19,994	20,101	20,665	20,170	22,114	22,793	20,357	20,485	20,341
Longitud Oeste (°)	-77,417	-75,696	-77,005	-74,955	-74,235	-79,979	-83,008	-76,363	-75,791	-75,359
Estaciones	HLG	GTMO	CAIB	CAMR	CHIV	QMBU	GNEO	NMDO	MARV	PIL
Latitud Norte (°)	20,920	19,958	22,497	23,061	19,976	20,199	20,327	20,559	20,005	19,914
Longitud Oeste (°)	-76,236	-75,059	-79,470	-81,370	-76,415	-74,812	-74,593	-74,982	-75,906	-77,408

Tabla 7. Máxima distancia en la cual un terremoto fue registrado (catálogo cubano 2010-2017).

Magnitud (MI o Mc)	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5
Distancia (km)	114	268	331	475	606	752

Resultados y discusión

En esta sección se presentan los resultados del proceso de ejecución y evaluación del algoritmo. En primera instancia se procedió a graficar todos los círculos que corresponden al umbral de cada estación para cada valor de magnitud desde 1 hasta 3 con intervalos de 0,5. Las figuras 1 a la 6 muestran los mapas para las 11 estaciones existentes en el año 1999 obtenidos usando el algoritmo que se propone. Se han usado los valores de las tablas 2 y 3 según lo propuesto por Moreno (2002).

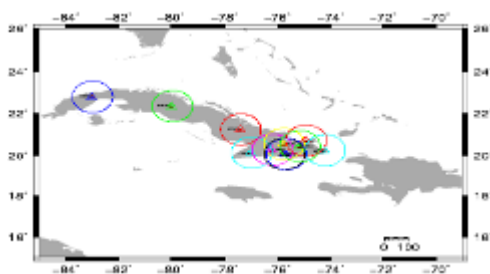


Figura 1. Se representan las isótopos de magnitud 1, para cada una de las 11 estaciones de Cuba en el año 1999.

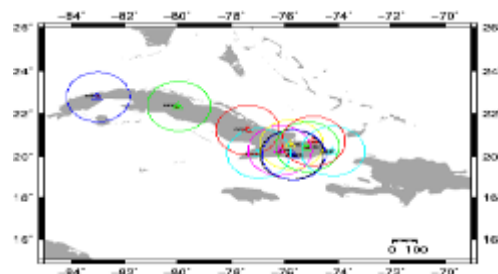


Figura 2. Se representan las isótopos de magnitud 1,5 para cada una de las 11 estaciones de Cuba en el año 1999.

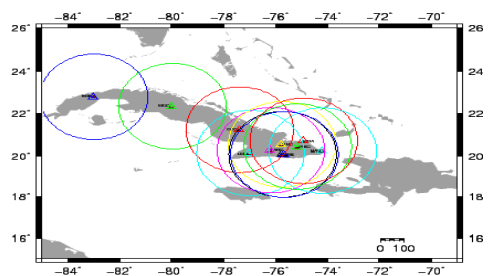


Figura 3. Se representan las isótopos de magnitud 2 para cada una de las 11 estaciones de Cuba en el año 1999.

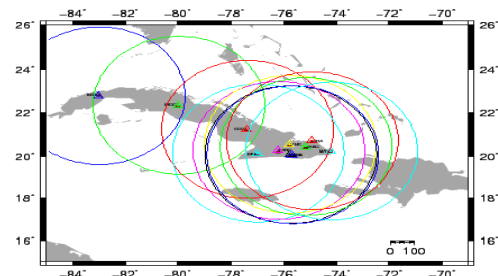


Figura 4. Se representan las isótopos de magnitud 2,5 para cada una de las 11 estaciones de Cuba en el año 1999.

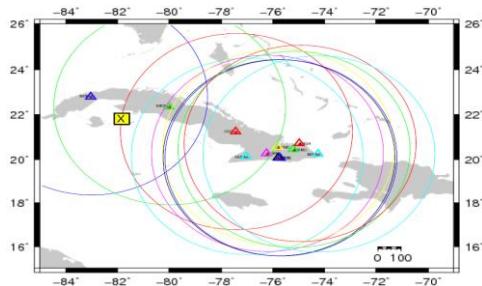


Figura 5. Se representan las isótopos de magnitud 3 para cada una de las 11 estaciones de Cuba en el año 1999.

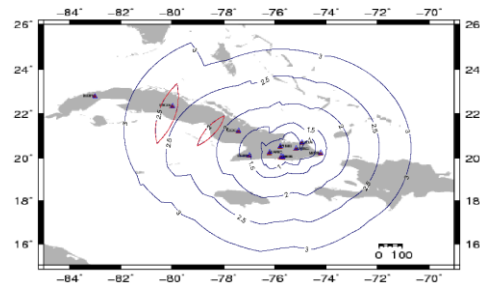


Figura 6. Umbral de detección real efectivo usando el algoritmo propuesto para las 11 estaciones de Cuba en el año 1999.

Destacan las figuras 1, 2 y 3 donde se observa como en el centro-occidente del país no se interceptan los círculos de alcance de las tres estaciones de esta región Soroa (SOR), Manicaragua (MGV) y Cascorro (CCCC), lo que se traduce en que de ocurrir un sismo de magnitud 1 o 1,5 en esta región, aunque se registrará, la determinación del epicentro no será confiable pues no se cumple el criterio de tener la intersección de al menos tres estaciones. Ya en las figuras 4 y 5 que representan los círculos de magnitud 2,5 y 3 respectivamente, se observan intersecciones en la región centro-occidente del país.

Por otra parte, en la región oriental se aprecia claramente en las figuras desde la 1 la 5 que hay muchas isótopos intersecadas debido a que en esta zona están concentradas la mayoría de las estaciones. Finalmente, en la figura 6 se obtiene el mapa con el umbral de detección de la red donde se han determinado y unido todos los puntos de intersección entre los círculos de las 11 estaciones. En este mapa queda claramente evidenciado como en la región oriental puede ser detectado cualquier sismo de magnitud 1 y 1,5, coincidiendo con los resultados de Moreno (2002) que se pueden observar en la figura 7. Sin embargo, para los sismos de magnitud 2 y 2,5 surgen dos regiones, marcadas en rojo, que hacen que el mapa obtenido difiera del obtenido por Moreno con el método manual. Estas diferencias están provocadas precisamente por las pocas estaciones en la región centro-occidente de esa época.

En la figura 8 se ha graficado usando el algoritmo propuesto el alcance de la red usando sólo las estaciones de Manicaragua (MGV), Cascorro (CCCC) y Las Mercedes (LMGC), que como se observa, estas estaciones son las responsables de que surja la región delimitada por las isótopos de color rojo de magnitud 2, esto se corresponde con lo observado en la figura 4 cuando se intersecan los círculos. El mismo fenómeno se aprecia en la figura 9 donde solo se han graficado las estaciones Soroa (SOR), Manicaragua (MGV) y Cascorro (CCCC), la región señalada en rojo se forma a partir de la intersección de los círculos con valor de magnitud 3, correspondiéndose exactamente con lo reflejado en la figura 5.

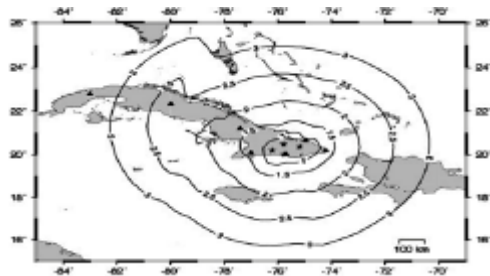


Figura 7. Umbral de detección real efectivo para las 11 estaciones de Cuba, año 1999. Fuente: Moreno (2002).

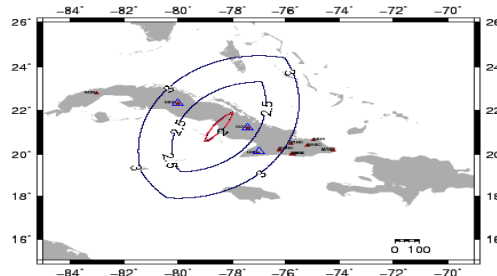


Figura 8. Umbral de detección con tres estaciones (Manicaragua, Cascorro y Las Mercedes), usando el algoritmo.

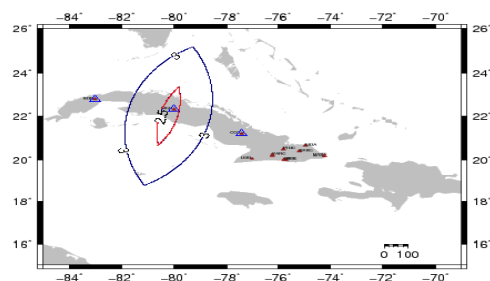


Figura 9. Umbral de detección con tres estaciones (Soroa, Manicaragua y Cascorro) usando el algoritmo.

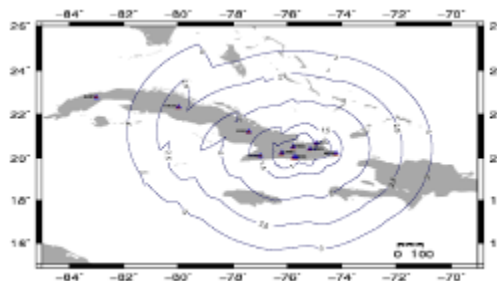


Figura 10. Umbral de detección real efectivo suavizado usando el algoritmo propuesto para las 11 estaciones, año 1999.

Ahora bien, para lograr un mejor entendimiento de la efectividad del algoritmo para determinar y graficar el umbral de la red, se han suavizado las isótopos de la figura 6, obteniéndose el mapa final de la figura 10. Este mapa se ha superpuesto con el de la figura 7, quedando representado en la figura 11, donde las isótopos de color rojo representan el mapa que obtiene el algoritmo y las isótopos de color azul el obtenido por Moreno (2002).

De la figura 11 se infiere que existe una alta coincidencia entre ambos métodos para la determinación del umbral y su graficación en un mapa. Sin embargo, en las isótopos de magnitud 3 se observa que existe cierta diferencia, pues el método manual amplía el alcance de la red hacia el occidente en 44,5 km aproximadamente, esto constituye claramente un error, tal vez al momento de graficar, pues de la figura 5 se observa que el círculo que podría aumentar el alcance, pasa exactamente por el área determinada (la cruz en el recuadro amarillo de la figura 5, marca por donde pasa la isótopo) y graficada por el algoritmo. Esto demuestra que es imposible que la isótopo vaya más allá del punto marcado, lo que contradice el mapa de la figura 7.

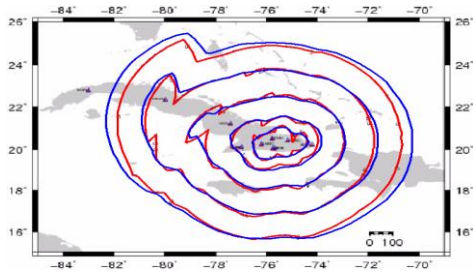


Figura 11. Resultado de superponer las figuras 7 y 10.



Figura 12. Umbral de detección con 12 estaciones para el territorio de Cuba. Fuente: Diez et al. (2014).

Hasta aquí se han comparado los resultados del algoritmo con el trabajo de Moreno (2002) sin embargo, sería prudente analizar otros resultados como los que se muestran en la figura 12 de Diez et al. (2014). Ya en epígrafes anteriores se explicó la metodología utilizada por estos autores para determinar y graficar este mapa. En la figura 13 se muestra el mapa obtenido por el algoritmo que se propone, que como se puede apreciar existen diferencias en cuanto al alcance para la región oriental, pues en la figura 12 las isolíneas de magnitud 1,4 alcanzan un área pequeña lo que se contradice con el aumento de calidad y cantidad de las estaciones en el año 2014.

Por otra parte, la figura 13 representa cómo al aumentar el número de estaciones y mejorar la calidad del equipamiento, con respecto al mapa de la figura 10 que corresponde a la red del año 1998, se ha ampliado el área de alcance para las isolíneas de magnitud 1,5 en el oriente cubano, aspecto este que no se representa en la figura 13. Hay que aclarar que, aunque el método empleado en la figura 13 no está basado en catálogos, se esperaría que un aumento del número de estaciones y de la calidad del equipamiento disminuyera el umbral. Esto nos lleva a concluir que, sin desdeñar esta metodología, el método basado en los catálogos tiende a ser más ajustado a la realidad.

Asimismo, hay que observar que en la figura 12 el umbral de detección para Cuba queda establecido para las isolíneas de magnitud 3 y en la figura 13 obtenida por el algoritmo que se propone queda establecido en 3,5. Este resultado de manera general, si se considera que los sismos realmente importantes para Cuba tienen una magnitud mayor que 4, implica que ambos métodos determinan umbrales válidos para la red de estaciones sísmológicas de Cuba.

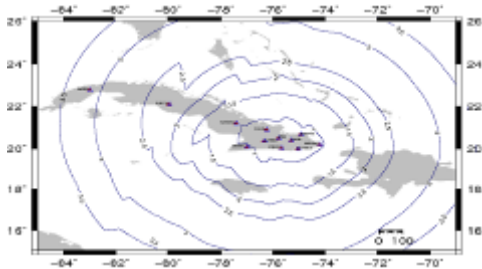


Figura 13. Umbral de detección para el territorio de Cuba con las 12 estaciones existentes en el año 2014.

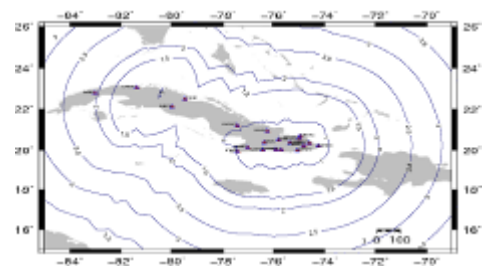


Figura 14. Umbral de detección para el territorio de Cuba con las 20 estaciones existentes en el año 2017.

Por último, una vez corroborada la factibilidad y aplicabilidad del algoritmo que se propone, se presenta la figura 14 que representa el umbral de detección de la red sismológica cubana actual (hasta agosto de 2017). Como se puede observar, en la red actual al contar con 20 estaciones, ha aumentado el área de cobertura y disminuido el valor del umbral real efectivo de detección que es lo que se esperaría con el continuo desarrollo tecnológico. Este mapa muestra como las isolíneas de magnitud 1 continúan concentradas en la región más oriental de Cuba. Sin embargo, las isolíneas de magnitud 1,5 se han expandido hasta el occidente del país, esto está dado por la mejora de los sismómetros de 20 segundos que operaban antes del 2010 por sismómetros de 60 y 120 segundos, incrementándose de esta manera el nivel de detección de la red de eventos de baja energía o magnitud ≤ 2 (Diez et al., 2014).

Estos resultados indican que cualquier sismo de magnitud mayor o igual a tres que ocurra en Cuba, podrá ser detectado al menos por tres estaciones sismológicas. Un aspecto que no se ha mencionado es que los tiempos de ejecución del algoritmo para determinar y graficar el mapa con el umbral para 11, 12 y 20 estaciones, que fueron los casos tratados, permaneció en el orden de los 1,50 a 2 segundos. El algoritmo se ejecutó en una máquina Intel Core i3-4160 a 3,60 Hz con 4G de memoria RAM.

Conclusiones

El algoritmo propuesto e implementado constituye una herramienta computacional rápida, práctica y eficaz que reduce los tiempos de ejecución a cuestiones de segundos. Se logró automatizar el procedimiento para determinar y graficar el umbral real efectivo de detección de la red sismológica cubana actual, indicando que cualquier sismo de magnitud mayor o igual a tres que ocurra en Cuba, podrá ser detectado al menos por tres estaciones sismológicas.

La propuesta contribuye desde las TIC a perfeccionar los métodos computacionales existentes para potenciar el desarrollo de la sismología en Cuba. Además, se convierte en una herramienta vital que puede apoyar la toma de decisiones, permitiendo analizar donde instalar una nueva estación sismológica. Resultando relevante en estos casos,

aplicar el procedimiento propuesto o modelar la cobertura de la red con el supuesto hecho de incluir algunas estaciones o cambiando la sensibilidad de los equipos, lo que permitiría optimizar la geometría de la red.

Queda pendiente en próximas propuestas la implementación del algoritmo en un lenguaje de alto nivel dígase C++, C# u otro. Se debe precisar además que contar con este algoritmo permite al CENAI, su posible aplicación a otras áreas como la macrosísmica para crear mapas de intensidades y localización de eventos sísmicos. Por otra parte, permite conocer con mejor precisión los niveles de actividad sísmica para perfeccionar los estimados de peligrosidad en zonas estratégicas, dígase el polo turístico, zonas de explotación minera, entre otras.

Referencias

- ÁLVAREZ, L.J.; BLANCO, P., et al. The seismic conditions of Santiago de Cuba, Bull. (Izv.) Acad. Sci. USSR, Earth Phys, 1973, 5, 320-324.
- ÁLVAREZ, L.J.; CHUY, T.J., et al. An earthquake catalogue of Cuba and neighboring areas, ICTP Internal Report IC/IR/99/1, Miramare, Trieste, 1999, 60 p.
- ÁLVAREZ, L.J.; MIJAILOVA, R.S., et al. Terremotos de Cuba y áreas aledañas. Sismicidad de Cuba y estructura de la corteza en el Caribe. Editorial Academia. La Habana. ISBN 959-02-0242-X, 2000, pp. 7-35.
- BORMANN, P. et al. IASPEI New Manual of Seismological Observatory Practice (NMSOP), 2002.
- CENAI. Sismicidad Registrada en el territorio nacional y estado de la red de estaciones del servicio sismológico nacional. Vicedirección Técnica. Archivos de Centro Nacional de Investigaciones Sismológicas, Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente, 2017.
- CHUY, T.J. Estimados de peligrosidad y microzonación sísmica de Cuba utilizando terremotos perceptibles. En: Sismos perceptibles, Peligro y Vulnerabilidad Sísmica en Cuba. Editorial Academia. La Habana. ISBN 959-02-0243-8, 2000, pp.7-50.
- CHUY, T.J. Macrosísmica de Cuba y su aplicación en los estimados de Peligrosidad y Microzonación Sísmica. Tesis en opción al Grado de Doctor en Ciencias Geofísicas. Instituto de Geofísica y Astronomía. Ciudad Universitaria José Antonio Hechavarría, 1999.
- DIEZ, E.; CUTIÉ, M., et al. Modernización de la red sísmica cubana. Instalación, calibración y puesta a punto. Revista de la Facultad de Ingeniería Universidad Central de Venezuela, 2014, 29(2), pp. 69-78.
- ESRI. ArcGIS for Desktop, version 10.2.2. Environmental Systems Research Institute, Redlands, CA, USA.

- [En línea]. 2014. [Consultado el: 15 de febrero de 2017]. Disponible en: (<http://www.esri.com/>)
- FISCHER, T.; BACHURA, M. Detection capability of seismic network based on noise analysis and magnitude of completeness. *J. Seismol*, 2014, 18:137-150. DOI 10.1007/s10950-013-9407-y
- GONZÁLEZ, O.F.; ARANGO, E.D., et al. Boletín Sismológico Cubano. Editorial Academia, La Habana. Red de Estaciones e Investigaciones sismológicas en Cuba. ISBN 959-02-0244-6, 1996, pp. 7-17.
- HERRMANN, R.B. Computer programs in seismology. An overview of synthetic seismogram computation. [En línea]. 2002, [Consultado el: 25 de octubre de 2017]. Disponible en: http://www.eas.slu.edu/eqc/eqc_cps/CPS/CPS330/cps330o.pdf
- IRIS CONSORTIUM. Network map for CW. Servicio Sismológico Nacional de Cuba (SSNC). [En línea]. 2017, [Consultado el: 23 de octubre de 2017]. Disponible en: <http://ds.iris.edu/gmap/CW>
- KVAERNA, T.; RINGDAL, F. Detection Capability of the Seismic Network of the International Monitoring System for the Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2013, Vol. 103, No. 2A, pp. 759-772, DOI: 10.1785/0120120248.
- MATLAB. MATLAB and Statistics Toolbox Release R2012A (7.14.0.739). The Math Works, Inc., Natick, Massachusetts, United States.
- MORENO, B. The new Cuban seismograph network, *Seis. Res. Lett.*, 73, 504-517. 2002
- MORENO, B.; GRANDISON, M.; ATAKAN, K. Crustal velocity model along the southern Cuban margin: Implications for the tectonic regime at an active plate boundary, *Geophys. J. Int*, 2002, 151, 632- 645.
- OTTEMÖLLER, V.; HAVSKOV, J. Seisan earthquake analysis software for Windows, Solaris, Linux and Macosx, 2014.
- SCHORLEMMER, D.; WOESSNER, J. Probability of Detecting an Earthquake. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2008, Vol. 98, No. 5, pp. 2103–2117, DOI: 10.1785/0120070105.
- TIIRA, T.; USKI, M., et al. Local seismic network for monitoring of a potential nuclear power plant area. *Journal of Seismology*, 2016, Volume 20, Issue 2, pp. 397-417.
- WESSEL, P.; SMITH, W.H.F., et al. Generic Mapping Tools: Improved version released, *EOS Trans*, 94, 409-410, 2013. DOI: 10.1002/2013EO450001.